



UDC 594.141:57.047+502.51(477.82)(285)
DOI 10.35433/naturaljournal.3.2023.91-101

ВМІСТ КСАНТОФІЛІВ В ОРГАНІЗМІ СТАВКОВИКА ЗВИЧАЙНОГО ЗА ДІЇ ІОНІВ ХРОМУ

Г. Є. Киричук¹, А. В. Музика², А. Є. Астахова³

На сьогодні особливо гострою проблемою є забруднення природних вод іонами важких металів, наслідком впливу яких є порушення балансу ланцюгів живлення та в цілому екологічної рівноваги екосистеми. У зв'язку з цим, актуальними є дослідження відгуку біотичних компонентів гідроекосистеми на токсичну дію, що дозволить розширити уявлення про адаптивні механізми водних організмів та визначити чутливі тест-об'єкти та тест-функції для оцінки ступеня забруднення природних вод.

Вивчено вплив іонів хрому (Cr^{3+} та $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) в концентрації, що відповідає 0,5 та 2 ГДК_{рибогосп.} на вміст ксантофілів у гемолімфі, гепатопанкреасі, мантії та нозі *Lymnaea stagnalis*, який є постійним компонентом більшості гідробіоценозів Житомирського Полісся. З'ясовано динаміку вмісту обговорюваних каротиноїдів за різної тривалості експозиції (2, 7, 14 та 21 доба) досліджуваних молюсків у токсичному середовищі.

З'ясовано, що 48-годинна експозиція молюсків у розчинах іонів хрому (Cr^{3+} та $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) незалежно від їх концентрації (0,5 та 2 ГДК) викликає збільшення вмісту ксантофілів у всіх досліджуваних органах і тканинах *L. stagnalis* в 2,45–3,23 рази ($p \leq 0,001$), що вказує на розвиток миттевої відповіді тварин на токсичну дію. Подальше пролонгування впливу іонів хрому (7, 14 та 21 доба) обумовило нелінійну органозалежну динаміку вмісту ксантофілів, що пов'язано із специфічністю дії іонів, тривалістю експозиції тварин в токсичних розчинах та метаболічними особливостями досліджуваних органів і тканин. Показано, що вміст ксантофілів в організмі *L. stagnalis* характеризується тканинно-органною специфікою. Мінімальні кількості обговорюваного каротиноїду зафіксовано у гемолімфі тварин, а

¹ доктор біологічних наук, професор,
професор кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університету імені Івана Франка)
e-mail: kyrychuk@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-1059-2834

² кандидат біологічних наук, доцент кафедри
ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університету імені Івана Франка)
e-mail: lidiya.muzyka@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7752-7853

³ кандидат біологічних наук, доцент, доцент
кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття
(Житомирський державний університету імені Івана Франка)
e-mail: lastahovazt@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1159-525X

максимальні показники значно варіювали між досліджуваними компонентами залежно від умов експерименту.

Ключові слова: прісноводні молюски, іони важких металів, каротиноїдні пігменти, окислювальний стрес, метаболічна адаптація.

XANTHOPHYLL CONCENTRATION IN LYMNAEA STAGNALIS CAUSED BY CHROMIUM IONS

Kyrychuk G., Muzyka L., Astahova L.

Currently the pollution of natural waters by heavy metal ions is a particularly serious problem which results in the disruption of the balance of food chains and the overall ecosystem balance. In this regard the study of the reaction of the biotic components of the hydroecosystem to toxic effects is relevant, and will allow to expand the understanding of the adaptive mechanisms of aquatic organisms and to determine sensitive test objects and test functions for assessing the degree of pollution of natural waters.

The influence of chromium ions (Cr^{3+} and $Cr_2O_7^{2-}$) in concentrations corresponding to 0.5 and 2 TLV in fish farming water basins was studied based on the concentration of xanthophylls in hemolymph, hepatopancreas, mantle and leg of *Lymnaea stagnalis*, which is a permanent component of most hydrobiocenoses of Zhytomyr Polissia. The dynamics of the discussed carotenoids at different durations of exposure (2, 7, 14 and 21 days) of the studied shellfish in a toxic environment were observed.

It was found that 48-hour exposure of shellfish in solutions of chromium ions (Cr^{3+} and $Cr_2O_7^{2-}$) regardless of their concentration (0.5 and 2 TLV) causes 2.45–3.23 times increase of xanthophylls in all the studied organs and tissues of *L. stagnalis* ($p \leq 0.001$) which indicates the development of an immediate reaction of animals to toxic elements. Further prolongation of exposure to chromium ions (7, 14, and 21 days) resulted in non-linear organ-dependent dynamics of the xanthophyll content which is related to the specificity of the action of ions, the duration of exposure of animals to toxic solutions, and the metabolic features of the studied organs and tissues. It is shown that the content of xanthophylls in the body of *L. stagnalis* is characterized by tissue-organ specificity. The minimum amounts of the discussed carotenoid were recorded in the hemolymph of animals and the maximum values varied significantly between the studied components depending on the experimental conditions.

Key words: freshwater shellfish, heavy metal ions, carotenoid pigments, oxidative stress, metabolic adaptation.

Вступ.

Забруднення прісноводних екосистем є досить серйозною проблемою, адже використання води в промислових процесах, скиди комунальних підприємств та міських забудов призводять до надмірного надходження у водойми шкідливих речовин, серед яких пріоритетну групу складають іони важких металів (ВМ), які легко розчиняються у воді, мають хронічну токсичність, не здатні до біологічного розпаду, переносяться в ланцюгах живлення та накопичуються в організмах гідробіонтів у концентраціях, котрі в рази вищі, ніж у водному

середовищі (Valdés et al., 2014; Aslam, 2017; Gigantone, 2020).

Відомо, що такі іони ВМ, як кадмію, хрому, плумбуму, меркурію та арсену є системними токсикантами, які, навіть у низьких концентраціях викликають численні пошкодження тканин і органів гідробіонтів, впливають на клітинні органели та інгібують ферменти, зокрема і регулятори процесів детоксикації та репарації ушкоджень (Olsson, 1998; Wang, 2001; Casas, 2008; Aslam, 2017). Наслідком такого впливу є порушення балансу ланцюгів живлення та в цілому екологічної рівноваги екосистеми.

Хром належить до групи особливо небезпечних поллютантів (Aslam, 2017),

бо, як відомо, є перехідним металом та проявляє біологічну роль в екосистемах залежно від ступеня окислення. В незабруднених і незначно забруднених річках вміст хрому становить від десятих мікрограмів до кількох мікрограмів на дм^3 , в той час у забрудненій воді може перевищувати десятки та сотні мікрограмів на дм^3 (Allaberdiyevich, 2023).

Найстабільнішими ступенями окислення для цього елемента є Cr (III) та Cr (VI), які належать до генотоксичних та можуть викликати окислювальне пошкодження клітини різними молекулярними механізмами. Як відомо, значно вищий рівень токсичності має Cr (VI), який проявляє мутагенні та канцерогенні властивості та розглядається як один із найнебезпечніших хімічних чинників, що здатний порушувати екологічну рівновагу екосистеми (Yanovych & Shvets, 2017; Allaberdiyevich, 2023). Окрім цього, Cr (VI), характеризується значною біодоступністю, може проходити через клітинну мембрану та відновлюватись в клітині до стану з більш низьким ступенем окислення, викликаючи утворення активних форм кисню методом Габера-Вейса або Фентона та призводячи до розвитку різних токсичних ефектів (Wang et al., 2017).

На сьогодні простими та надійними біомаркерами для вимірювання токсичної дії іонів важких металів та механізмів порушень гомеостазу, викликаних токсичними агентами є прісноводні молюски, які виступають постійним компонентом більшості гідробіоценозів, входять до ланцюгів живлення, можуть накопичувати велику кількість іонів металів, що в кінцевому підсумку призводить до біомагніфікації (Ситник та ін., 2012).

Зважаючи на все вище зазначене, дане дослідження є актуальним, має теоретичне та практичне значення.

Матеріал і методи.

Матеріал: 180 екз. *Lymnaea stagnalis* (Linné, 1758), зібраних в басейні р. Тетерів (с. Дригів, Житомирська обл.). Для аклімації до лабораторних умов

молюсків утримували в акваріумах із відстояною протягом доби аерованою водопровідною водою при сталій температурі, рівню кисню та рН ($t = 18\text{--}20^\circ\text{C}$; рН = 7,3–7,7; вміст кисню = 8,5–8,9 мг/ дм^3) протягом 14 діб.

Як токсиканти використано $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ та $\text{Cr}(\text{CH}_3\text{COO})_3$. Розрахунок концентрації проведено на катіон для $\text{Cr}(\text{CH}_3\text{COO})_3$ та аніон для $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. В основному токсикологічному експерименті використано концентрації іонів хрому, які відповідали 0,5 та 2 ГДК_{рибогосп.} Експозиція – 2, 7, 14 та 21 доба. Розчини готували на дехлорованій воді та замінювали свіжими щодоби. Контролем слугували молюски, поміщені в водопровідну дехлоровану воду без додавання токсиканту.

По закінченню чергової експозиції у молюсків контрольної та дослідної груп вимірювали морфометричні параметри та визначали загальну масу тіла й органів. Для біохімічного дослідження у тварин вилучали гепатопанкреас, мантию, ногу та гемолімфу. Щоб виключити вплив на досліджені показники трематодної інвазії, для дослідження обрано лише неінвазованих особин.

Для визначення вмісту ксантофілів зразки тканин гомогенізували та проводили екстракцію гексаном (1:4). Усі використані у роботі реактиви мали кваліфікацію «чда». Усього виконано 720 біохімічних аналізи.

Статистичну обробку результатів дослідження проводили загальноприйнятими методами варіаційної статистики із застосуванням t-критерію Ст'юдента. Розбіжності вважали статистично вірогідними при $p < 0,05\text{--}0,001$.

У процесі виконання дослідження норми біоетики порушені не були.

Результати та обговорення.

Відомо, що одним із компонентів неферментативної системи антиоксидантного захисту організму гідробіонтів є каротиноїдні пігменти, які беруть активну участь в окисно-відновних процесах клітини, здатні нейтралізувати вільні радикали,

попереджувати окислювальне пошкодження клітини (Mahboob, 2013; Young & Lowe, 2018) та підвищувати ефективність імунної реакції (Tan et al., 2020).

Нашими попередніми дослідженнями встановлено, що Cr (III) та Cr (VI) у концентраціях, що відповідають 0,5 та 2 ГДК (експозиція – 2, 7, 14, 21 доба) викликають зміни вмісту β -каротину в організмі *L. stagnalis*, однак дія цих іонів у кожному дослідженому органі чи тканині залежно від умов експерименту була багатовекторною та характеризувалася регуляторно-токсичним принципом дії (Кутушук &

Muzyka, 2016). У зв'язку з цим виникла потреба проаналізувати особливості дії досліджуваних іонів на вміст ксантофілів, які є окисленими похідними каротинів, і, які, на відміну, від β -каротину не проявляють прооксидантних властивостей (Martin, 1999). У результаті проведених експериментів з'ясовано, що за 2-добової експозиції іони хрому у допороговій концентрації (0,5 ГДК) незалежно від ступеня окиснення стимулюють значне збільшення вмісту ксантофілів у всьому організмі досліджуваних молюсків в 2,04 – 2,87 рази ($p < 0,001$) (рис. 1)

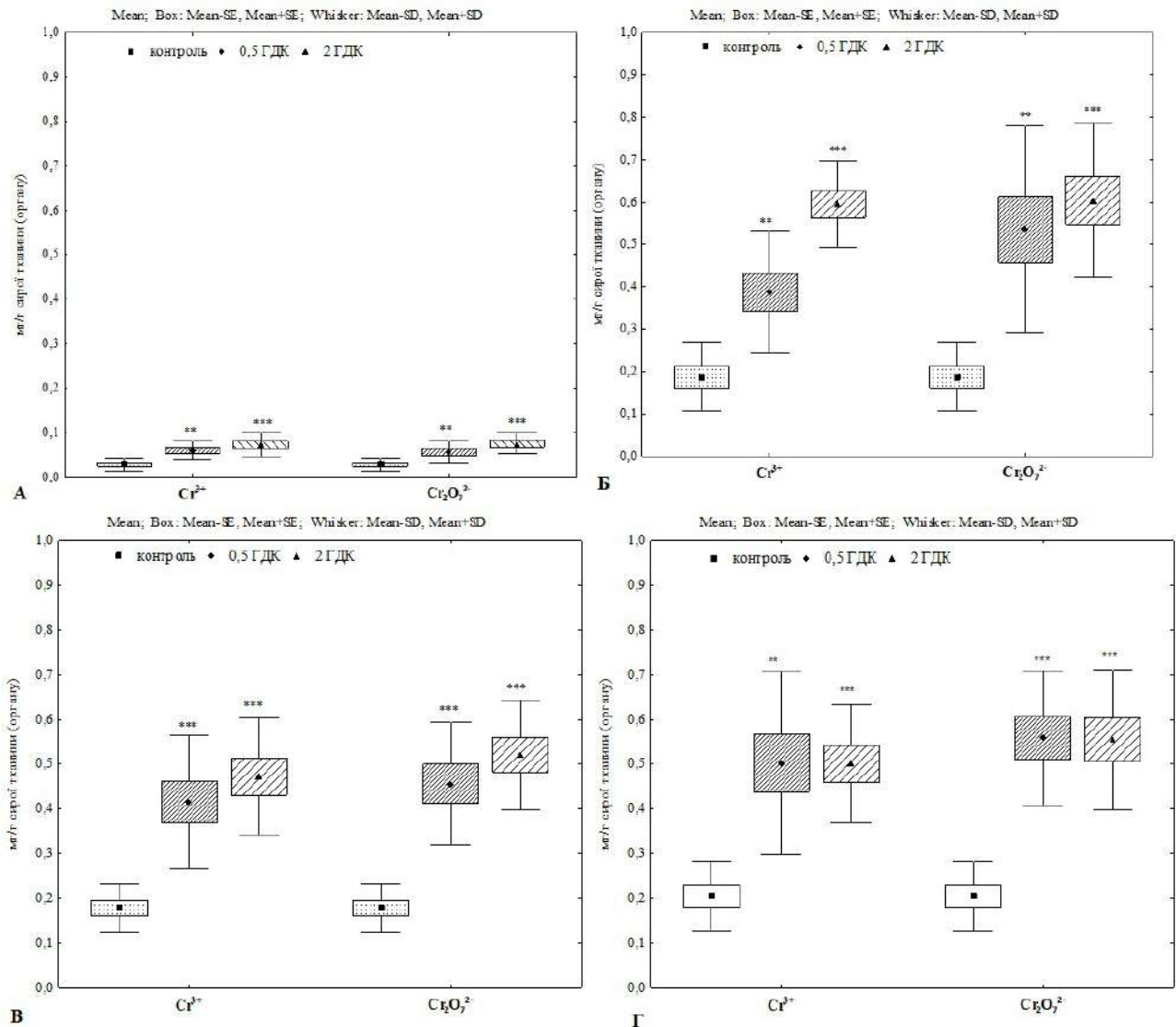


Рис. 1 Вплив іонів хрому (експозиція – 2 доби) на вміст ксантофілів в організмі *L. stagnalis*: А – гемолімфа, Б – гепатопанкреас; В – мантія; Г – нога; * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

Таку ж динаміку зафіксовано і при збільшенні дозового навантаження хромом до рівня 2 ГДК (експозиція – 48 діб): відмічено збільшення вмісту ксантофілів (в 2,45–3,23 раза ($p \leq 0,001$)) в усіх досліджуваних тканинах і органах *L. stagnalis*.

При цьому, досліджувані органи (в порядку збільшення відхилення від контролю) можна розмістити таким чином:

0,5 ГДК : гемолімфа → гепатопанкреас → мантия → нога;
 2 ГДК гемолімфа → мантия → нога → гепатопанкреас;
 $Cr_2O_7^{2-}$
 0,5 ГДК гемолімфа → мантия → гепатопанкреас → нога;
 2 ГДК гемолімфа → мантия → нога → гепатопанкреас.

Така динаміка може бути обумовлена особливостями дії іонів хрому, які, як відомо, є отрутами локальної дії, що здатні вражати клітини поверхневого мерехтливого епітелію досліджуваних тварин, безперешкодно надходити в організм та викликати ослизнення шкірних покривів, що перешкоджає газообміну та призводить до розвитку гіпоксії (Дудник і Євтушенко, 2013). У відповідь на це, відбувається вилучення кисню, депонованого за рахунок спряжених подвійних зв'язків в молекулі каротиноїду, в результаті чого обговорювані сполуки набувають забарвлення та фіксуються у видимій області спектра.

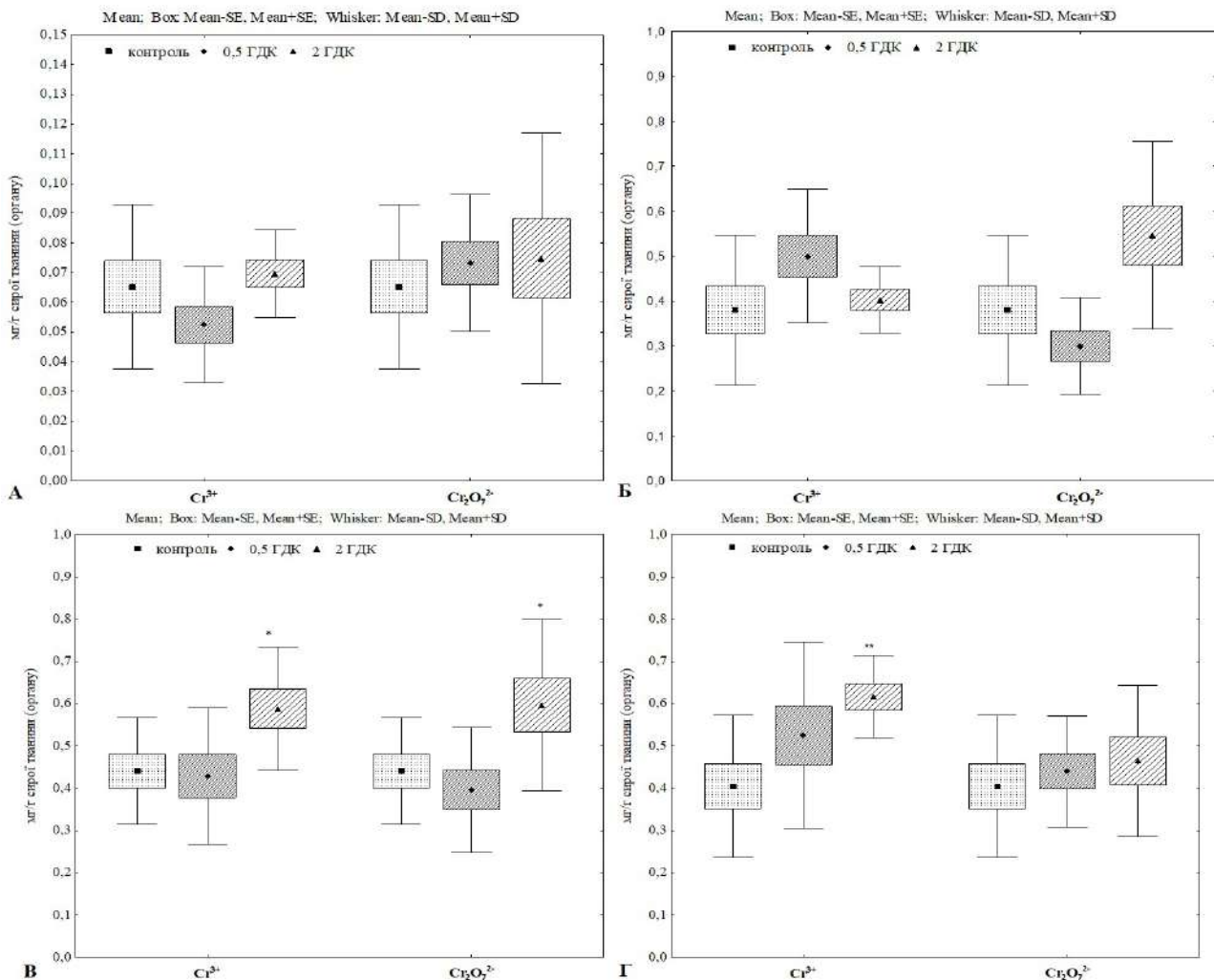


Рис. 2 Вплив іонів хрому (експозиція – 7 діб) на вміст ксантофілів в організмі *L. stagnalis*: А – гемолімфа, Б – гепатопанкреас; В – мантия; Г – нога; * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

Окрім цього, таке суттєве збільшення ксантофілів може свідчити про активізацію захисних сил організму молюсків у відповідь на посилення процесів вільнорадикального окислення, викликаних іонами хрому, у зв'язку з чим відмічається підвищення рівня неферментативних антиоксидантів в клітині (Chaabane, 2020).

При збільшенні часу контакту з іонами Cr^{3+} (0,5 ГДК) до 7 діб встановлено органоспецифічну динаміку. Так, за таких умов експерименту вміст ксантофілів збільшувався у нозі та гепатопанкреасі молюсків (на 29,64–31,55 %), зменшувався на 19,60 % у гемолімфі, а у мантиї показники контрольної та дослідної групи знаходились в одному діапазоні значень (рис. 2).

Щодо дії іонів Cr (VI), то зафіксовано відмінну динаміку, адже відмічено збільшення вмісту каротиноїдів (на 12,40 %) у гемолімфі та його зменшення на 10,26–21,16 % у мантиї та гепатопанкреасі тварин. Для ноги *L. stagnalis* за значеннями обговорюваного показника не встановлено статистично достовірних відмінностей від контролю.

За умови підвищення концентрації іонів Cr (III) до рівня 2 ГДК відмічається збільшення вмісту ксантофілів на 33,40 та 52,22 % відповідно у мантиї та нозі *L. stagnalis*, а в їх гемолімфі та гепатопанкреасі не встановлено статистично достовірних відмінностей від контролю. Водночас, дія $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (2 ГДК) обумовила зростання показників в усьому організмі досліджуваних молюсків на 14,55–43,71 %. При цьому, найбільше

відхилення від контролю зафіксовано у гепатопанкреасі тварин, а найменше – у їх гемолімфі. Таке нарощування ресурсів ксантофілів, імовірно, можна розглядати як тканинну нейтралізацію продуктів ПОЛ, за якої активуються механізми неспецифічного антиоксидантного захисту у відповідь на посилення окислювального стресу за дії іонів хрому.

Подальше пролонгування експозиції молюсків у середовищі, затруєному іонами Cr^{3+} та $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ до 14 діб (0,5 ГДК) супроводжується збільшенням показників у гемолімфі та нозі досліджуваних молюсків на 15,71–54,16 % (рис. 3). Водночас, у гепатопанкреасі та мантиї показники контрольної та дослідної груп виявились величинами одного порядку.

При збільшенні токсичного навантаження іонами хрому до рівня 2 ГДК залежно від ступеня окислення встановлено різну динаміку. Так, дія Cr (III) призвела до зменшення вмісту ксантофілів в усіх досліджених органах на 19,38 – 34,98 %. Однак, у гемолімфі, яка слугує джерелом перенесення каротиноїдів, зафіксовано збільшення значень в 3,42 рази відносно контролю. Дія хрому (VI) за обговорюваних умов досліду викликала збільшення вмісту ксантофілів у всьому організмі *L. stagnalis* на 12,97–74,55 %.

За довгострокової експозиції (21 доба) молюсків у середовищі, затруєному іонами Cr^{3+} та $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (0,5 ГДК) відмічено зменшення вмісту ксантофілів у гемолімфі та мантиї молюсків на 17,83–55,9 % (рис. 4).

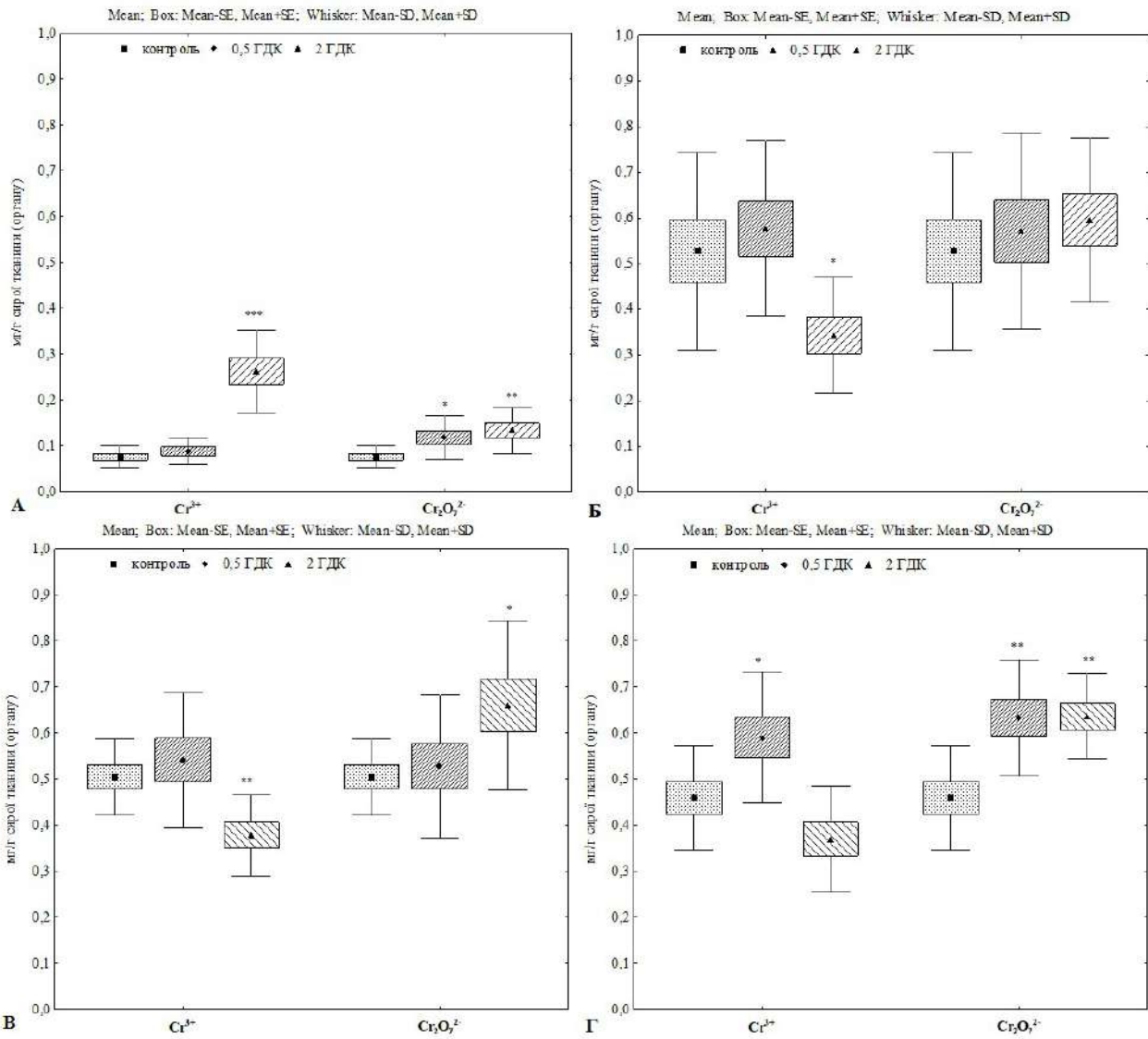


Рис. 3 Вплив іонів хрому (експозиція – 14 діб) на вміст ксантофілів в організмі *L. stagnalis*: А – гемолімфа, Б – гепатопанкреас; В – мантія; Г – нога; *– $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

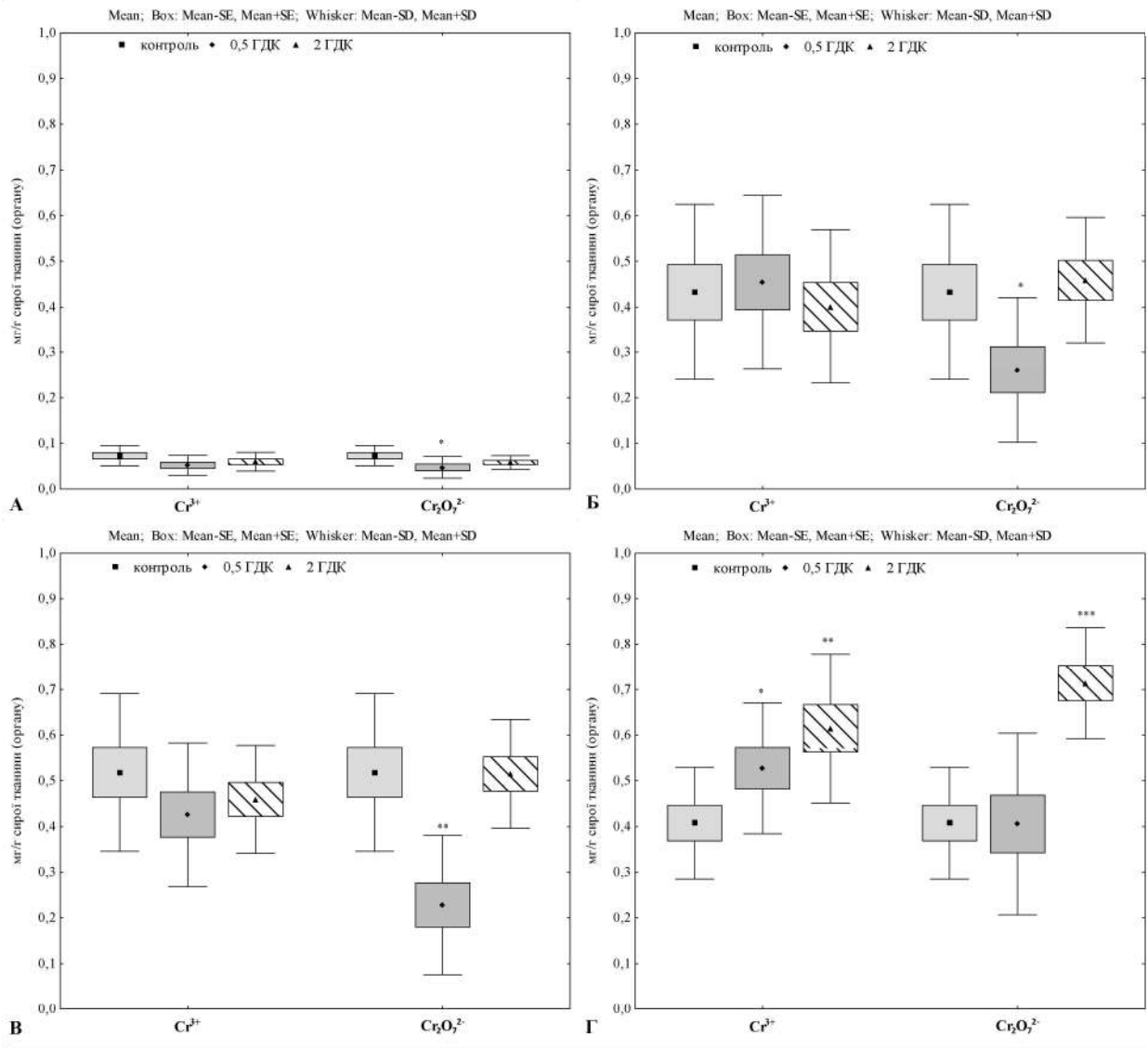


Рис. 4 Вплив іонів хрому (експозиція – 21 доба) на вміст ксантофілів в організмі *L. stagnalis*: А – гемолімфа, Б – гепатопанкреас; В – мантия; Г – нога; * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

У нозі тварин дія хрому (III) викликала збільшення обговорюваних показників на 29,38%, а $Cr_2O_7^{2-}$ -за таких умов експерименту не обумовлювали відмінностей від контролю. Для гепатопанкреасу зафіксовано зменшення значень (на 39,51 %) за дії Cr (VI) та не вдалося встановити статистично достовірних відхилень за токсичного впливу Cr (III).

Довгострокове інкубування *L. stagnalis* у розчинах іонів Cr^{3+} та $Cr_2O_7^{2-}$ більш високої концентрації (2ГДК) призвело до зменшення

кількості ксантофілів на 18,10–20,30 % у гемолімфі, їх збільшення на 50,91–75,21 % у нозі та не обумовлювало змін у гепатопанкреасі. У мантиї тварин кількість ксантофілів зменшувалась на 11,33 % за дії Cr^{3+} та знаходилась на рівні показників контрольної групи при контакті з $Cr_2O_7^{2-}$.

Така динаміка, ймовірно, пов'язана із цільовим перерозподілом ксантофілів між тканинами молюсків та метаболічною трансформацією одних форм ксантофілів в інші.

Висновки.

Отже, зміни вмісту ксантофілів у тканинах та органах *L. stagnalis* за дії іонів хрому є одним із елементів компенсаторно-адаптивної відповіді цих тварин, що проявляється в певних межах токсичного навантаження і направлена на підтримку їх гомеостазу.

З'ясовано, що вміст ксантофілів в організмі *L. stagnalis* за дії іонів хрому залежить від ступеня окиснення металу, що визначає специфічність

його дії, часу експозиції тварин у токсичних розчинах та характеризується тканинно-органною специфічністю. Мінімальними показниками вмісту обговорюваних каротиноїдів характеризується гемолімфа тварин, а максимальні значення варіюють між органами та тканинами залежно від досліджуваного іону та тривалості експозиції тварин у токсичних розчинах.

Список використаних джерел

- Дудник С. В., Євтушенко М. Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування : монографія, Київ.: Вид-во Українського фітосоціологічного центру, 2013. 297 с.
- Ситник Ю. М., Арсан О. М., Киричук Г. Є., Ляшенко А. В., Вітовецька Т. В. Вміст важких металів в органах та тканинах молюсків деяких водойм міської зони Києва. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. 2012. 51. С. 230–236.
- Allaberdiyevich S. S. Quantitative Properties of Chemical Elements in the Body of Bivalves. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2023. 19 (3). P. 72–78.
- Aslam S., Yousafzai A. M. Chromium toxicity in fish: A review article. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 2017. 5 (3). P. 1483–1488.
- Casas S., Gonzalez J. L., Andral B., Cossa D. Relation between metal concentration in water and metal content of marine mussels (*Mytilus galloprovincialis*): impact of physiology. *Environ Toxicol Chem*. 2008. 27. P.1543–1552. <https://doi.org/10.1897/07-418.1>.
- Chaâbane M., Bejaoui S., Trabelsi W., Telahigue K., Chetoui I., Chalghaf M., Soudani N. The potential toxic effects of hexavalent chromium on oxidative stress biomarkers and fatty acids profile in soft tissues of *Venus verrucosa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020. 196. 110562. <https://doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110562>.
- Gigantone C. B., Sobremisana M. J., Trinidad L. C., Migo V. P. Impact of abandoned mining facility wastes on the aquatic ecosystem of the Mogpog river, Marinduque, Philippines. *Journal of Health and Pollution*. 2020. 10 (26). 200611.: <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.26.200611>.
- Kyrychuk G. Y., Muzyka L. V. Peculiarities of the distribution of β -carotene in the organism of *Lymnaea stagnalis* under the influence of the ions of heavy metals. *Hydrobiological Journal*. 2016. 52 (5). P. 63–72. <https://doi: 10.1615/HydrobJ.v52.i5.70>.
- Mahboob S. Environmental pollution of heavy metals as a cause of oxidative stress in fish: a review. *Life Sci. J*. 2013. 10. P. 336–347.
- Martin H. D., Ruck C., Schmidt M., Sell S., Beutner S., Mayer B., Walsh R. Chemistry of carotenoid oxidation and free radical reactions. *Pure and applied chemistry*. 1999. 71 (12). P. 2253–2262. <https://doi.org/10.1351/pac199971122253>.
- Mubiana V. K., Vercauteren K., Blust R. The influence of body size, condition index and tidal exposure on the variability in metal bioaccumulation in *Mytilus edulis*. *Environ Poll*. 2006. 144. P. 272–279. <https://doi:10.1016/j.envpol.2005.12.017>.
- Olsson P. E., Kling P., Hogstrand C. Mechanisms of heavy metal accumulation and toxicity in fish. In: *Metal metabolism in aquatic environments*. Boston, MA: Springer US, 1998. P. 321–350.

Tan K., Zhang H., Lim L. S., Ma H., Li S., Zheng H. Roles of carotenoids in invertebrate immunology. *Frontiers in Immunology*. 2020. 10. 3041. [https://doi:10.3389/fimmu.2019.03041](https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.03041).

Valdés J., Guinez M., Castillo A., Vega S. E. Cu, Pb, and Zn content in sediments and benthic organisms from San Jorge Bay (northern Chile): Accumulation and biotransference in subtidal coastal systems. *Ciencias Marinas*. 2014. 40 (1). P. 45–58. <https://doi.org/10.7773/cm.v40i1.2318>.

Wang K. S., Chiang K. Y., Tsai C. C., Sun C. J., Tsai C. C., Lin K. L. The effects of FeCl₃ on the distribution of the heavy metals Cd, Cu, Cr, and Zn in a simulated multimetal incineration system. *Environment International*. 2001. 26 (4). P. 257–263. [https://doi:10.1016/s0160-4120\(00\)00115-x](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(00)00115-x).

Wang Y., Su H., Gu Y., Song X., Zhao J. Carcinogenicity of chromium and chemoprevention: a brief update. *Oncotargets and therapy*. 2017. 10. P. 4065–4079. [https://doi:10.2147/OTT.S139262](https://doi.org/10.2147/OTT.S139262).

Yanovych D. O., Shvets T. M. Chromium in Hydroecosystems and its Impact on the Aquatic Biota (a Review). *Hydrobiological Journal*. 2017. 53 (4). P. 69–84. [https://doi:10.1615/hydrobj.v53.i4.70](https://doi.org/10.1615/hydrobj.v53.i4.70).

Young A. J., Lowe G. L. Carotenoids – antioxidant properties. *Antioxidants*. 2018. 7 (2). 28. [https://doi:10.3390/antiox7020028](https://doi.org/10.3390/antiox7020028).

References (translated & transliterated)

Dudnyk, S. V., & Jevtushenko, M. Ju. (2013) Vodna toksykologhija: osnovni teoretychni polozhennja ta jikhnje praktychne zastosuvannja [Aquatic toxicology: basic theoretical principles and their practical application]. Publishing House of the Ukrainian Phytosociological Center. Kyiv. 297 p [In Ukrainian].

Sytnyk, Ju. M., Arsan, O. M., Kyrychuk, G. Je., Ljashenko, A. V., & Vitovecjkja, T. V. (2012) Vmist vazhkykh metaliv v orghanakh ta tkanynakh moljuskiv dejakykh vodojm misjkoji zony Kyjeva [The content of heavy metals ions in organs and tissues of mollusks from some Kyiv city water reservoirs]. *Naukovi zapysky Ternopiljskogho nacionaljnogho pedagoghichnogho universytetu imeni Volodymyra Ghnatjuka* [Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University], 51, 230–236 [In Ukrainian].

Allaberdiyevich, S. S.(2023) Quantitative Properties of Chemical Elements in the Body of Bivalves. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 19 (3). 72–78 [in English].

Aslam, S., & Yousafzai, A. M. Chromium toxicity in fish: A review article. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 2017. 5 (3). P. 1483–1488 [in English].

Casas, S., Gonzalez, J. L., Andral, B., & Cossa, D.(2008) Relation between metal concentration in water and metal content of marine mussels (*Mytilus galloprovincialis*): impact of physiology. *Environ Toxicol Chem*. 27. P.1543–1552. <https://doi.org/10.1897/07-418.1> [in English].

Chaâbane, M., Bejaoui, S., Trabelsi, W., Telahigue, K., Chetoui, I., Chalghaf, M., & Soudani, N.(2020) The potential toxic effects of hexavalent chromium on oxidative stress biomarkers and fatty acids profile in soft tissues of *Venus verrucosa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 196. 110562. [https://doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110562](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110562) [in English].

Gigantone, C. B., Sobremisana, M. J., Trinidad, L. C., & Migo, V. P.(2020) Impact of abandoned mining facility wastes on the aquatic ecosystem of the Mogpog river, Marinduque, Philippines. *Journal of Health and Pollution*. 10 (26). 200611. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.26.200611> [in English].

Kyrychuk, G. Y., & Muzyka, L. V. (2016) Peculiarities of the distribution of β-carotene in the organism of *Lymnaea stagnalis* under the influence of the ions of heavy

metals. *Hydrobiological Journal*. 52 (5). P. 63–72. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v52.i5.70> [in English].

Mahboob, S. Environmental pollution of heavy metals as a cause of oxidative stress in fish: a review. *Life Sci. J.* 10. P. 336–347 [in English].

Martin, H. D., Ruck, C., Schmidt, M., Sell, S., Beutner, S., Mayer, B., & Walsh, R. (1999) Chemistry of carotenoid oxidation and free radical reactions. *Pure and applied chemistry*. 71 (12). 2253–2262. <https://doi.org/10.1351/pac199971122253> [in English].

Mubiana, V. K., Vercauteren, K., & Blust, R. (2006) The influence of body size, condition index and tidal exposure on the variability in metal bioaccumulation in *Mytilus edulis*. *Environ Poll.* 144. 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.017> [in English].

Olsson, P. E., Kling, P., & Hogstrand, C. (1998) Mechanisms of heavy metal accumulation and toxicity in fish. In: *Metal metabolism in aquatic environments*. Boston, MA: Springer US. P. 321–350. [in English].

Tan, K., Zhang, H., Lim, L. S., Ma, H., Li, S., Zheng, H. (2020) Roles of carotenoids in invertebrate immunology. *Frontiers in Immunology*. 10. 3041. doi: 10.3389/fimmu.2019.03041 [in English].

Valdés, J., Guinez, M., Castillo, A., & Vega, S. E. (2014) Cu, Pb, and Zn content in sediments and benthic organisms from San Jorge Bay (northern Chile): Accumulation and biotransference in subtidal coastal systems. *Ciencias Marinas*. 40 (1). 45–58. <https://doi.org/10.7773/cm.v40i1.2318> [in English].

Wang, K. S., Chiang, K. Y., Tsai, C. C., Sun, C. J., Tsai, C. C., Lin, K. L. (2001) The effects of FeCl₃ on the distribution of the heavy metals Cd, Cu, Cr, and Zn in a simulated multimetal incineration system. *Environment International*. 26 (4). 257–263. doi:10.1016/s0160-4120(00)00115-x [in English].

Wang, Y., Su, H., Gu, Y., Song, X., Zhao, J. (2017) Carcinogenicity of chromium and chemoprevention: a brief update. *OncoTargets and therapy*. 10. P. 4065–4079. <https://doi.org/10.2147/OTT.S139262> [in English].

Yanovych, D. O., & Shvets, T. M. (2017) Chromium in Hydroecosystems and its Impact on the Aquatic Biota (a Review). *Hydrobiological Journal*. 53 (4). 69–84. <https://doi.org/10.1615/hydrobj.v53.i4.70> [in English].

Young, A. J., & Lowe, G. L. (2018) Carotenoids antioxidant properties. *Antioxidants*. 7 (2). 28. <https://doi.org/10.3390/antiox7020028> [in English].

Отримано: 2 травня 2023
Прийнято: 19 травня 2023