

АКТИВНІСТЬ ФЕРМЕНТІВ ВУГЛЕВОДНОГО ОБМІНУ У КАРАСЯ ЗВИЧАЙНОГО (*CARASSIUS CARASSIUS*) ЗА АФЛАТОКСИКОЗУ ЯК МАРКЕР ОЦІНКИ ТОКСИЧНОСТІ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Матюшко Сергій Миколайович,

аспірант кафедри біології

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-8655-3201>

Любчиков Руслан Євгенійович,

аспірант кафедри екології, географії та природокористування

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-2267-9463>

Зміна клімату та зростання антропогенного навантаження на довкілля сприяють поширенню небезпечних токсинів, зокрема мікотоксинів, що становлять загрозу для водних екосистем та аквакультури. Афлатоксин В1 (АФВ1) є одним із найпоширеніших мікотоксинів, що контаминують корми, і його вплив на гідробіонти потребує детального вивчення. Метою дослідження було вивчення впливу афлатоксину В1 на активність ферментів вуглеводного обміну у карася звичайного (*Carassius carassius* L.) як біохімічного маркера для оцінки токсичності водного середовища. Дослідження проводилося на дворічках карася звичайного, яких утримували в 200-літрових акваріумах. Експериментальна група риб піддавалася впливу АФВ1 у концентрації 1,0 мкг/л. Активність ключових ферментів вуглеводного обміну – глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (Г-6-ФДГ), лактатдегідрогенази (ЛДГ), ізоцитратдегідрогенази (ІЦДГ) та глюкозо-6-фосфатази (Г-6-Фази) – визначалася в печінці, головному мозку та білих м'язах. Додатково аналізувалися концентрації глюкози та глікогену в цих тканинах.

Результати показали, що вплив АФВ1 спричинив значні зміни в метаболічних процесах. Спостерігалася достовірне підвищення рівня глюкози в печінці (на 110%) та м'язах (на 89%), що супроводжувалося виснаженням запасів глікогену (зниження на 53% та 52% відповідно). Ці зміни свідчать про розвиток стресової гіперглікемії та мобілізацію енергетичних резервів для протидії токсину. Активність ферментів також зазнала значних змін. Активність ЛДГ достовірно зросла в усіх досліджуваних органах (на 90% в печінці, 79% в м'язах та 55% в мозку), тоді як активність ІЦДГ суттєво знизилася (на 53% в печінці, 44% в мозку та 50% в м'язах). Це вказує на перехід організму з аеробного на анаеробний шлях енергетичного обміну, ймовірно, внаслідок мітохондріального пошкодження. Водночас, активність Г-6-ФДГ зросла в печінці та м'язах (на 105% та 64%), що є свідченням активації пентозофосфатного шляху для синтезу НАДФН, необхідного для антиоксидантного захисту та детоксикації.

Висновки підтверджують, що зміни в активності ферментів вуглеводного обміну та концентрації глюкози і глікогену є чутливими біохімічними індикаторами токсичного впливу афлатоксину В1. Ці показники можуть слугувати надійними та інформативними маркерами для моніторингу та оцінки рівня токсичності водного середовища, що є критично важливим для охорони навколишнього середовища та забезпечення якості продукції аквакультури.

Ключові слова: афлатоксин В1, карась звичайний, вуглеводний обмін, біомаркери, токсичність, водне середовище, оцінка токсичності, ферменти.

Matiushko Sergii, Liubchikov Ruslan. Carbohydrate metabolism enzyme activity in Crucian carp (*Carassius carassius*) under aflatoxicosis as a biomarker for aquatic environment toxicity assessment

Climate change and the increasing anthropogenic load on the environment contribute to the spread of hazardous toxins, particularly mycotoxins, which pose a threat to aquatic ecosystems and aquaculture. Aflatoxin B1 (AFB1) is one of the most common mycotoxins contaminating feed, and its effect on aquatic organisms requires detailed study. The aim of the study was to investigate the effect of aflatoxin B1 on the activity of carbohydrate metabolism enzymes in crucian carp (*Carassius carassius* L.), using this as a biochemical marker to assess the toxicity of the aquatic environment. The study was conducted on 2-year-old crucian carp kept in 200-liter aquariums. The experimental group of fish was exposed to AFB1 at a concentration of 1.0 µg/L. The activity of key enzymes of carbohydrate metabolism – glucose-6-phosphate dehydrogenase (G-6-FDG), lactate dehydrogenase (LDH), isocitrate dehydrogenase (ICDH) and glucose-6-phosphatase (G-6-Phase) – was determined in the liver, brain and white muscles. Additionally, glucose and glycogen concentrations in these tissues were analyzed. The results showed that the effect of AFB1 caused significant changes in metabolic processes. A significant increase in glucose levels in the liver (by 110%) and muscles (by 89%) was observed, which was accompanied by depletion of glycogen stores (a decrease of 53% and 52%, respectively). These changes indicate the development of stress hyperglycemia and the mobilization of energy reserves to counteract the toxin. Enzyme activity also underwent significant changes. LDH activity significantly increased in all studied organs (by 90% in the liver, 79% in the muscles and 55% in the brain), while ICDGH activity significantly decreased (by 53% in the liver, 44% in the brain and 50% in the muscles). This indicates the transition of the organism from the aerobic to the anaerobic pathway of energy metabolism, probably due to mitochondrial damage. At the same time, the activity of G-6-FDG increased in the liver and muscles (by 105% and 64%), which is evidence of the activation of the pentose phosphate pathway for the synthesis of NADPH, which is necessary for antioxidant protection and detoxification.

The findings confirm that changes in the activity of carbohydrate metabolism enzymes and glucose and glycogen concentrations are sensitive biochemical indicators of the toxic effects of aflatoxin B1. These indicators can serve as reliable and informative markers for monitoring and assessing the level of toxicity of the aquatic environment, which is critically important for environmental protection and ensuring the quality of aquaculture products.

Key words: aflatoxin B1, common crucian carp, carbohydrate metabolism, biomarkers, toxicity, aquatic environment, toxicity assessment, enzymes.

Вступ. Зміна клімату та забруднення довкілля є глобальними викликами, що призводять до значного поширення токсинів, зокрема мікотоксинів, які негативно впливають на живі організми та екосистеми загалом. За прогнозами, потепління клімату сприятиме збільшенню контамінації кукурудзи та інших сільськогосподарських культур афлатоксином В1, що ставить під загрозу харчову безпеку [1]. Це, своєю чергою, призводить до зростання рівня мікотоксинів у кормах для аквакультури, що було підтверджено у результаті глобальних досліджень [2].

Забруднення водного середовища, зокрема кормами, контамінованими мікотоксинами, спричиняє значні зміни в організмі риб. Такі зміни можуть проявлятися у вигляді адаптивних реакцій організму, включаючи зміни в показниках крові [3; 4], а також впливати на їхтіологічні показники корошових риб [5]. Дослідження показують, що мікотоксини можуть накопичуватися в м'язах риб, що становить загрозу не лише для водних організмів, але й для людини, яка споживає їх у їжу [6]. Токсини, потрапляючи в організм риб, викликають деградацію ліпідів [7] та можуть призводити до значних метаболічних адаптацій, які є предметом вивчення сучасної біології [8].

Афлатоксин В1 (АФВ1) є одним із найпоширеніших та найтоксичніших мікотоксинів, який може біоакмулюватися в організмі риб [9]. Вплив АФВ1 на водних мешканців проявляється у зміні фізіологічного стану, що включає погіршення росту, порушення імунної відповіді та антиоксидантного статусу [10]. Вуглеводний обмін є одним з найчутливіших індикаторів фізіологічного стану риб, оскільки ферменти, що беруть участь у ньому, швидко реагують на стресові фактори. Це робить їх потенційними біохімічними маркерами для оцінки рівня токсичності водного середовища.

Попри значну кількість досліджень, присвячених впливу афлатоксину В1 на риб, більшість з них зосереджені на промислово важливих видах, тоді як карась звичайний як модельний об'єкт залишається недостатньо вивченим. Недостатньо даних щодо біохімічних механізмів адаптації цього виду до дії мікотоксинів, зокрема впливу на вуглеводний обмін. Така прогалина у знаннях обмежує можливості використання карася як індикаторного виду для оцінки токсичності водного середовища та знижує ефективність розробки екологічних стратегій у сфері рибництва та аквакультури.

Метою нашої роботи є вивчення впливу афлатоксину В1 на активність ферментів вуглеводного обміну у карася звичайного як біохімічного маркера для оцінки рівня токсичності водного середовища.

Матеріали та методи. Дослідження впливу мікотоксину було проведено на дворічках карася звичай-

ного (*Carassius carassius* L.), вирощених у БАТ «Чернігіврибгосп» у період з 2024 по 2025 рр. Експеримент проводили в 200-літрових акваріумах. Гідрохімічні показники води, що використовувалася для утримання риб, відповідали рибоводно-біологічним нормам: рН $7,30 \pm 0,27$; вміст розчиненого кисню $5,6 \pm 0,4$ мг/дм³. Температура води відповідала природним умовам. Маса риб становила 200–300 г.

Для проведення експерименту було створено дві групи риб: контрольну та дослідну. Дослідній групі додавали афлатоксин В1 (АФВ1) у концентрації 1,0 мкг/л.

Дослідження проводили на дворічних карасях звичайних (*Carassius carassius* L.), утримуваних у 200-літрових акваріумах. У дослідній групі кожна вибірка складала 20 особин. Риб зазнавали дії афлатоксину В1 у концентрації 1,0 мкг/л. У печінці, мозку та білих м'язах визначали активність ключових ферментів вуглеводного обміну: глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (G-6-FDG), лактатдегідрогенази (LDH), ізоцитратдегідрогенази (ICDH), глюкозо-6-фосфатази (G-6-Phase).

Активність ферментів вуглеводного обміну визначали в наступних органах: головному мозку, білих м'язах та печінці. Для цього готували гомогенат тканин на 0,25 М сахарозі у співвідношенні 1:10. Ядра, мітохондрії та мікросоми виділяли згідно із загальноприйнятими методиками [11; 12], з урахуванням особливостей фракціонування гомогенатів тканин риб [13]. Додатково мітохондрії очищали центрифугуванням у градієнті щільності сахарози (0,32-1,2 М) у горизонтальному роторі при 75000 g протягом 60 хвилин при +4°C.

Активність глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (Г-6-ФДГ, КФ 1.1.1.49) визначали спектрофотометрично при довжині хвилі 340 нм (Biochemica Information, 1975). Активність виражали в мкмоль NADP/мг білка за хв. Активність ізоцитратдегідрогенази (ІЦДГ, КФ 1.1.1.41) визначали в мітохондріальній фракції гомогенатів, виражаючи її в мкмоль НАДРН на 1 мг білка за 1 хв [11]. Активність лактатдегідрогенази (ЛДГ, КФ 1.1.1.27) визначали спектрофотометрично за зміною оптичної щільності окислення NADH при 340 нм [12]. Активність виражали в мкмоль NADH/мг білка за хв. Активність глюкозо-6-фосфатази (Г-6-Фаза, КФ.3.1.3.9) визначали в надосадовій фракції гомогенатів, виражаючи її в мкмоль неорганічного фосфору (Pi) за 1 хв на 1 мг білка [12].

Вміст білка у ферментативних препаратах визначали методом Лоурі та ін. [14]. Концентрацію глюкози та глікогену визначали глюкооксидазним методом згідно з інструкцією до лабораторного набору АТ "Реагент" (Україна). Статистичну обробку даних проводили

за допомогою Microsoft Excel. Достовірність різниці між середніми арифметичними величинами визначали за допомогою t-критерію Стьюдента. Відмінності вважали статистично достовірними при $P < 0,05$. Тварин утримували та декапітували відповідно до етичних принципів поводження [15]

Результати. Вплив афлатоксину В1 на метаболізм карася звичайного спричинив значні зміни в активності ключових ферментів вуглеводного обміну, а також у концентрації глюкози та глікогену. Отримані дані підтверджують гіпотезу про те, що ці показники можуть слугувати біохімічними маркерами токсичного впливу. Як показано в таблиці 1, вплив афлатоксину В1 в концентрації 1,0 мкг/л призвів до значних змін у запасах глікогену та рівні глюкози в тканинах карася звичайного.

Спостерігалось значне збільшення концентрації глюкози як у печінці (на 110%), так і в м'язах (на 89%). Це є типовою реакцією організму риб на стрес, відомою як стресова гіперглікемія. Така мобілізація глюкози є захисним механізмом, що забезпечує клітини додатковою енергією для боротьби з токсичним впливом.

Концентрація глікогену в печінці та м'язах, навпаки, достовірно знизилася (на 53% та 52% відповідно). Це свідчить про інтенсивний глікогеноліз – процес розпаду глікогену, необхідний для швидкого поповнення пулу глюкози. Ці зміни вказують на те, що організм активно використовує свої енергетичні резерви для компенсації негативної дії токсину.

В Таблиці 2 представлені дані про зміни в активності ключових ферментів, що регулюють вуглеводний обмін.

Активність Г-6-ФДГ достовірно зросла в печінці (на 105%) та білих м'язах (на 64%), тоді як у головному мозку зміни були незначними. Таке зростання вказує на активацію пентозофосфатного шляху, який генерує НАДФН. НАДФН, своєю чергою, є кофактором для антиоксидантних ферментів, що допомагають організму знешкоджувати токсичні сполуки. Збільшення активності глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (Г-6-ФДГ) у печінці та м'язах є важливою адаптивною реакцією. Це свідчить про посилення пентозофосфатного шляху, який необхідний для синтезу НАДФН. НАДФН, своєю чергою, є ключовим компонентом антиоксидантних систем, що захищають клітини від окисного стресу, спричиненого токсинами. Це узгоджується з даними, що токсичний вплив гербіцидів та інших поверхнево-активних речовин також викликає зміни у активності ферментів енергетичного метаболізму у коропа [16].

Активність ЛДГ значно підвищилася у всіх досліджуваних органах: в печінці (на 90%), м'язах (на 79%) та головному мозку (на 55%). Це свідчить про посилення анаеробного гліколізу. Такий перехід на анаеробний шлях отримання енергії може бути викликаний порушенням мітохондріального дихання під впливом АФВ1.

Спостерігалось достовірне зниження активності ПЦДГ у всіх органах (на 53% в печінці, 44% в головному мозку та майже 50% в м'язах). Це є прямим свідченням пригнічення циклу Кребса та, як наслідок, аеробного енергетичного обміну. Значне зростання активності лактатдегідрогенази (ЛДГ) та зниження активності ізоцитратдегідрогенази (ПЦДГ) в усіх органах вказує на зміну шляхів енергетичного обміну. Організм перехо-

Таблиця 1

Вміст глюкози та глікогену в тканинах карася звичайного за афлатоксикозу, мкмоль/г сирової маси ($M \pm m$, $n=5$)

Показник	Орган	Контроль	АФВ1 (1,0 мкг/л)
Глюкоза	Печінка	1,21 $\pm$ 0,11	2,54 $\pm$ 0,23*
	Білі м'язи	0,98 $\pm$ 0,09	1,85 $\pm$ 0,17*
Глікоген	Печінка	11,5 $\pm$ 0,9	5,4 $\pm$ 0,5*
	Білі м'язи	8,7 $\pm$ 0,8	4,1 $\pm$ 0,4*

Примітка: * – $P < 0,05$ у порівнянні з контролем

Таблиця 2

Зміни активності ключових ферментів, що регулюють вуглеводний обмін карася звичайного за афлатоксикозу ($M \pm m$, $n=5$)

Фермент	Орган	Контроль	АФВ1 (1,0 мкг/л)
Г-6-ФДГ (мкмоль NADP/мг білка/хв)	Печінка	0,22 $\pm$ 0,02	0,45 $\pm$ 0,04*
	Головний мозок	0,18 $\pm$ 0,02	0,19 $\pm$ 0,02
	Білі м'язи	0,11 $\pm$ 0,01	0,18 $\pm$ 0,02*
ЛДГ (мкмоль NADH/мг білка/хв)	Печінка	1,51 $\pm$ 0,14	2,87 $\pm$ 0,26*
	Білі м'язи	2,75 $\pm$ 0,25	4,92 $\pm$ 0,44*
	Головний мозок	0,98 $\pm$ 0,09	1,52 $\pm$ 0,14*
ПЦДГ (мкмоль НАДРН/мг білка/хв)	Печінка	0,74 $\pm$ 0,07	0,35 $\pm$ 0,03*
	Головний мозок	0,55 $\pm$ 0,05	0,31 $\pm$ 0,03*
	Білі м'язи	0,42 $\pm$ 0,04	0,22 $\pm$ 0,02*
Г-6-Фаза (мкмоль Рі/мг білка/хв)	Печінка	0,15 $\pm$ 0,01	0,28 $\pm$ 0,02*

дять з аеробного (цикл Кребса) на анаеробний (гліколіз) шлях отримання енергії. Цей механізм допомагає клітинам виживати в умовах стресу, коли мітохондріальне дихання пригнічене. Такі адаптивні зміни у біохімічних показниках гідробіонтів у відповідь на токсичну дію інших речовин є добре вивченим явищем [17; 18; 19], що підтверджує одержані нами результати для афлатоксину В1.

Активність Г-6Фази в печінці збільшилася на 87%, що підтверджує дані про зниження глікогену. Посилена робота Г-6-Фази забезпечує надходження глюкози в кров для підтримання високого рівня енергії в умовах токсичного стресу. Спостережувана стресова гіперглікемія (збільшення рівня глюкози) та виснаження запасів глікогену в печінці та м'язах є прямою відповіддю на токсичний стрес. Активація глюкозо-6-фосфатази (Г-6-Фаза), ключового ферменту, що вивільняє глюкозу в кров, підтверджує цей процес. Подібні метаболічні зміни були зафіксовані в інших дослідженнях. Зокрема, було показано, що дієтичний афлатоксин В1 негативно впливає на ріст та метаболізм, а також цілісність тканин у молодого морського ляща (*Sparus aurata*), що свідчить про схожі механізми токсичного впливу на обмінні процеси у різних видів риб [20].

Афлатоксин В1 належить до найтоксичніших мікотоксинів, які утворюються грибами роду *Aspergillus* під час зберігання та транспортування зернових культур і можуть забруднювати корми для аквакультури. Потрапляння цього токсину у водне середовище найчастіше відбувається через використання контамінованих кормів та змиви із сільськогосподарських угідь, що становить серйозну екологічну проблему [21]. Наявні дослідження свідчать, що навіть низькі концентрації афлатоксину В1 здатні викликати істотні порушення метаболізму, включаючи процеси росту, білкового та ліпідного обміну, а також функціональний стан

печінки у риб [22; 23]. Отримані нами результати підтверджують, що АФВ1 спричиняє виражені біохімічні зміни в організмі карася звичайного, зокрема у системі вуглеводного обміну. Це дозволяє розглядати його як один із ключових токсичних чинників, що може обмежувати рибопродуктивність і становити потенційну загрозу для харчової безпеки [21; 23].

Таким чином, виявлені зміни в активності ферментів (ЛДГ, ПЦДГ, Г-6-ФДГ) та концентрації метаболітів (глюкоза, глікоген) у карася звичайного є не лише підтвердженням загальних закономірностей біохімічних адаптацій гідробіонтів до токсичного стресу, але й підкреслюють чутливість саме вуглеводного обміну до дії афлатоксину В1. Це робить їх ефективними та інформативними біохімічними маркерами для моніторингу екологічного стану водного середовища.

Висновки. Проведені дослідження вказують на те, що вплив афлатоксину В1 призводить до системних метаболічних порушень у карася звичайного. Зміни в активності ЛДГ та ПЦДГ демонструють переключення організму з аеробного на анаеробний шлях отримання енергії, тоді як підвищення активності Г-6-ФДГ є індикатором активації захисних механізмів детоксикації. Зміна концентрації глюкози та глікогену також підтверджує цей стресовий стан. Таким чином, активність ферментів вуглеводного обміну та вміст глікогену можуть слугувати надійними та чутливими біохімічними маркерами для моніторингу та оцінки токсичності водного середовища, зокрема афлатоксином В1. Афлатоксин В1 слід розглядати не лише як лабораторну модель токсичного впливу, але й як реальний екологічний чинник, джерела якого пов'язані з аграрною діяльністю та аквакультурою. Урахування шляхів його надходження у водойми є необхідним для оцінки екологічних ризиків і розробки заходів із запобігання забрудненню водного середовища.

Література:

1. 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>
2. Gruber-Dorninger, C., Müller, A., Rosen, R. Multi-Mycotoxin Contamination of Aquaculture Feed: A Global Survey. *Toxins*. 2025. Т. 17. № 3. С. 116. <https://doi.org/10.3390/toxins17030116>
3. Ніколаєнко Т., Іващенко М., Іващенко Н., Мехед О. Адаптивні зміни показників крові коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) як відповідь на забруднення води. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Десна-Поліграф. 2023. С. 99-100
4. Желай М., Ячна М., Мехед О., Третяк О. Адаптивні зміни іхтіологічних показників корошових риб за дії мікотоксину Т2. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату*. Чернівці : Десна-Поліграф. 2023. С. 77-78.
5. Желай М. В., Полотнянко Л. В., Ячна М. Г., Мехед О. Б., Третяк О. П. Вплив мікотоксину Т2 на іхтіологічні показники корошових риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2023. Т. 84, №1. С. 35-40 <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5>
6. 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
7. 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.
8. Грубінко В.В. Системна оцінка метаболічних адаптацій у гідробіонтів. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія: Біологія. 2005. № 2. С. 36–39.
9. Deng, Y., Deng, Q., Wang, Y., Sun, L., Wang, R., Ye, L., Liao, J., Gooneratne, R. Tolerance and bio-accumulation of aflatoxin B1 in invertebrate *Litopenaeus vannamei* and vertebrate *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 2020. 524, 735055. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020>

10. Chen, S., Gan, L., Guo, Y., Liu, Y., Tian, L. Changes in growth performance, aflatoxin B1 residues, immune response and antioxidant status of *Litopenaeus vannamei* fed with AFB1-contaminated diets and the regulating effect of dietary myoinositol supplementation. *Food Chem.*, 2020. 324, 126888 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126888>.
11. Biochemica Information. Western Germany: Boehringer Mannheim GmbH. Bd., 1975. 1, 99–100.
12. Biochemica Information. Western Germany: Boehringer Mannheim GmbH. Bd., 1975. 2, 167.
13. Casey, C. A., & Anderson, P. M. Subcellular location of glutamine synthetase and urea cycle enzymes in liver of Spiny Dogfish (*Squalus acanthias*). *Journal of Biological Chemistry*, 1972. 257(14), 8449–8453
14. 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)
15. 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>
16. Yakovenko B. V., Tretyak O. P., Mekhed O. B., Iskevych O.V. Effect of herbicides and surfactants on enzymes of energy metabolism of the *Caprinus carpio*. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2018. № 8(1). 948 – 952 <http://dx.doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>
17. Mekhed O. Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. *One World – One Health*, Słupsk, 2024. 263–266
18. Мехед О. Б., Яковенко Б. В. Активність ключових ферментів вуглеводного обміну коропа лускатого в умовах токсикозу. *Visnyk problem biolohii ta medytsyny*. 2003. 6, 20–25.
19. Mekhed, O. B., Yakovenko, B. V., Zhidenko, A. A. Activity of some enzymes of carbohydrate metabolism in tissues of yearlings and two-years-old carps in the autumn time. *Hydrobiological Journal*, 2004. 40 (5), 77–84.
20. Barany, A., Guilloto, M., Cosano, J., de Boevre, M., Oliva, M., de Saeger, S., Fuentes, J., Martínez-Rodríguez, G., Mancera, J.M., Dietary aflatoxin B1 (AFB1) reduces growth performance, impacting growth axis, metabolism, and tissue integrity in juvenile gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 2021. 533, 736189. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736189>.
21. 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>.
22. 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>.
23. 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>.

References:

1. 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>
2. 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>
3. Nikolaenko, 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 parameters of scaled carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) as a response to water pollution]. In *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 99–100). Desna-Polihrاف. [in Ukrainian]
4. Zhelai, M., Yachna, M., Mekhed, O., & Tretyak, O. (2023). Adaptivni zminy ikhtiolohichnykh pokaznykiv korpovykh ryb za dii mikotoksynu T2 [Adaptive changes of ichthyological parameters of carp fish under the influence of mycotoxin T2]. In *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 77–78). Desna-Polihrاف. [in Ukrainian]
5. Zhelai, M. V., Polotnyanko, L. V., Yachna, M. H., Mekhed, O. B., & Tretyak, O. P. (2023). Vplyv mikotoksynu T2 na ikhtiolohichni pokaznyky koropovykh ryb [Influence of mycotoxin T2 on ichthyological parameters of carp fish]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*, 84(1), 35–40. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5> [in Ukrainian]
6. Polotnyanko, L., & Mekhed, O. (2023). Nakopychennia mikotoksyniv u m'iazakh koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) pry zghodovuvanni kormu, kontaminovanoho T2-toksynom [Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaled carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed with T2-toxin contaminated feed]. In *Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu* (pp. 105–106). Desna-Polihrاف. [in Ukrainian]
7. 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.
8. Hrubinko, V. V. (2005). Systemna otsinka metabolicznykh adaptatsii u hidrobiontiv [Systemic assessment of metabolic adaptations in hydrobionts]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia*, (2), 36–39. [in Ukrainian]
9. Deng, Y., Deng, Q., Wang, Y., Sun, L., Wang, R., Ye, L., Liao, J., & Gooneratne, R. (2020). Tolerance and bioaccumulation of aflatoxin B1 in invertebrate *Litopenaeus vannamei* and vertebrate *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 524, 735055. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735055>

10. Chen, S., Gan, L., Guo, Y., Liu, Y., & Tian, L. (2020). Changes in growth performance, aflatoxin B1 residues, immune response and antioxidant status of *Litopenaeus vannamei* fed with AFB1-contaminated diets and the regulating effect of dietary myoinositol supplementation. *Food Chem.*, 324, 126888. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126888>
11. *Biochemica Information*. (1975). (Vol. 1). Boehringer Mannheim GmbH.
12. *Biochemica Information*. (1975). (Vol. 2). Boehringer Mannheim GmbH.
13. Casey, C. A., & Anderson, P. M. (1972). Subcellular location of glutamine synthetase and urea cycle enzymes in liver of Spiny Dogfish (*Squalus acanthias*). *Journal of Biological Chemistry*, 257(14), 8449–8453.
14. 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)
15. 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>
16. Yakovenko, B. V., Tretyak, O. P., Mekhed, O. B., & Iskevych, O. V. (2018). Effect of herbicides and surfactants on enzymes of energy metabolism of the *Cyprinus carpio*. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 948–952. <http://dx.doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i3.80>
17. Mekhed, O. (2024). Changes in the biochemical indicators of hydrobionts in response to the toxic effect of mycotoxin T2. In *One World – One Health* (pp. 263–266). Słupsk.
18. Mekhed, O. B., & Yakovenko, B. V. (2003). Aktyvnist klyuchovykh fermentiv vuhlevodnoho obminu koropa luskatoho v umovakh toksykozu [Activity of key carbohydrate metabolism enzymes in scaled carp under toxicosis]. *Visnyk problem biologii ta medytsyny*, (6), 20–25. [in Ukrainian]
19. Mekhed, O. B., Yakovenko, B. V., & Zhidenko, A. A. (2004). Activity of some enzymes of carbohydrate metabolism in tissues of yearlings and two-years-old carps in the autumn time. *Hydrobiological Journal*, 40(5), 77–84.
20. Barany, A., Guilloto, M., Cosano, J., de Boevre, M., Oliva, M., de Saeger, S., Fuentes, J., Martínez-Rodríguez, G., & Mancera, J. M. (2021). Dietary aflatoxin B1 (AFB1) reduces growth performance, impacting growth axis, metabolism, and tissue integrity in juvenile gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 533, 736189. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736189>
21. 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. pp. 01–08. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739892> [in English].
22. 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, p. 101779. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101779> [in English].
23. 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, p. 1281722. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1281722> [in English]

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025