2024-2025) and Project No S-LU-24-13 under the Lithuania-Ukraine Cooperation Program.

References

1. Amelia T., Khalik W., Ong M., Shao Y., Pan H., Bhubalan K. Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. *Prog. Earth Planet Sci.* 2021. Vol. 8. P. 1–26. https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4
2. Escudero J., Muñoz J. L., Morera-Herreras T., Hernandez R., Medrano J., Domingo-Echaburu S., Barceló D., Orive G., Lertxundi U. Antipsychotics as environmental pollutants: An underrated threat? *Sci Total Environ.* 2021. Vol. 769. P. 144634. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144634
3. Martyniuk V., Matskiv T., Yunko K., Khoma V., Gnatyshyna L., Faggio C., Stoliar O. Reductive stress and cytotoxicity in the swollen river mussel (*Unio tumidus)* exposed to microplastics and salinomycin. *Environ Pollut*. 2024. Vol. 350. P. 123724. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123724
4. Moreira D. G., Aires A., de Lourdes Pereira M., Oliveira M. Levels and effects of antidepressant drugs to aquatic organisms. *Comparative biochemistry and physiology. Toxicology & pharmacology : CBP.* 2022. Vol. 256. P. 109322. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109322

УДК 597.551.2:632.95

МУЛЬТИСИСТЕМНІ МЕТАБОЛІЧНІ ПОРУШЕННЯ У *DANIO RERIO* ЗА ВПЛИВУ МЕТАЛІВ МІЛІТАРНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Горин О. І., Гладчук М. М., Боднар О. І.

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

E-mail: horynoi@tnpu.edu.ua

Повномасштабна війна в Україні спричинила безпрецедентне зростання техногенного навантаження на природні екосистеми, суттєво загостривши екологічні ризики, пов’язані з масовим забрудненням водних екосистем продуктами

військової діяльності [1]. Особливу небезпеку становить потрапляння мілітарних токсикантів у водойми, що створює загрозу для їх функціонування і біологічної безпеки регіонів загалом, та потребує науково обґрунтованих підходів до оцінювання їхнього впливу на водні організми. Вважаємо, що одними з найбільших загроз є важкі метали, які завдяки високій токсичності, здатності до біоакумуляції та персистентності, представляють винятковий інтерес для довготривалого моніторингу та оцінки ризиків для екосистем.

Гідробіонти, як ключові компоненти водних екосистем, є чутливими індикаторами екологічного стану середовища. Зміни їхнього фізіологічного та біохімічного статусу, насамперед порушення метаболічних процесів, відображають ранні стадії токсичного впливу й можуть слугувати основою для прогнозування подальших екологічних змін [2]. У цьому контексті особливого значення набуває виявлення так званих «критичних точок» – межових станів функціонування організму, за яких компенсаторні механізми переходять у фазу дезадаптації, що зумовлює розвиток патологічних змін або загибель особин.

Виходячи з вищесказаного, було проведено модельний експеримент з використанням Danio rerio як тест-організму для оцінки токсичного впливу металевого забруднення, характерного для зон воєнних дій. Вибір металів Cu, Zn, Pb та Cd здійснювали на основі комплексного розробленого підходу, який враховував їх токсичність, здатність до біоакумуляції, поширеність у зонах військової діяльності. Риби експонувалися 2 та 4 тижні у розчинах солей зазначених металів у концентраціях, зафіксованих у моніторингових звітах поверхневих вод України (досліджувані групи CuL, ZnL, PbL, CdL та їх суміш MixL)[3, 4], а також у концентраціях, збільшених утричі для моделювання сценаріїв пікового забруднення (досліджувані групи CuH, ZnH, PbH, CdH та їх суміш MixH). Оцінювали біохімічні, фізіологічні та нейроповедінкові показники, зокрема маркери оксидативного стресу, апоптозу, енергетичного обміну та ендокринних порушень.

Комплексний аналіз отриманих експериментальних даних та наукових досліджень дозволяє стверджувати, що метали Cu, Zn,

Pb та Cd у діапазоні 0,005–0,1 мг/дм^3 ініціюють каскад мультисистемних порушень у *D. rerio*.

Основними проявами токсичного впливу є:

1. оксидативний стрес як універсальний механізм, що пошкоджує мембрани (зростання рівня перокисного окиснення ліпідів), протеїни (збільшення вмісту окисних модифікацій ротеїнів у групах ZnL, PbH, CdH, MixH) та ДНК (мікроядра, розриви ниток ДНК) [5].

2. апоптотична дегенерація тканин через активацію мітохондріальних змін та лізосомального виходу катепсинів. За умов оксидативного стресу, викликаного металами, відбувається дестабілізація мембран лізосом (CuL, PbH, CdH, MixH), і катепсини вивільняються в цитозоль (CuH, PbH, CdL, MixH). Це вивільнення може виступати як тригер для активації каспаз, формуючи додатковий шлях індукції апоптозу, незалежний від класичних мітохондріальних сигналів. У діапазоні 0,05–0,1 мг/дм^3 зазначені метали здатні порушувати природний баланс катепсинів, що негативно впливає на трофіку ембріонів та призводить до затримки їх вилуплення [6].

3. нейроповедінковий дефіцит – в усіх досіджуваних групах на 2 або 4 тиждень зменшувалася інгібувалася робота ацетилхолінестерази, що призводить до її накопичення в синапсах та надмірної стимуляції рецепторів. Довгостроковим наслідком в таких випадках може бути порушення локомоторної активності, втрата орієнтації, пригнічення реакцій втечі від хижака [7].

4. енергетичне виснаження – виникає внаслідок перерозподілу метаболічних ресурсів на детоксикацію та порушення іонного обміну.

5. ендокринна дизрупція – має довгострокові та трансгенераційні наслідки для репродуктивного потенціалу та розвитку тиреоїдної системи. Зокрема самців даніо на 2-й тиждень експерименту у групах CdL, MixH та на 4-й тиждень у групах ZnL, ZnH, CdL зростав вміст вітелогеніну. Що підвищує ризик зниження фертильності, затримки розвитку гонад та аномалій розвитку потомства [5].

Розглянуті зміни та проаналізовані дані свідчать про те, що навіть за відсутності прямої летальності, забруднення водойм

мікроконцентраціями металів загрожує довгостроковій стабільності популяцій риб та вимагає впровадження більш жорстких біомаркерних систем моніторингу якості водного середовища.

Список літератури

1. Державне агентство водних ресурсів України. Аналітичний огляд стану водних ресурсів у лютому 2023 року. 2023. URL: https://davr.gov.ua/news/analitichnij-oglyad-stanu-vodnih-resursiv-u-lyutomu-2023-roku (дата звернення: 05.05.2026).
2. Сіверсько-Донецьке басейнове управління водних ресурсів. Якісний стан водних об'єктів суббасейну Сіверського Дінця у січні 2025 року. 2025. URL: https://sdbuvr.gov.ua/news/yakisnyy-stan-vodnykh-obyektiv-subbaseynu-siverskoho-dintsya-u-sichni-2025-roku (дата звернення: 05.05.2026).
3. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., Bubalo N. et al. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology.* 2024. Vol. 19, No. 1. Art. 1. DOI: 10.1186/s12995-023-00398-y.
4. Kadim M. K., Risjani Y. Biomarker for monitoring heavy metal pollution in aquatic environment: An overview toward molecular perspectives. *Emerging Contaminants.* 2022. Vol. 8. P. 195–205. DOI: 10.1016/j.emcon.2022.002003.
5. Kwok M. L., Chan K. M. Oxidative stress and apoptotic effects of copper and cadmium in the zebrafish liver cell line ZFL. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2020. Vol. 80. Art. 103451. DOI: 10.1016/j.etap.2020.103451.
6. Liu M., Deng P., Li G., et al. Neurotoxicity of combined exposure to the heavy metals (Pb and As) in zebrafish (*Danio rerio*). *Toxics.* 2024. Vol. 12, No. 4. Art. 282. DOI: 10.3390/toxics120402820
7. Majid S., Smeets K., Vergauwen L., Pilehvar A., Knapen D., Blust R. Insight into the combined toxicity of copper and cadmium in zebrafish (*Danio rerio*) embryos and adults. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2025. Vol. 299. Art. 118368. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2025.118368.