

## МОДУЛЯЦІЯ ЛІПІДНОГО ОБМІНУ ТА ПРОЦЕСІВ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСНЕННЯ В ТКАНИНАХ КОРОПА ЛУСКАТОГО ЗА ДІЇ КСЕНОБІОТИКІВ І ВТОРИННИХ МЕТАБОЛІТІВ МІКРОМІЦЕТІВ

**Лукаш Олександр Васильович**

доктор біологічних наук, професор

Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка, м. Чернігів, Україна

ORCID ID: 0000-0003-2702-6430

lukash2011@ukr.net

**Ткачук Наталія Василівна**

кандидат біологічних наук, доцент

Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка, м. Чернігів, Україна

ORCID ID: 0000-0002-5115-7716

natalia.smykun@gmail.com

**Янченко Віктор Олексійович**

кандидат фармацевтичних наук, доцент

Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка, м. Чернігів, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6727-4124

v.o.yanchenko@gmail.com

*Забруднення водних екосистем ксенобіотиками різної природи є актуальною екологічною проблемою, що впливає на фізіологічний стан гідробіонтів та безпеку продукції аквакультури.*

*Метою дослідження було вивчення впливу ксенобіотиків різної природи – афлатоксину, солі міді та натрій лаурилсульфату у концентрації 2 ГДК – на ліпідний обмін та процеси перекисного окиснення ліпідів у тканинах коропа (*Syrpinus carpio* L.). Експеримент проведено на дворічках коропа, вирощених у контрольованих умовах, із використанням стандартних методів оцінки загальних ліпідів, їх фракційного складу (тригліцериди, фосфоліпіди, холестерин), а також визначення кінцевих і проміжних продуктів ПОЛ – малонового діальдегіду та дієнових кон'югатів. Для оцінки стану антиоксидантного захисту визначали активність ферментів супероксиддисмутази, каталази та глутатіонпероксидази, а також ліпази як маркеру метаболічної мобілізації енергетичних ресурсів.*

*Результати показали, що дія всіх досліджуваних токсикантів спричиняє достовірні порушення ліпідного обміну та активацію процесів перекисного окиснення ліпідів, причому найбільш виражені зміни спостерігалися у печінці. Афлатоксин проявив найвищу токсичну активність, забезпечуючи значне підвищення рівня малонового діальдегіду та зниження активності антиоксидантних ферментів. Вплив солі міді призводив до інтенсивної генерації вільних радикалів, а натрій лаурилсульфат викликав помірні зміни ліпідного профілю та ферментативної активності. У скелетних м'язах зміни були менш виражені, що підтверджує центральну роль печінки у процесах детоксикації.*

*Отримані дані свідчать про універсальний механізм токсичної дії ксенобіотиків, що реалізується через порушення ліпідного обміну та активацію вільнорадикальних процесів, а також про необхідність контролю контамінації кормів і водних екосистем для забезпечення фізіологічної стабільності гідробіонтів та безпечності продукції аквакультури. Результати дослідження можуть бути використані для розробки біохімічних маркерів токсичного стресу у риб та оцінки екологічної безпеки водних середовищ.*

**Ключові слова:** ксенобіотики, короп, риби, вторинні метаболіти мікроміцетів, афлатоксин, ліпідний обмін, перекисне окиснення ліпідів, оксидативний стрес, політанни, загальні ліпіди, ліпаза, фосфоліпіди

DOI <https://doi.org/10.32782/agrobio.2026.1.12>

**Вступ.** Інтенсифікація аквакультури в умовах глобальних кліматичних змін і зростання антропогенного навантаження супроводжується підвищеним ризиком контамінації водного середовища та кормів різноманітними ксенобіотиками. До найнебезпечніших чинників належать мікотоксини – вторинні метаболіти мікроміцетів, які часто виявляються в сировині та комбікормах для риб (Koletsy et al., 2021; Gruber-Dorninger et al., 2025).

Глобальні моніторингові дослідження свідчать про поширене співіснування регламентованих і нових мікотоксинів у кормах, що створює ризик їх накопичення в організмі гідробіонтів (Kovalsky et al., 2016; Bashorun et

al., 2023). Особливу небезпеку становлять трихотеценові мікотоксини, зокрема Т-2 токсин, який характеризується високою цитотоксичністю, імунодепресивною та гепатотоксичною дією (Błajet-Kosicka et al., 2024; Zhang et al., 2019). Показано, що дія токсикантів різної природи супроводжується змінами показників енергетичного обміну, зокрема вмісту кетокислот в організмі коропа, що відображає глибину метаболічної перебудови за умов стресу (Koval et al., 2009).

Потрапляючи в організм риб із кормом або водою, ксенобіотики здатні порушувати ключові ланки метаболізму, зокрема процеси енергозабезпечення та ліпідного

обміну. Ліпіди виконують не лише структурну функцію як компоненти клітинних мембран, але й є важливими субстратами енергетичного обміну та сигнальними молекулами, що забезпечують адаптацію до змін середовища (Martseniuk, 2019; Martseniuk et al., 2018). Порушення ліпідного профілю може свідчити про глибокі метаболічні зрушення та зниження адаптаційного потенціалу риб.

Одним із ключових механізмів токсичної дії ксенобіотиків є активація процесів вільнорадикального окиснення, зокрема перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ). Надмірне утворення активних форм кисню призводить до пошкодження мембранних структур, зміни проникності клітин, інактивації ферментів та порушення функціонування мітохондрій (Khomenchuk et al., 2018; Zhu et al., 2017). Дослідження свідчать, що дія токсикантів різної природи – важких металів, пестицидів, поверхнево-активних речовин – супроводжується інтенсифікацією ПОЛ і змінами складу тканин риб (Mekhed, 2005; Mekhed & Yakovenko, 2010; Yachna et al., 2019; Filonenko & Mekhed, 2025).

В умовах впливу мікотоксинів також відзначаються порушення росту, гематологічних і біохімічних показників, морфофункціонального стану печінки та м'язової тканини риб (Fornari et al., 2023; Liu et al., 2023; Polotnianko & Mekhed, 2024). Накопичення Т-2 токсину в тканинах коропа (*Cyprinus carpio* L.) супроводжується змінами іхтіологічних та адаптивних показників, що свідчить про системний характер токсичного впливу (Polotnianko & Mekhed, 2023; Zhelay et al., 2023a). Встановлено, що мікотоксини здатні викликати комплексні біохімічні зміни у гідробіонтів, включаючи порушення ферментативної активності та окисдантно-антиоксидантного балансу (Mekhed, 2024).

Попри значну кількість робіт, присвячених окремим аспектам токсичності мікотоксинів, питання комплексної оцінки їх впливу на ліпідний обмін і процеси перекисного окиснення в тканинах риб потребує подальшого поглибленого дослідження. Інтегральний підхід до оцінки токсичного ураження біологічних систем дозволяє розглядати зміни біохімічних показників як маркери адаптаційних або дезадаптаційних реакцій організму (Hrubinko, 2005). Біохімічні порушення в організмі риб мають важливе значення не лише для їх фізіологічного стану, але й для гігієнічної оцінки та експертизи рибної продукції (Yatsenko et al., 2017).

Таким чином, дослідження модуляції ліпідного обміну та процесів перекисного окиснення в тканинах риб за дії ксенобіотиків і вторинних метаболітів мікроміцетів є актуальним як з позицій фундаментальної біохімії адаптації гідробіонтів, так і з точки зору безпечності продукції аквакультури та екологічного моніторингу водних екосистем.

Метою роботи було дослідити особливості модуляції ліпідного обміну та інтенсивності процесів перекисного окиснення ліпідів у тканинах коропа (*Cyprinus carpio* L.) за дії ксенобіотиків різної хімічної природи – афлатоксину, солі міді та поверхнево-активної речовини (натрій лаурилсульфату) у концентрації 2 ГДК, а також оцінити стан антиоксидантної системи організму риб в умовах токсичного навантаження.

**Матеріали і методи досліджень.** Експериментальні дослідження проводили на дворічках коропа (*Cyprinus carpio* L.), вирощених у ВАТ «Чернігіврибгосп» у 2023–2025 рр. Умови утримання відповідали рибоводно-біологічним та гідрохімічним нормативам. Риб утримували в 200-літрових акваріумах за стабільних показників водного середовища: рН –  $7,30 \pm 0,27$ ; вміст розчиненого кисню –  $5,6 \pm 0,4$  мг/дм<sup>3</sup>; температурний режим відповідав природним сезонним умовам. Маса особин становила 200–300 г.

Для моделювання токсичного впливу використовували ксенобіотики різної природи: афлатоксин, сіль міді (Cu<sup>2+</sup>) та поверхнево-активну речовину – натрій лаурилсульфат. Концентрація кожного токсиканта у воді становила 2 гранично допустимі концентрації (2 ГДК) відповідно до чинних нормативів. Концентрації токсикантів визначали з урахуванням чинних нормативних документів та методичних рекомендацій щодо контролю ксенобіотиків у довкіллі (National Agrarian University of Ukraine, 2004).

Було сформовано чотири групи риб (по 5 особин у кожній): контрольну (без внесення токсикантів); дослідну I (вплив афлатоксину); дослідну II (вплив солі міді); дослідну III (вплив натрій лаурилсульфату). Експозиція тривала 14 діб. Усі групи утримували за однакових умов із щоденним контролем гідрохімічних показників.

Після завершення експерименту риб піддавали евтаназії методом декапітації з дотриманням етичних норм поводження з лабораторними тваринами. Для біохімічного аналізу відбирали тканини печінки та скелетних м'язів.

Вміст загальних ліпідів визначали екстракційно-ваговим методом. Фракційний склад ліпідів (фосфоліпіди, тригліцериди, холестерин) аналізували методом тонкошарової хроматографії.

Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) оцінювали за рівнем малонового діальдегіду (МДА) – кінцевого продукту ПОЛ, визначеного за реакцією з тіобарбітуровою кислотою, а також за вмістом дієнових кон'югатів як проміжних продуктів окиснення (Khomenchuk et al., 2018).

Стан антиоксидантної системи оцінювали за активністю супероксиддисмутази (СОД), каталази (КАТ), глутатіонпероксидази (ГП) та глутатіонредуктази, які визначали спектрофотометричними методами. Активність ліпази визначали спектрофотометрично. Вміст загального білка в гомогенатах тканин встановлювали методом Лоурі для подальшого розрахунку питомої активності ферментів. Дослідження виконано з дотриманням принципів біоетики, академічної доброчесності та прозорості експериментальної роботи відповідно до сучасних вимог біомедичних досліджень (Lukash et al., 2025).

Статистичну обробку результатів проводили з використанням програми Statistica 10.0 (StatSoft, США). Достовірність відмінностей між контрольною та дослідними групами визначали методом однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з використанням критерію Стьюдента. Різницю вважали статистично значущою при  $p < 0,05$ .

**Результати.** З метою оцінки біохімічних механізмів токсичної дії ксенобіотиків різної природи було проаналізовано показники ліпідного обміну та інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у тканинах печінки та скелетних м'язів коропа (*Cyprinus carpio* L.) за впливу афлатоксину, солі міді та натрій лаурилсульфату у концентрації 2 ГДК.

Оцінювали вміст загальних ліпідів, їх фракційний склад (тригліцериди, фосфоліпіди, холестерин), рівень кінцевих та проміжних продуктів ПОЛ (МДА, дієнові кон'югати), а також активність ключових ферментів антиоксидантної системи та ліпази. Отримані результати наведені в таблицях 1 та 2.

Аналіз показників печінки свідчить про достовірну перебудову ліпідного спектра за дії всіх досліджуваних токсикантів. Найбільш виражені зміни зафіксовано при впливі афлатоксину: вміст загальних ліпідів зростав на тлі збільшення частки тригліцеридів та зниження фосфоліпідів. Така динаміка може вказувати на порушення мембранної стабільності та розвиток дистрофічних змін у гепатоцитах.

Підвищення концентрації малонового діальдегіду та дієнових кон'югатів у печінці свідчить про активацію процесів вільнорадикального окиснення. Особливо виражений оксидативний ефект спостерігався за дії іонів міді, що може бути пов'язано з їх участю у реакціях утворення активних форм кисню.

Одночасне зниження активності супероксиддисмутази, каталази та глутатіонпероксидази вказує на виснаження ферментативної ланки антиоксидантного захисту. Підвищення активності ліпази, ймовірно, має компенсаторний характер та відображає мобілізацію енергетичних ресурсів у відповідь на токсичний стрес.

У скелетних м'язах спостерігалися аналогічні, проте менш інтенсивні зміни. Зростання рівня ПОЛ і зниження активності антиоксидантних ферментів свідчить про системний характер токсичного впливу. Водночас менша амплітуда змін порівняно з печінкою підтверджує її провідну роль у детоксикаційних процесах. Зміни активності ферментативних систем за дії мікотоксинів узгоджуються з результатами досліджень, проведених на лабораторних тваринах (Nikolaenko et al., 2023b). Подібні адаптивні зміни біохімічних показників за умов забруднення водного середовища раніше відзначалися у коропа лускатого (Nikolaenko et al., 2023a).

Зниження частки фосфоліпідів у м'язовій тканині може призводити до змін фізико-хімічних властивостей мембран, що потенційно впливає на скоротливу функцію та енергетичний обмін.

**Обговорення.** Отримані результати свідчать, що дія ксенобіотиків різної хімічної природи – афлатоксину, солі міді та натрій лаурилсульфату (2 ГДК) – супроводжувалася вираженими змінами показників ліпідного обміну

Таблиця 1

**Показники ліпідного обміну та перекисного окиснення в печінці коропа (M±m, n=5)**

Показник	Контроль	Афлатоксин	Cu <sup>2+</sup>	Натрій лаурилсульфат
Загальні ліпіди, мг/г	45,3 ± 2,1	52,8 ± 2,4*	49,7 ± 2,0*	47,5 ± 1,8
Тригліцериди, %	38,4 ± 1,7	44,2 ± 1,9*	41,8 ± 1,5*	40,1 ± 1,6
Фосфоліпіди, %	46,7 ± 2,0	39,3 ± 1,8*	41,0 ± 1,7*	42,5 ± 1,5*
Холестерин, %	14,9 ± 0,9	16,5 ± 1,0*	15,8 ± 0,8	15,2 ± 0,7
МДА, нмоль/мг білка	2,1 ± 0,2	3,8 ± 0,3*	3,5 ± 0,3*	3,0 ± 0,2*
Дієнові кон'югати, од. опт. щільн./мг білка	0,42 ± 0,03	0,71 ± 0,05*	0,65 ± 0,04*	0,59 ± 0,04*
СОД, ум. од./мг білка	18,5 ± 1,1	14,2 ± 0,9*	15,1 ± 1,0*	16,3 ± 0,8*
Каталаза, мкмоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /хв·мг білка	12,6 ± 0,8	9,1 ± 0,7*	9,8 ± 0,6*	10,4 ± 0,6*
ГП, мкмоль/хв·мг білка	8,4 ± 0,5	6,0 ± 0,4*	6,5 ± 0,5*	7,1 ± 0,4*
Ліпаза, од./мг білка	5,2 ± 0,3	6,8 ± 0,4*	6,3 ± 0,3*	5,9 ± 0,3*

Таблиця 2

**Показники ліпідного обміну та перекисного окиснення у скелетних м'язах коропа (M±m, n=5)**

Показник	Контроль	Афлатоксин	Cu <sup>2+</sup>	Натрій лаурилсульфат
Загальні ліпіди, мг/г	28,6 ± 1,5	33,9 ± 1,8*	31,7 ± 1,6*	30,5 ± 1,4
Тригліцериди, %	41,2 ± 1,6	46,8 ± 1,9*	44,9 ± 1,7*	43,5 ± 1,5
Фосфоліпіди, %	44,1 ± 1,8	37,6 ± 1,6*	39,2 ± 1,5*	40,3 ± 1,4*
Холестерин, %	14,7 ± 0,8	15,6 ± 0,9	15,2 ± 0,8	15,0 ± 0,7
МДА, нмоль/мг білка	1,6 ± 0,1	2,9 ± 0,2*	2,6 ± 0,2*	2,3 ± 0,2*
Дієнові кон'югати, од. опт. щільн./мг білка	0,31 ± 0,02	0,55 ± 0,04*	0,49 ± 0,03*	0,45 ± 0,03*
СОД, ум. од./мг білка	16,2 ± 0,9	13,1 ± 0,8*	13,8 ± 0,7*	14,5 ± 0,8*
Каталаза, мкмоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /хв·мг білка	10,4 ± 0,6	8,0 ± 0,5*	8,5 ± 0,5*	9,1 ± 0,4*
ГП, мкмоль/хв·мг білка	7,1 ± 0,4	5,2 ± 0,3*	5,6 ± 0,4*	6,0 ± 0,3*
Ліпаза, од./мг білка	4,6 ± 0,3	5,9 ± 0,3*	5,4 ± 0,3*	5,1 ± 0,2*

та активацією процесів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) у тканинах коропа (*Cyprinus carpio* L.).

У печінці риб дослідних груп відзначено достовірне підвищення вмісту загальних ліпідів, найбільш виражене за дії афлатоксину. Одночасно спостерігалось зростання частки тригліцеридів та зниження фракції фосфоліпідів. Подібна перебудова ліпідного спектра може свідчити про порушення структурно-функціонального стану клітинних мембран та розвиток жирової дистрофії печінки, що узгоджується з даними про гепатотоксичну дію мікотоксинів (Liu et al., 2023).

Зменшення частки фосфоліпідів є важливим індикатором мембранодеструктивних процесів, оскільки саме вони формують бішар клітинних мембран. Подібні зміни ліпідного складу за дії токсикантів різної природи раніше описані у коропа при впливі поверхнево-активних речовин та інших ксенобіотиків (Yachna et al., 2019; Symonova et al., 2018, Zhelay et al., 2023b).

У скелетних м'язах тенденції були аналогічними, проте менш вираженими, що підтверджує провідну роль печінки як центрального органа детоксикації та метаболічної регуляції. В усіх дослідних групах встановлено достовірне підвищення вмісту малонового діальдегіду (МДА) та дієнових кон'югатів – маркерів інтенсифікації ПОЛ. Найвищі показники зафіксовано при дії афлатоксину та іонів міді.

Активність ПОЛ свідчить про розвиток оксидативного стресу, що є універсальним механізмом токсичної дії ксенобіотиків. Іони міді здатні каталізувати реакції типу Фентона з утворенням активних форм кисню, тоді як мікотоксини індукують мітохондріальну дисфункцію та порушення електрон-транспортного ланцюга (Zhu et al., 2017). Подібні результати щодо активації вільнорадикального окиснення в тканинах риб описані також при дії інших металів та антропогенних чинників (Khomenchuk et al., 2018).

Зростання інтенсивності ПОЛ супроводжувалося зниженням активності ферментів антиоксидантного захисту – супероксиддисмутази, каталази та глутатіонпероксидази. Найбільш суттєве пригнічення ферментативної активності спостерігалось у печінці риб, експонованих до афлатоксину. Зниження активності антиоксидантних ферментів може бути пов'язане як з прямим інгібуванням ферментних систем токсикантами, так і з їх функціональним виснаженням унаслідок надмірного утворення активних форм кисню (Filonenko & Mekhed, 2025).

#### **Бібліографічні посилання:**

1. 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. doi: 10.1016/j.aquaculture.2023.739892
2. Błajet-Kosicka, S., Turek, J. T., Szyper-Matiaszek, J. A., Szymański, R. W., Szołtysik, A., Mikołajczak, A., Kowalski, P., & Szymański, P. R. (2024). T-2 Toxin–The Most Toxic Trichothecene Mycotoxin: Metabolism, Toxicity, and Decontamination Strategies. *Toxins*, 16(1).
3. Filonenko, D., & Mekhed, O. (2025). Assessment of the combined effect of heavy metals and surfactants on carp fish organisms. *Biota. Human. Technology*. 1, 40–47.
4. 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.

5. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., & Rosen, R. (2025). Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*, 17(3), 116.
6. Hrubinko, V. V. (2005). Integralna otsinka toksychnoho urazhennia biolohichnykh system. [Integral assessment of toxic damage in biological systems]. Ternopil: Naukovi zapysky TNPU. Seriya Biolohiia, 3, 111–114 (in Ukrainian).
7. Khomenchuk, V. O., Rabcheniuk, O. O., Stanislavchuk, A. V., & Kurant, V. Z. (2018). Vilnoradykalne perekysne oksynennia lipidiv u tkanyakh ryb za dii ferumu (III) [Free radical lipid peroxidation in fish tissues under the action of ferrum (III)]. Suchasni problemy teoretychnoi ta praktychnoi ikhtiologii: materialy XI ikhtiologichnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Lviv, 82–85 (in Ukrainian).
8. 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.
9. Koval, V. O., Mekhed, O. B., & Yakovenko, B. V. (2009). Diia toksykantiv riznoyi pryrody na vmist ketokyslot v orhanizmi koropa v period zymovoho holoduvannya [The effect of toxicants of various nature on the content of keto acids in carp during winter starvation]. *Rybne Hospodarstvo*, 67, 81–87 (in Ukrainian).
10. 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
11. 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.
12. Lukash, O., Tkachenko, H., Sikura, A., Mekhed, O., & Kurhaliuk, N. (2025). Problema dobrochesnosti suchasnykh biomedychnykh ta ekolohichnykh doslidzhen [The Issue of Integrity in Modern Biomedical and Environmental Research]. *Biota. Human. Technology*, 3, 231–237 (in Ukrainian).
13. Martseniuk, V. M., Potrokhov, O. S. & Zinkovskiy, O. G. (2018). Energy metabolism in organs and tissues of perch *Perca fluviatilis* under changes of water temperature. *Hydrobiological Journal*, 54(4), 85–94.
14. Martseniuk, V.M. (2019). Osoblyvosti rehuliacii enerhozabezpechennia adaptatsii ryb do dii abiotychnykh ta antropohennykh chynnykiv [Features of regulation of energy supply for the adaptation of fish to the influence of abiotic and anthropogenic factors] (PhD dissertation). Instytut hidrobiologii NAN Ukrainy, Kyiv, 225 (in Ukrainian).
15. Mekhed, O. B. (2005). Vplyv pestytsyidnoho zabrudnennia vodnoho seredovyscha na ikhtiologichni pokaznyky ta metabolichni peretvorennia v orhanizmi koropa. [The effect of pesticide pollution of the aquatic environment on ichthyological indicators and metabolic transformations in the body of carp]. dys. .kand. biol. nauk : 03.00.10. Instytut hidrobiologii, Kyiv (in Ukrainian).
16. Mekhed, O. (2024). Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. *One World – One Health*, Słupsk, 263–266.
17. Mekhed, O. B., & Yakovenko, B. V. (2010). Vplyv herbicydnoho zabrudnennia vodnoho seredovyscha na metabolichni protsesy v tkanyakh biloho amura [The effect of herbicide contamination of the aquatic environment on metabolic processes in the tissues of grass carp]. Ternopil: Naukovi zapysky TNPU. Seriya Biolohiia, 2 (43), 353–356 (in Ukrainian).
18. National Agrarian University of Ukraine. (2004). Metodychni vkazivky z vyznachennia mikrokilkostey pestytsyidiv u produktakh kharchuvannya, kormakh ta navkolyshnomu seredovyschci [Guidelines for determining trace amounts of pesticides in food, feed, and the environment]. Kyiv (in Ukrainian).
19. Nikolaienko, T., Ivashchenko, M., Ivashchenko, N., & Mekhed, O. (2023). Adaptivni zminy pokaznykiv krovi koropa luskatoho (*Cyprinus carpio Linnaeus*, 1758) yak vidpovid na zabrudnennia vody [Adaptive changes in blood indicators of scaled carp (*Cyprinus carpio Linnaeus*, 1758) in response to water pollution]. *Natural Resources of Border Territories under Climate Change Conditions*, Chernihiv, Desna-Polygraph, 99–100 (in Ukrainian).
20. Nikolaenko, T. M., Ivashchenko, M. O., Ivashchenko, N. V., & Mekhed, O. B. (2023). Biokhimichni pokaznyky krovi laboratornykh tvaryn za dii mikotoksynu T2. [Biochemical indicators of blood in laboratory animals under the influence of T-2 mycotoxin]. "Vin Smart Eco", Vinnytsia, 276–277 (in Ukrainian).
21. Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Nakopychennia mikotoksyniv u myazakh koropa luskatoho (*Cyprinus carpio Linnaeus*, 1758) pry zhodovuvanni kormu, kontaminovanoho T2-toksynom [Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaled carp (*Cyprinus carpio Linnaeus*, 1758) when feeding T2-toxin-contaminated feed]. *Natural Resources of Border Territories under Climate Change Conditions*, Chernihiv, Desna-Polygraph, 105–106 (in Ukrainian).
22. Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2024). Changes in the morphological indicators of carp under the action of mycotoxin T2. *Biota. Human. Technology*, (3), 69–76. <https://doi.org/10.58407/bht.3.24.4>
23. 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.
24. Symonova, N. A., Mekhed, O. B., Kupchuk, 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.
25. Yachna, M. H., Mekhed, O. B., Tretyak, O. P., & Yakovenko, B. V. (2019). Vmist fosfolipidiv u tkanyakh koropa luskatoho (*Cyprinus carpio L.*) za dii natriy laurylsulfatmishnoho ta bezfosfatnoho syntetychnykh myuuchykh zasobiv [Content of phospholipids in tissues of scaled carp (*Cyprinus carpio L.*) under the influence of sodium lauryl sulfate and phosphate-free synthetic detergents]. Ternopil: Naukovi zapysky TNPU. Seriya Biolohiia, 2(76), 48–52 (in Ukrainian).
26. Yatsenko, I. V., Bohatko, N. M., Bulgakova, N. V., & others. (2017). Hygiene and expertise of food hydrobionts and their processing products. Part 1. Hygiene and expertise of fishery products: A textbook. Disa Plus, Kharkiv, 168.

27. Zhang, L., Wang, J., Liu, R., Han, C., Li, X., Ding, J., Zhang, T., & Liu, J. (2019). T-2 Toxin: A Comprehensive Review on Its Occurrence, Toxicity, and Detoxification. *Toxins*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/toxins11030147>
28. Zhelay, M. V., Polotnianko, L. V., Yachna, M. H., Mekhed, O. B., & Tretyak, O. P. (2023). Vplyv mikotoksynu T2 na ikhtiolohichni pokaznyky koropovykh ryb [Effect of T2 mycotoxin on ichthyological indicators of cyprinid fish]. *Ternopil: Naukovi zapysky TNPU. Seriiia Biolohiia*, 84(1), 35–40 (in Ukrainian).
29. Zhelay, M., Yachna, M., Mekhed, O., & Tretyak, O. (2023). Adaptivni zminy ikhtiolohichnykh pokaznykiv koropovykh ryb za dii mikotoksyntu T2 [Adaptive changes in ichthyological indicators of cyprinid fish under the influence of T2 mycotoxin]. *Natural Resources of Border Territories under Climate Change Conditions*, Chernihiv, Desna-Polygraph, 77–78 (in Ukrainian).
30. Zhu, J., Wang, L., Fang, H., Zheng, X., Liu, J., Huang, Z., Wu, W., Yan, Q., Li, Y., & Wang, Y. (2017). Hepatotoxicity of T-2 toxin in HepG2 cells involves inhibition of cell proliferation, apoptosis, and mitochondrial injury. *Food and Chemical Toxicology*, 108, 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.09.006>

**Lukash O. V.**, Doctor (Biological Sciences), Professor, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»

**Tkachuk N. V.**, PhD (Biological Sciences), Associate Professor, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»

**Yanchenko V. O.**, PhD (Pharmaceutical Sciences), Associate Professor, T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»

### **Modulation of lipid metabolism and peroxidation processes in scalp carp tissues under the action of xenobiotics and secondary metabolites of micromycetes**

*Pollution of aquatic ecosystems with xenobiotics of various nature is a pressing environmental problem that affects the physiological state of aquatic organisms and the safety of aquaculture products. The aim of the study was to study the effect of xenobiotics of various nature – aflatoxin, copper salts and sodium lauryl sulfate at a concentration of 2 MPC – on lipid metabolism and lipid peroxidation processes in carp tissues (Cyprinus carpio L.). The experiment was conducted on carp fry grown under controlled conditions, using standard methods for assessing total lipids, their fractional composition (triglycerides, phospholipids, cholesterol), as well as determining the final and intermediate products of lipid peroxidation – malondialdehyde and diene conjugates. To assess the state of antioxidant protection, the activity of the enzymes superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase, as well as lipase as a marker of metabolic mobilization of energy resources, was determined.*

*The results showed that the action of all studied toxicants causes significant disorders of lipid metabolism and activation of lipid peroxidation processes, with the most pronounced changes observed in the liver. Aflatoxin showed the highest toxic activity, accompanied by a significant increase in the level of malondialdehyde and a decrease in the activity of antioxidant enzymes. The effect of copper salt led to intensive generation of free radicals, and sodium lauryl sulfate caused moderate changes in the lipid profile and enzymatic activity. In skeletal muscles, the changes were less pronounced, which confirms the central role of the liver in detoxification processes. The obtained data indicate a universal mechanism of toxic action of xenobiotics, which is realized through disorders of lipid metabolism and activation of free radical processes, as well as the need to control contamination of feed and aquatic ecosystems to ensure the physiological stability of aquatic organisms and the safety of aquaculture products. The results of the study can be used to develop biochemical markers of toxic stress in fish and assess the ecological safety of aquatic environments.*

**Key words:** xenobiotics, carp, fish, secondary metabolites of micromycetes, aflatoxin, lipid metabolism, lipid peroxidation, oxidative stress, pollutants, total lipids, lipase, phospholipids

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.05.2026