

УДК 597.55:577.115:615.9

DOI <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-4.22>

ВПЛИВ ТОКСИКАНТІВ РІЗНОЇ ХІМІЧНОЇ ПРИРОДИ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСНЕННЯ ЛІПІДІВ В ПЕЧІНЦІ КОРОПА ЛУСКАТОГО

Симонова Наталія Анатоліївна

аспірантка кафедри біології та здоров'я людини

Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка

ORCID ID: 0009-0004-5544-3527

Мехед Ольга Борисівна

доктор педагогічних наук, кандидат біологічних наук, професор,

завідувач кафедри біології та здоров'я людини

Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка

ORCID ID: 0000-0001-9485-9139

Scopus author ID: 6506181994

Researcher ID: AAC-7333-2021

У сучасних умовах інтенсивного розвитку аквакультури та зростаючого антропогенного навантаження на водойми питання екологічної безпеки та якості рибної продукції набуває особливого значення. Одним із найважливіших біохімічних процесів, що відображає стан організму риб під впливом токсикантів, є перекисне окиснення ліпідів (ПОЛ), що тісно пов'язане з функціонуванням антиоксидантної системи та визначає рівень адаптаційних можливостей організму. Актуальність проблеми зумовлена тим, що у водоймах одночасно присутні кілька типів токсикантів, таких як важкі метали, гербіциди та мікотоксини, які можуть посилювати негативний вплив один одного. Метою роботи було дослідження впливу токсикантів різної хімічної природи – мікотоксинів (афлатоксин В1, Т-2 токсин), важких металів (цинк, кадмій), гербіцидів (зенкор, раундап) та поверхнево-активної речовини (натрій лаурилсульфат) – на інтенсивність процесів перекисного окиснення ліпідів та активність антиоксидантної системи в печінці коропа лускатого, а також виявлення біомаркерів для оцінки екологічного стану водних екосистем.

Дослідження проводили на дворічках коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) протягом 14 діб. Риб утримували в 200-літрових акваріумах і розділили на контрольну та експериментальну групи. Досліджувані токсиканти вносили у концентраціях, що відповідали подвійній гранично допустимій концентрації (2 ГДК). Інтенсивність ПОЛ оцінювали за рівнем малонового діальдегіду (МДА) та дієнових кон'югатів (ДК). Активність антиоксидантних ферментів – супероксиддисмутази (СОД), каталази (КАТ) та глутатіонпероксидази (ГП) – вимірювали як показники адаптаційної відповіді організму.

Отримані результати засвідчили, що усі досліджені токсиканти спричинили значний окислювальний стрес в організмі коропа лускатого, про що свідчить достовірне зростання вмісту МДА та ДК в печінці. Найбільш виражений прооксидантний ефект спостерігався за впливу мікотоксинів (афлатоксин В1 та Т-2 токсин), де рівень кінцевих продуктів ПОЛ зростав майже вдвічі порівняно з контрольною групою. Гербіциди та поверхнево-активна речовина також викликали помірне, але статистично значуще зростання показників. У відповідь на підвищений рівень окислювального стресу відбулася компенсаторна активація ферментів антиоксидантного захисту. Активність СОД підвищувалася в середньому на 40–60%, КАТ – на 50–80%, а ГП зростала більш ніж у 1,5 рази порівняно з контролем. Ці дані підтверджують, що печінка є основним органом-мішенню для токсинів, і що афлатоксин В1, навіть у низькій концентрації, чинить виражений токсичний вплив, порушуючи окислювально-відновні процеси. Результати дослідження підкреслюють необхідність розробки ефективних стратегій для мінімізації негативних наслідків забруднення в аквакультурі.

Ключові слова: афлатоксин В1, Т-2 токсин, окислювальний стрес, перекисне окиснення ліпідів, антиоксидантні ферменти, короп лускатий, аквакультура, біохімічні маркери, екологічний моніторинг, біоіндикація.

Symonova N. A., Mekhed O. B. Influence of toxicants of various chemical nature on the intensity of lipid peroxidation in the liver of scaly carp

In modern aquaculture, the intensive use of plant-based ingredients in fish feeds increases the risk of contamination with various toxicants, including mycotoxins. Aflatoxin B1 (AFB1) and T-2 toxin are particularly dangerous as they are potent toxicants known to cause oxidative stress. Oxidative stress, characterized by an imbalance between the generation of reactive oxygen species and the ability of the organism's antioxidant system to detoxify these reactive intermediates, is a crucial indicator of an organism's health. The problem is compounded by the fact that multiple types of toxicants, such as heavy metals (zinc, cadmium), herbicides (zenkor, roundup), and surfactants (sodium lauryl sulfate), are often present simultaneously in water bodies, which can lead to synergistic negative effects. The aim of this study was to investigate the effects of these various toxicants on the intensity of lipid peroxidation (LPO) processes and the activity of the antioxidant system in the liver of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), and to identify biomarkers that can be used to assess the ecological state of aquatic ecosystems.

The 14-day experiment was conducted on two-year-old scaly carp, which were divided into a control group (without added toxicants) and several experimental groups. The toxicants were added to the water at concentrations corresponding to twice the maximum permissible concentration (2 MPC). The intensity of LPO was evaluated by measuring the levels of malondialdehyde (MDA), an end-product, and diene conjugates (DC), an intermediate product. Additionally, the activity of key antioxidant enzymes, including superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and glutathione peroxidase (GP), was measured to assess the fish's adaptive response.

The results showed that all tested toxicants caused significant oxidative stress in the scaly carp, indicated by a statistically significant increase in MDA and DC levels in the liver. The most pronounced pro-oxidant effect was observed from mycotoxins (AFB1 and T-2 toxin), where the level of LPO end products almost doubled compared to the control group. Herbicides and the surfactant also caused a moderate, but statistically significant, increase in these indicators. In response to the elevated oxidative stress, a compensatory activation of the antioxidant defense enzymes was observed. The activity of SOD increased by an average of 40–60%, CAT by 50–80%, and GP by more than 1.5 times compared to the control group. These findings confirm the liver's role as the main target organ for these toxins and demonstrate that AFB1, even at low concentrations, has a pronounced toxic effect that disrupts redox processes. The study's results underscore the need to develop effective strategies to minimize the negative consequences of contamination in aquaculture, such as using feed additive adsorbents.

Key words: aflatoxin B1, T-2 toxin, oxidative stress, lipid peroxidation, antioxidant enzymes, scaly carp, aquaculture, biochemical markers, ecological monitoring, bioindication.

Постановка проблеми та її актуальність.

У сучасних умовах інтенсивного розвитку аквакультури питання екологічної безпеки та якості рибної продукції набуває особливого значення. Одним із найважливіших біохімічних процесів, що відображає стан організму риб під впливом токсикантів, є перекисне окиснення ліпідів (ПОЛ). Цей процес тісно пов'язаний з функціонуванням антиоксидантної системи та визначає рівень адаптаційних можливостей організму [2, с. 37].

Накопичення у водоймах важких металів, залишків гербіцидів, поверхнево-активних речовин і мікотоксинів створює додаткове навантаження на гідробіоти, зокрема на печінку як центральний орган детоксикації [11, с. 179; 12, с. 03].

Риби, зокрема короп лускатий, є зручними модельними об'єктами для оцінки токсичного впливу ксенобіотиків, оскільки вони чутливо реагують на зміни у водному середовищі [23, с. 866]. Біохімічні показники, зокрема рівень малонового діальдегіду (МДА), дієнових кон'югатів (ДК) та активність ферментів антиоксидантного захисту, виступають маркерами оксидативного стресу [3, с. 90]. Порушення рівноваги між процесами ПОЛ та антиоксидантними механізмами може призводити до деструктивних змін у клітинах

печінки, зниження ростових показників і загального ослаблення організму риб [19, с. 101781].

Актуальність проблеми зумовлена тим, що у багатьох водоймах України й світу одночасно присутні кілька типів токсикантів – важкі метали, гербіциди та мікотоксини, що підсилюють негативний вплив один одного [1, с. 10; 15, с. 118]. Їх комплексна дія залишається маловивченою. Саме тому дослідження впливу токсикантів різної хімічної природи на процеси ПОЛ у печінці коропа лускатого має важливе значення для розробки біомаркерів стану довкілля і систем безпечного ведення аквакультури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблемі вивчення процесів перекисного окиснення ліпідів у риб присвячено значну кількість наукових праць. У монографії Н. П. Головача та співавторів докладно розглянуто роль ПОЛ у формуванні клітинних ушкоджень та системи антиоксидантного захисту [2, с. 102–106]. Подібні підходи простежуються у працях І. А. Особи, де описано функціональне значення продуктів ПОЛ у забезпеченні метаболічної рівноваги в організмі риб [3, с. 88–90]. Особливу увагу дослідники приділяють антиоксидантним ферментам – супероксиддисмутазі, каталаті та глутатіонпероксидазі, як

ключовим елементом контролю вільнорадикальних реакцій [4, с. 63].

В останні роки опубліковано низку робіт, присвячених впливу гербіцидів на процеси ПОЛ у коропа лускатого. Дослідження показали, що зенкор і раундап здатні значно підвищувати рівень МДА і дієнових кон'югатів у печінці, що свідчить про розвиток оксидативного стресу [6, с. 172; 7, с. 274]. Аналогічні тенденції простежуються у роботах, де вивчався вплив зенкору на активність супероксиддисмутази [8, с. 163]. У дослідженнях встановлено, що навіть сублетальні концентрації гербіцидів здатні призводити до виражених біохімічних змін [9, с. 72].

Іншим класом небезпечних ксенобіотиків є мікотоксини. У роботах Полотнянко та співавторів доведено, що Т2-токсин накопичується в тканинах риб і призводить до змін у системі антиоксидантного захисту [5, с. 105]. Подібні результати отримали Bashorun та інші, які описали токсичний вплив мікотоксинів на аквакультурні види риб і можливі шляхи їх біологічного контролю [12, с. 02–04]. Окремі дослідження демонструють підвищення токсичності мікотоксинів на фоні змін клімату, що збільшує ризики їхнього накопичення у кормах [13, с. 24329].

Важкі метали, зокрема цинк і кадмій, також мають суттєвий вплив на риб. Встановлено, що вони здатні індукувати процеси ПОЛ, підвищувати рівень МДА та пригнічувати антиоксидантні ферменти [11, с. 179; 23, с. 868]. За даними Symonova та співавт., токсиканти різної хімічної природи проявляють комбіновану дію, що посилює негативні ефекти на клітинному рівні [22, с. 8].

Попри значну кількість робіт, залишається низка не вирішених питань. Зокрема, недостатньо вивчені особливості комбінованого впливу різних груп токсикантів на печінку коропа. Більшість досліджень розглядає дію лише одного класу речовин, тоді як реальні умови середовища передбачають їх одночасну присутність [1, с. 11]. Крім того, малодослідженою є роль ПАР, таких як лаурилсульфат натрію, у розвитку оксидативного стресу у риб. Таким чином, потребують поглибленого вивчення інтегральні біохімічні реакції організму риб за дії токсикантів різної хімічної природи.

Метою роботи є дослідження впливу токсикантів різної хімічної природи – важких металів, гербіцидів, поверхнево-активних речовин і мікотоксинів – на інтенсивність процесів перекисного окиснення ліпідів та активність антиоксидантної системи у печінці коропа лускатого, а також виявлення маркерів, що можуть бути використані для оцінки екологічного стану водних екосистем.

Матеріали та методи. Дослідження проводили на дворічках коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), вирощених в умовах аква-

культури. Експериментальна частина тривала 14 діб у 200-літрових акваріумах. Риб утримували за стандартних рибоводно-біологічних та гідрохімічних норм: рН $7,3 \pm 0,2$, вміст розчиненого кисню $5,5 \pm 0,4$ мг/дм³, температура води відповідала природним умовам для виду. Маса риб становила 200–300 г. Для експерименту було сформовано дві групи по 5 особин у кожній: контрольна група (КГ) – без додавання токсикантів; експериментальна група (ЕГ) – у воду вносили токсичні речовини у концентраціях, що відповідали подвійній гранично допустимій концентрації (2 ПДК). Досліджували вплив афлатоксину В1, Т-2 токсину, важких металів (цинк, кадмій), гербіцидів (зенкор, раундап) та поверхнево-активної речовини (натрій лаурилсульфат). Конкретні концентрації токсикантів узгоджували із сучасними даними щодо ГДК: цинк – 0,1 мг/дм³; кадмій – 0,002 мг/дм³; зенкор (метрибузин) – 0,04 мг/дм³; раундап (гліфосат) – 0,2 мг/дм³; натрій лаурилсульфат – 1,0 мг/дм³; афлатоксин В1 – 1,0 мкг/дм³; Т-2 токсин – 0,5 мкг/дм³) [1; 2; 22]. Після завершення експерименту рибу піддавали евтаназії методом декапітації згідно з етичними принципами поводження з тваринами [25]. Для аналізу відбирали зразки печінки. Інтенсивність процесів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) визначали за рівнем малонового діальдегіду (МДА) як кінцевого продукту та дієнових кон'югатів (ДК) як проміжних продуктів [3; 7]. Активність антиоксидантних ферментів оцінювали за активністю супероксиддисмутази (СОД), каталази (КАТ) та глутатіонпероксидази (ГП) [4; 10]. Додатково визначали активність глутатіонредуктази (ГР), що базувалася на вимірюванні швидкості окислення NADPH спектрофотометрично при довжині хвилі 340 нм. Активність каталази визначали за швидкістю розкладання H₂O₂, а СОД – за методикою, зазначеною в джерелах [4; 10]. Концентрацію білка в гомогенатах тканин встановлювали за методом Лоурі [20]. Статистичний аналіз: Отримані дані обробляли за допомогою програми Statistica 10.0 (StatSoft, США). Для порівняння груп використовували однофакторний дисперсійний аналіз та критерій Стюдента. Відмінності вважали статистично значущими при $p < 0,05$.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У контрольній групі коропа лускатого показники процесів перекисного окиснення ліпідів залишалися на фізіологічному рівні, тоді як у всіх експериментальних групах після дії токсикантів спостерігалось їх достовірне зростання. Встановлено, що вміст малонового діальдегіду зростав у 1,5–2,5 рази залежно від природи токсиканта. Найбільш виражений ефект спостерігався за впливу мікотоксинів, де інтенсивність кінцевих продуктів ПОЛ перевищувала контрольні показники майже вдвічі (таблиця 1).

Таблиця 1

Вміст продуктів ПОЛ у печінці коропа лускатого за дії різних токсикантів

Токсикант	МДА, нмоль/мг білка	ДК, ум. од./мг білка
Контроль	2,1 ± 0,2	0,38 ± 0,03
B1	3,6 ± 0,3*	0,55 ± 0,04*
T2	3,6 ± 0,3*	0,55 ± 0,04*
Зенкор	3,0 ± 0,5	0,45 ± 0,07
Раундап	5,0 ± 0,5*	0,70 ± 0,06*
Цинк	2,8 ± 0,4 (н/д)	0,42 ± 0,05
Кадмій	5,8 ± 0,4*	0,78 ± 0,05*
Лаурилсульфат Na	4,2 ± 0,6*	0,55 ± 0,08

* – – вірогідні відмінності порівняно з контролем, $p < 0,05$.

Кількісні показники дієвих кон'югатів, як проміжних метаболітів, також зростали, що свідчить про активацію вільнорадикальних процесів і порушення мембранної цілісності (табл. 2).

Аналіз антиоксидантної системи показав, що активність супероксиддисмутази підвищувалася в середньому на 40–60% у порівнянні з контролем, що відображає компенсаторну реакцію організму на інтенсивне утворення супероксид-

ного аніону. Каталаза демонструвала збільшення активності на 50–80%, тоді як глутатіонпероксидаза у ряді випадків зростала більш ніж у 1,5 раза. Водночас за тривалої дії окремих токсикантів (зокрема гербіцидів та ПАР) спостерігалися ознаки виснаження ферментативної ланки, що проявлялося у меншому прирості активності порівняно з мікотоксинами чи важкими металами (рис. 1–5).

Таблиця 2

Активність антиоксидантних ферментів у печінці коропа лускатого за дії різних токсикантів

Токсикант	СОД, Од/мг білка	КАТ, ммоль H_2O_2 /хв·мг білка	ГП, нмоль/хв·мг білка
Контроль	2,7 ± 0,2	1,6 ± 0,1	46,0 ± 4,2
B1	4,5 ± 0,4*	2,6 ± 0,2*	68,0 ± 5,0*
T2	4,3 ± 0,3*	2,5 ± 0,2*	69,3 ± 6,1*
Зенкор	3,2 ± 0,6	2,0 ± 0,3	55,0 ± 7,0
Раундап	5,2 ± 0,4*	2,9 ± 0,2*	75,0 ± 6,3*
Цинк	3,1 ± 0,5	1,9 ± 0,3	52,0 ± 6,5
Кадмій	5,5 ± 0,4*	3,1 ± 0,3*	80,0 ± 6,5*
Лаурилсульфат Na	4,0 ± 0,5*	2,3 ± 0,4	66,0 ± 8,0*

* – – вірогідні відмінності порівняно з контролем, $p < 0,05$.

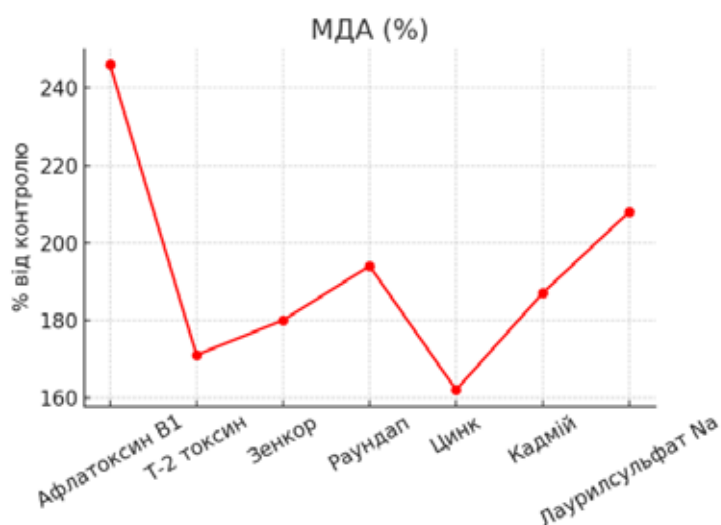


Рис. 1. Вплив токсикантів на вміст МДА в печінці коропа лускатого, % від контролю

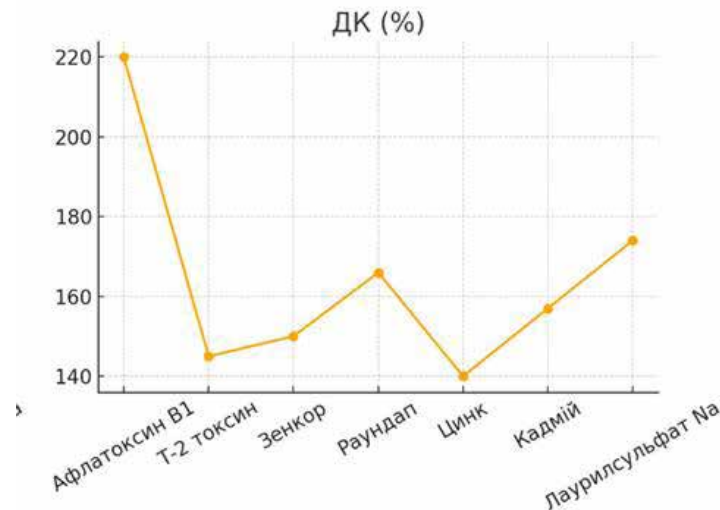


Рис. 2. Вплив токсикантів на вміст ДА в печінці коропа лускатого, % від контролю

На графіку видно, що всі токсиканти викликали суттєве підвищення рівня малонового діальдегіду порівняно з контролем. Найбільший приріст відзначався за дії афлатоксину В1 та Т2-токсину, що вказує на потужну прооксидантну дію мікотоксинів. Гербіциди (зенкор, раундап) спричинили менш виражене зростання, проте перевищували контрольні значення у 1,5–2 рази. Важкі метали (цинк, кадмій) також стимулювали процеси ПОЛ, з дещо сильнішим ефектом у кадмій. ПАР (натрій лаурилсульфат) займав проміжне положення, демонструючи помірний, але статистично значущий ефект. Таким чином, кількісні зміни вмісту МДА підтверджують універсальність механізму оксидативного стресу за різних типів ксенобіотиків.

Утворення дієнових кон'югатів як первинних продуктів ПОЛ значно зросло під впливом усіх

досліджених токсикантів. Найбільше підвищення відмічалось за дії мікотоксинів, що свідчить про швидке включення реакцій вільнорадикального окиснення у відповідь на їх токсичний вплив. Гербіциди й ПАР викликали помірне, але стійке зростання, що корелює з рівнем МДА. Цинк мав менш виражений ефект, тоді як кадмій призводив до різкого накопичення ДК. Виявлені тенденції вказують, що продукти первинного окиснення є чутливими маркерами токсичного стресу в печінці риб.

Супероксиддисмутаза реагувала на дію токсикантів компенсаторним підвищенням активності. Найбільш виражене зростання відзначалось під впливом мікотоксинів, які стимулювали утворення активних форм кисню. Гербіциди та ПАР викликали середній рівень підвищення, що свідчить про активізацію антиоксидантної системи як адаптаційної відповіді. Цинк сприяв помірній

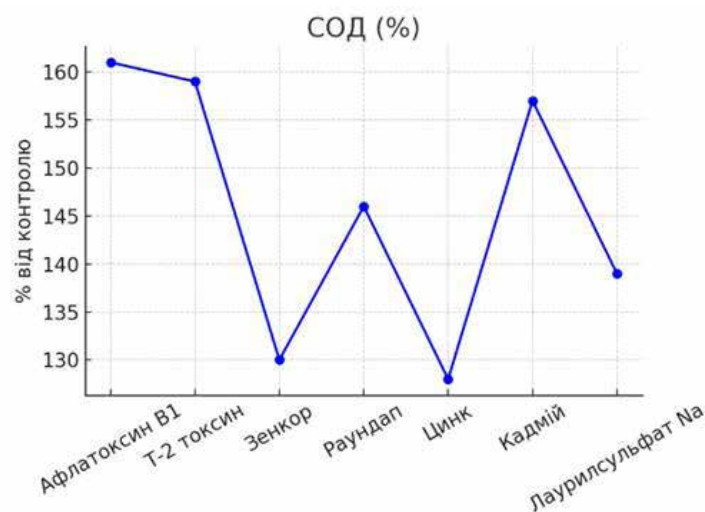


Рис. 3. Вплив токсикантів на зміни активності СОД в печінці коропа лускатого, % від контролю

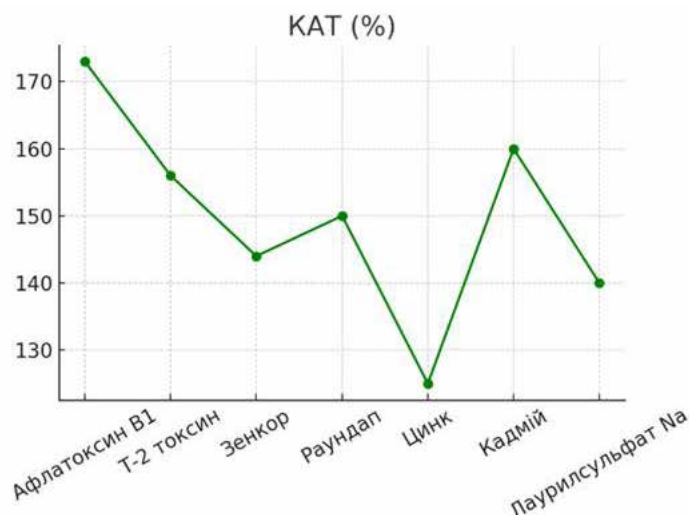


Рис. 4. Вплив токсикантів на зміни активності КАТ в печінці коропа лускатого, % від контролю

активації ферменту, тоді як кадмій демонстрував значніший стимулюючий ефект. Таким чином, СОД є ключовим елементом антиоксидантного захисту у відповідь на різні групи токсикантів.

Активність каталази підвищувалася в усіх досліджених групах, проте ступінь змін варіював залежно від природи токсиканта. Найбільший ефект спостерігався за дії Т2-токсину та афлатоксину В1, які викликали майже дворазове зростання активності ферменту. Гербіциди та ПАР також стимулювали каталазу, але менш інтенсивно. Цинк мав помірний вплив, тоді як кадмій показував більш значні відхилення від контролю. Це вказує на те, що каталаза є другим рівнем антиоксидантного захисту, який реагує на підвищене утворення перекису водню.

Глутатіонпероксидаза виявилася найбільш чутливим ферментом до дії токсикантів. У всіх експериментальних групах її активність зрос-

тала на 40–70% порівняно з контролем. Найвищі показники відзначалися при впливі мікотоксинів, що підтверджує їх здатність викликати інтенсивний оксидативний стрес. Гербіциди й ПАР демонстрували середній рівень активації, тоді як важкі метали спричинили різноспрямований ефект: цинк діяв слабше, а кадмій – значно сильніше. Ці результати свідчать про важливу роль ГП у нейтралізації органічних гідропероксидів та підтриманні клітинного гомеостазу.

Порівняльний аналіз різних груп токсикантів виявив відмінності у механізмах їх дії. Так, мікотоксини (афлатоксин В1 і Т-2) спричиняли найбільш різке посилення ПОЛ, тоді як важкі метали (цинк, кадмій) впливали переважно на активність антиоксидантних ферментів, стимулюючи їх роботу майже удвічі відносно контролю. Гербіциди та поверхнево-активні речовини викликали менш виражені зміни, проте характеризувалися

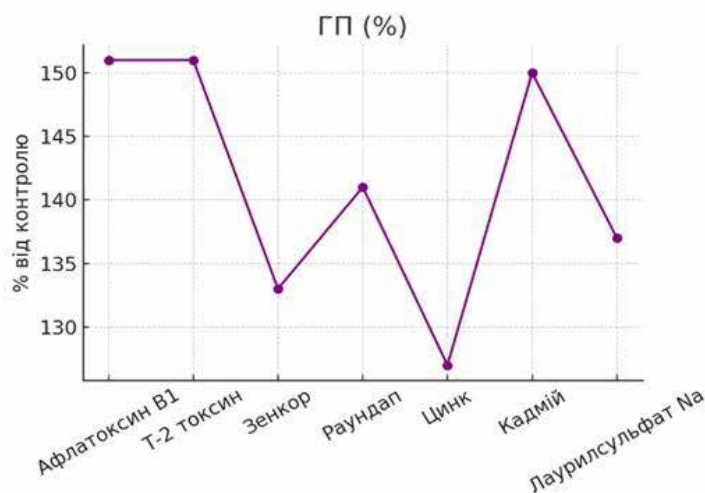


Рис. 5. Вплив токсикантів на зміни активності ГП в печінці коропа лускатого, % від контролю

кумулятивним ефектом, який проявлявся поступовим зростанням оксидативного стресу протягом експерименту.

У сучасних умовах інтенсивного розвитку аквакультури, використання рослинних інгредієнтів у кормах для риб значно підвищує ризик їх забруднення мікотоксинами [21]. Ці сполуки, зокрема афлатоксин В1, є потужними токсикантами, які здатні спричинити окислювальний стрес в організмі риб [17]. Дослідження підтвердило, що афлатоксин В1 викликав значний окислювальний стрес у коропа. У всіх досліджених тканинах експериментальної групи було зафіксовано статистично значуще підвищення рівня кінцевих продуктів перекисного окиснення ліпідів – малонового діальдегіду та проміжних продуктів – дієнових кон'югатів. Найбільш виражені зміни спостерігалися в печінці, що підтверджує її роль як основного органу-мішені для цього токсину. Крім того, огляд досліджень підтверджує поширеність мікотоксинів у кормах і сировині для риб у Європі, а також можливі шляхи їх біологічного контролю [17]. Масштабний аналіз виявив, що в готових кормах і кукурудзі часто співіснують регульовані, замасковані та нові мікотоксини, що підкреслює складність проблеми [18].

У відповідь на підвищений рівень окислювального стресу в організмі риб відбулася компенсаторна активація ферментів антиоксидантного захисту, таких як супероксиддисмутаза, каталаза та глутатіонпероксидаза. Це вказує на те, що навіть у низькій концентрації афлатоксин В1 чинить виражений токсичний вплив, порушуючи окислювально-відновні процеси. Окрім впливу окремих токсикантів, важливе значення має дослідження

природних процесів самоочищення водойм в умовах зростаючого антропогенного навантаження [16]. Зважаючи на це, результати нашого дослідження є важливим підтвердженням необхідності розробки та впровадження ефективних стратегій для мінімізації негативних наслідків афлатоксикозу в аквакультурі. Дослідження показали, що використання адсорбентів мікотоксинів у кормах може бути ефективною стратегією для зменшення їхнього забруднення [24].

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що різні токсиканти хімічної природи по-різному модифікують інтенсивність процесів ПОЛ та функціонування антиоксидантної системи в печінці коропа лускатого. Встановлені зміни свідчать про формування стану оксидативного стресу, який може призводити до порушень метаболізму та зниження резистентності організму риб у природних умовах.

Висновки. Усі досліджені токсиканти, включаючи афлатоксин В1, спричинили значний окислювальний стрес в організмі коропа лускатого. Найбільш виражений токсичний ефект спостерігався від мікотоксинів, які призводили до значного зростання рівня продуктів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) у печінці. У відповідь на цей стрес відбулася компенсаторна активація антиоксидантних ферментів, що свідчить про адаптаційну реакцію організму риб. Отримані результати вказують на печінку як на основний орган-мішень для токсинів. Ці дані підтверджують необхідність розробки ефективних стратегій для мінімізації негативних наслідків забруднення в аквакультурі, що може включати використання кормових добавок-адсорбентів.

Література:

1. Апецько А. М., Симонова Н. А., Мехед О. Б. Зміни біохімічних показників в органах та тканинах коропа лускатого *Cyprinus carpio* L. за дії гербіцидів в поєднанні із солями цинку. *Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології*. Харків. Харків : Факт, 2021. С. 9–13.
2. Головчак Н. П., Тарновська А. В., Коцюмбас Г. І., Санагуський Д. І. Процеси перекисного окиснення ліпідів у живих організмах : монографія. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 252 с.
3. Особа І. А. Біологічна роль перекисного окиснення ліпідів у забезпеченні функціонування організму риб. *Рибогосподарська наука України*. 2013. № 1. С. 87–96. URL: <http://www.fishukr.org.ua>
4. Особа І. А., Грициняк І. І. Активність неферментативної ланки системи антиоксидантного захисту у печінці однорічок лускатих та рамчастих коропів несвицького зонального типу. *Рибогосподарська наука України*. 2010. № 3. С. 62–65. URL: <http://www.fishukr.org.ua>
5. Полотнянко Л., Мехед О. Накопичення мікотоксинів у м'язах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) при згодовуванні корму, контамінованого Т2-токсиком. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернівці : Десна-Поліграф. 2023. С. 105–106
6. Симонова Н. А., Мехед О. Б. Вплив гербіцидів на показники перекисного окиснення ліпідів в тканинах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.). *Біологічні дослідження – 2021*. Житомир: ПП «Євро-Волинь», 2021. С. 171–174.
7. Симонова Н. А., Мехед О. Б. Стан процесів перекисного окиснення ліпідів за впливу гербіцидів зенкор, раундап та 2,4 Д на коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.). *Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути*. Дніпро, 2021. Т. 2, С. 273–276.
8. Симонова Н. А., Павлюк А. В., Мехед О. Б. Вплив зенкору на активність ферменту супероксиддисмутази в тканинах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.). *Збереження біологічного, ландшафтного різноманіття та історико-культурної спадщини в контексті збалансованого розвитку*. Чернівці: Десна Поліграф, 2021. С. 162–164.

9. Симонова Н. А., Полотнянко Л. В., Мехед О. Б. Зміни вмісту продуктів перекисного окиснення ліпідів в тканинах та органах коропа лускатого за дії полютантів. *Актуальні проблеми сучасної біохімії, клітинної біології та фізіології*. Дніпро: Ліра, 2022. С. 71–73.
10. Симонова Н., Мехед О. Дослідження продуктів перекисного окиснення ліпідів та антиоксидантної системи організму коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.) за дії ксенобіотиків. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернівці, Україна, С. 71.
11. Ali M. M., Rahman S., Islam M. S., Rakib M. R. J. Hossen S., Rahman M. Z., Kormoker T., Idris A. M., Phoungthong K. Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: A probabilistic risk assessment. *International Journal of Sediment Research*, 2022. 37 (2), 173–187.
12. Bashorun A., Hassan Z. U., Al-Yafei M. A., Jaoua S. Fungal contamination and mycotoxins in aquafeed and tissues of aquaculture fishes and their biological control. *Aquaculture*, 2023. 576, 01–08. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739892>
13. Battilani P., Toscano P., van der Fels-Klerx H. J., Moretti A., Leggieri Camardo M., Brera C., et al.. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Sci. Rep.* 2013. 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
14. Fornari D.C., Peixoto S., Ksepka S.P., Bullard S.A., Rossi W., Nuzback D.E., Davis D.A. Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*. 2023. T. 4. C. 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>
15. Gruber-Dorninger C., Müller A., Rosen R. Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*. 2025. T. 17. № 3. C. 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>
16. Hnativ R., Cherniuk V., Khirivskyi P., Kachmar N., Lopotych N., Hnativ I. Processes of Natural Self-Cleaning of Small Watercourses with Increasing Anthropogenic Load in the Dniester River Basin. *Journal of Ecological Engineering*, 2023. 24 (2), 12–18.
17. Koletsy P., Schrama J.W., Graat E.A.M., Wiegertjes G.F., Lyons P., Pietsch C. The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species – A Review. *Toxins*. 2021. T. 13. № 6. C. 403. <https://doi.org/10.3390/toxins13060403>
18. Kovalsky P.; Kos G.; Nährer K.; Schwab C.; Jenkins T.; Schatzmayr G.; Sulyok M.; Krska R. Co-occurrence of regulated, masked and emerging mycotoxins and secondary metabolites in finished feed and maize—an extensive survey. *Toxins* 2016, 8, 363.
19. Liu H., Xie R., Huang W., Yang Y., Zhou M., Lu B., Li B., Tan B., Dong X. Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* *Epinephelus lanceolatus* ♂). *Aquaculture Reports*. 2023. T. 33. C. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779>
20. Lowry O., Rosebrough N., Farr A., Randall R.. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 1951. 193, 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)
21. Phudkliang J., Soonthornchai W., Maele L.V., Xu H., Qi Z., Lee P.-T., Chantiratikul A., Wangkahart E. Studies on the use of mycotoxin binders as an effective strategy to mitigate mycotoxin contamination in aquafeed: A case study in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Reports*. 2025. T. 43. C. 102984. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102984>
22. Symonova N. A., Mekhed O. B., Kupchuk O. Y., Tretyak O. P. Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2018. 8(4), 6–10.
23. Vajargah M. F. A review on the effects of heavy metals on aquatic animals. *J Biomed Res Environ Sci*, 2021. 2 (9), 865–869.
24. Vajargah M. F., Namin J. I., Mohsenpour, R., et al. Histological effects of sublethal concentrations of insecticide Lindane on intestinal tissue of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Vet Res Commun*, 2021. 45 (4), 373–380.
25. World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 2013. 310(20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

References:

1. Apetsko, A. M., Symonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2021). Zminy biokhimichnykh pokaznykiv v orhanakh ta tkanynakh koropa lushatoho *Cyprinus carpio* L. za dii herbistydiv v poiednanni iz soliamy tsynku [Changes in biochemical parameters in the organs and tissues of scaly carp *Cyprinus carpio* L. under the influence of herbicides in combination with zinc salts]. *Suchasni problemy teoretychnoi i praktychnoi ikhtiologii*, 9–13. [in Ukrainian]
2. Holovchak, N. P., Tarnovska, A. V., Kotsiumbas, H. I., & Sanahuskyi, D. I. (2012). *Protsesy perekysnoho okysnennia lipidiv u zhyvykh orhanizmach* [Processes of lipid peroxidation in living organisms] (monograph). LNU imeni Ivana Franka. [in Ukrainian]
3. Osoba, I. A. (2013). Biolohichna rol perekysnoho okysnennia lipidiv u zabezpechenni funktsionuvannia orhanizmu ryb [Biological role of lipid peroxidation in ensuring the functioning of the fish body]. *Rybospodarska nauka Ukrainy*, 1, 87–96. Retrieved from <http://www.fishukr.org.ua> [in Ukrainian]
4. Osoba, I. A., & Hrytsyniak, I. I. (2010). Aktyvnist nefermentatyvnoi lanky systemy antyoksydantnoho zakhystu u pechintsi odnorichok luskatykh ta ramchastykh koropiv nesvytskoho zonalnoho typu [The activity of the non-enzyme...

- matic link of the antioxidant defense system in the liver of one-year-old scaly and frame carps of the Nesvitsia zonal type]. *Rybospodarska nauka Ukrainy*, 3, 62–65. Retrieved from <http://www.fishukr.org.ua> [in Ukrainian]
5. Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Nakopychennia mikotoksyniv u m'iazakh koropa lushatoho (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) pry zhodovuvanni kormu, kontaminovanoho T2-toksynom [Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed T2-toxin-contaminated feed]. *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu*, 105–106. [in Ukrainian]
 6. Symonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2021). Vplyv herbitsydiv na pokaznyky perekysnoho okysnennia lipidiv v tkanyakh koropa lushatoho (*Cyprinus carpio* L.) [Influence of herbicides on the indicators of lipid peroxidation in the tissues of scaly carp (*Cyprinus carpio* L.)]. *Biologichni doslidzhennia – 2021*, 171–174. [in Ukrainian]
 7. Symonova, N. A., & Mekhed, O. B. (2021). Stan protsesiv perekysnoho okysnennia lipidiv za vplyvu herbitsydiv zenkor, raundap ta 2,4 D na koropa lushatoho (*Cyprinus carpio* L.) [The state of lipid peroxidation processes under the influence of the herbicides Zenkor, Roundup and 2,4 D on scaly carp (*Cyprinus carpio* L.)]. *Intehratsiia osvity, nauky ta biznesu v suchasnomu seredovyschi: zymovi dysputy*, 2, 273–276. [in Ukrainian]
 8. Symonova, N. A., Pavliuk, A. V., & Mekhed, O. B. (2021). Vplyv zenkoru na aktyvnist fermentu superoksyddysmutaza v tkanyakh koropa lushatoho (*Cyprinus carpio* L.) [The effect of zenkor on the activity of the enzyme superoxide dismutase in the tissues of scaly carp (*Cyprinus carpio* L.)]. *Zbrezhennia biologichnoho, landshaftnoho riznomannittia ta istoriko-kulturnoi spadshchyny v konteksti zbalansovanoho rozvytku*, 162–164. [in Ukrainian]
 9. Symonova, N. A., Polotnianko, L. V., & Mekhed, O. B. (2022). Zminy vmistu produktiv perekysnoho okysnennia lipidiv v tkanyakh ta orhanakh koropa lushatoho za dii poliutaniiv [Changes in the content of lipid peroxidation products in the tissues and organs of scaly carp under the influence of pollutants]. *Aktualni problemy suchasnoi biokhimii, klitynoi biologii ta fiziologii*, 71–73. [in Ukrainian]
 10. Symonova, N., & Mekhed, O. (2023). Doslidzhennia produktiv perekysnoho okyslennia lipidiv ta antyoksydantnoi systemy orhanizmu koropa lushatoho (*Cyprinus carpio* L.) za dii ksenobiotykyiv [Investigation of lipid peroxidation products and the antioxidant system of the body of scaly carp (*Cyprinus carpio* L.) under the influence of xenobiotics]. *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu*, 71. [in Ukrainian]
 11. Ali, M. M., Rahman, S., Islam, M. S., Rakib, M. R. J., Hossen, S., Rahman, M. Z., Kormoker, T., Idris, A. M., & Phoungthong, K. (2022). Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: A probabilistic risk assessment. *International Journal of Sediment Research*, 37(2), 173–187.
 12. Bashorun, A., Hassan, Z. U., Al-Yafei, M. A., & Jaoua, S. (2023). Fungal contamination and mycotoxins in aquafeed and tissues of aquaculture fishes and their biological control. *Aquaculture*, 576, 01–08. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739892>
 13. Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H. J., Moretti, A., Leggieri Camardo, M., Brera, C., et al. (2013). Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Sci. Rep.*, 6, 24328. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
 14. Fornari, D. C., Peixoto, S., Ksepka, S. P., Bullard, S. A., Rossi, W., Nuzback, D. E., & Davis, D. A. (2023). Effects of dietary mycotoxins and mycotoxin adsorbent additives on production performance, hematological parameters, and liver histology in juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Frontiers in Animal Science*, 4, 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722>
 15. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., & Rosen, R. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*, 17(3), 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>
 16. Hnativ, R., Cherniuk, V., Khirivskiy, P., Kachmar, N., Lopotykh, N., & Hnativ, I. (2023). Processes of Natural Self-Cleaning of Small Watercourses with Increasing Anthropogenic Load in the Dniester River Basin. *Journal of Ecological Engineering*, 24(2), 12–18.
 17. Koletsy, P., Schrama, J. W., Graat, E. A. M., Wiegertjes, G. F., Lyons, P., & Pietsch, C. (2021). The Occurrence of Mycotoxins in Raw Materials and Fish Feeds in Europe and the Potential Effects of Deoxynivalenol (DON) on the Health and Growth of Farmed Fish Species—A Review. *Toxins*, 13(6), 403. <https://doi.org/10.3390/toxins13060403>
 18. Kovalsky, P., Kos, G., Nährer, K., Schwab, C., Jenkins, T., Schatzmayr, G., Sulyok, M., & Krska, R. (2016). Co-occurrence of regulated, masked and emerging mycotoxins and secondary metabolites in finished feed and maize—an extensive survey. *Toxins*, 8, 363.
 19. Liu, H., Xie, R., Huang, W., Yang, Y., Zhou, M., Lu, B., Li, B., Tan, B., & Dong, X. (2023). Negative effects of aflatoxin B1 (AFB1) in the diet on growth performance, protein and lipid metabolism, and liver health of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* Epinephelus lanceolatus♂). *Aquaculture Reports*, 33, 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779>
 20. Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A., & Randall, R. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, 193, 265–275. [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)52451-6/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)52451-6/pdf)
 21. Phudkliang, J., Soonthornchai, W., Maele, L. V., Xu, H., Qi, Z., Lee, P.-T., Chantiratikul, A., & Wangkahart, E. (2025). Studies on the use of mycotoxin binders as an effective strategy to mitigate mycotoxin contamination in aquafeed: A case study in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Reports*, 43, 102984. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102984>
 22. Symonova, N. A., Mekhed, O. B., Kupchyk, O. Y., & Tretyak, O. P. (2018). Toxicants in the degradation of lipids in the organism of scaly carp. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(4), 6–10.
 23. Vajargah, M. F. (2021). A review on the effects of heavy metals on aquatic animals. *J Biomed Res Environ Sci*, 2(9), 865–869.

24. Vajargah, M. F., Namin, J. I., & Mohsenpour, R., et al. (2021). Histological effects of sublethal concentrations of insecticide Lindane on intestinal tissue of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Vet Res Commun*, 45(4), 373–380.
25. World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*, 310(20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

Стаття надійшла: 12.08.2025

Прийнято: 08.09.2025

Опубліковано: 27.10.2025