



УДК 577.1:591.5:574.3

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.8>

ЗМІНИ ВМІСТУ НУКЛЕЙНОВИХ КИСЛОТ У ТКАНИНАХ КАРАСЯ ЗВичАЙНОГО (*CARASSIUS CARASSIUS* L.) ЯК ПОТЕНЦІЙНИЙ МАРКЕР БІОІНДИКАЦІЇ ТОКСИЧНОЇ ДІЇ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Р. Є. Любчиков¹, Д. А. Філоненко²

У статті представлено результати експериментального дослідження впливу токсикантів різної природи на нуклеїновий гомеостаз у тканинах *Carassius carassius*. Вивчено зміни кількісного вмісту РНК, ДНК та співвідношення РНК/ДНК у чотирьох типах тканин (печінка, білі м'язи, мозок, зябра) за умов дії мікотоксину Т2 (2 мг/дм³), афлатоксину В1 (1 мг/дм³), солі свинцю (5 мг/дм³ у перерахунку на іон Pb²⁺), гербіциду Зенкор (3 мг/дм³) та лаурилсульфату натрію (2 мг/дм³). Зразки одержано від дворічних карасів, яких утримували в акваріумних умовах упродовж 14 діб. Кількісний вміст нуклеїнових кислот у тканинах визначали спектрофотометричним методом, реєстрували екстинкції для РНК за 260 і 286 нм, а для ДНК – за 268 і 284 нм. Співвідношення РНК/ДНК розраховували як інтегральний індикатор метаболічної активності.

Результати показали, що вміст ДНК у тканинах залишався стабільним за всіх умов, що свідчить про збереження клітинної маси. Натомість вміст РНК вірогідно знижувався під впливом усіх токсикантів, з максимальним зменшенням у печінці та м'язах за дії мікотоксину Т2 (зниження до 40–50%) та іонів свинцю. У цих тканинах також спостерігалось найсуттєвіше зниження співвідношення РНК/ДНК – на 40% ($p < 0,05$) та 34% ($p < 0,05$) щодо контролю. Водночас у таких менш метаболічно активних тканинах, як мозок і зябра, зафіксовано значуще зниження РНК/ДНК, що свідчить про системний характер стресової реакції. Виявлено, що мікотоксин Т2 й іони Pb²⁺ мають найпотужніший інгібувальний ефект на біосинтетичну активність клітин, тоді як Зенкор і лаурилсульфат спричиняли помірні, але достовірні зміни.

Отже, співвідношення РНК/ДНК продемонструвало високу чутливість до впливу різних типів ксенобіотиків і може бути використане як ефективний біохімічний маркер у системах біоіндикації і моніторингу якості водного середовища.

Ключові слова: нуклеїнові кислоти, РНК/ДНК, риби, токсиканти, метаболізм, печінка, тканини, біоіндикація.

¹ аспірант кафедри екології, географії та природокористування
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: mob8791@gmail.com
ORCID: 0009-0007-2267-9463

² аспірант кафедри біології
(Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, м. Чернігів)
e-mail: FilonenkoD@gmail.com
ORCID: 0009-0007-0631-1669

CHANGES IN THE CONTENT OF NUCLEIC ACIDS IN THE TISSUES OF THE CURB (*CARASSIUS CARASSIUS* L.) AS A POTENTIAL MARKER OF BIOINDICATION OF THE TOXIC EFFECT OF THE AQUATIC ENVIRONMENT

R. Ye. Liubchykov, D. A. Filonenko

*The article presents experimental results on the effects of various toxicants on the nucleic acid homeostasis in *Carassius carassius* tissues. The study assessed the quantitative content of RNA, DNA, and the RNA/DNA ratio in four tissue types (liver, white muscle, brain, and gills) following exposure to mycotoxin T2 (2 mg/dm³), aflatoxin B1 (1 mg/dm³), lead salt (5 mg/dm³ as Pb²⁺ ion), the herbicide Zencor (3 mg/dm³), and sodium lauryl sulfate (2 mg/dm³). Fish were kept under controlled aquarium conditions for 14 days. Nucleic acid content was determined spectrophotometrically by measuring optical densities at 260 and 286 nm for RNA, and 268 and 284 nm for DNA. The RNA/DNA ratio was used as an integrated indicator of metabolic activity.*

The results demonstrated that DNA levels remained stable across all groups, indicating preserved cellular mass. However, RNA levels significantly decreased under all toxicant exposures, particularly under T2 (up to 40–50%) and lead ions. These tissues also showed the most significant decrease in RNA/DNA ratio – by 40% ($p < 0,05$) and 34% ($p < 0,05$) relative to control. Statistically significant declines were also observed in the brain and gills, highlighting the systemic nature of the stress response. Among the tested toxicants, T2 and Pb²⁺ had the most pronounced inhibitory effects on cellular biosynthesis, while Zencor and lauryl sulfate induced moderate but significant changes. Therefore, the RNA/DNA ratio proved to be a sensitive and informative biomarker that reflects early metabolic disturbances in fish tissues under the influence of various chemical stressors. Its pronounced responsiveness to even moderate concentrations of toxicants highlights its diagnostic value for detecting sublethal physiological effects that may not be visible through morphological or conventional biochemical indicators. Due to its integrative nature, the RNA/DNA ratio can be effectively applied as a reliable tool in bioindication systems, supporting early-warning assessments and long-term ecological monitoring of aquatic ecosystems, particularly in environments exposed to anthropogenic pressure.

Key words: nucleic acids, RNA/DNA, fish, toxicants, metabolism, liver, tissues, bioindication.

Вступ

У сучасних умовах екологічної нестабільності й інтенсифікації антропогенного впливу на водні екосистеми особливої актуальності набувають методи біоіндикації. Вони дозволяють оперативно й об'єктивно оцінювати екологічний стан водойм шляхом вивчення реакцій живих організмів на зміну довкілля. Серед біоіндикаторів риба належить важливе місце завдяки їхній високій чутливості до змін фізико-хімічних параметрів води та до присутності токсикантів різної природи.

Окрему загрозу для гідробіонтів становлять ксенобіотики – речовини, що надходять у водойми внаслідок сільськогосподарської, промислової чи побутової діяльності людини. До них належать як органічні сполуки, зокрема мікотоксини та гербіциди, так і неорганічні контаміанти – солі важких металів і поверхнево-активні речовини. Навіть за невеликих концентрацій такі агенти здатні спричинити сублетальні зміни, які не завжди фіксуються традиційними фізико-хімічними

методами аналізу (Желай та ін., 2023b; Полотнянко і Мехед, 2023a).

У зв'язку із цим великого значення набуває пошук чутливих біомаркерів, здатних реагувати на токсичне навантаження ще до появи клінічних або морфологічних змін. Одним із сучасних напрямів є дослідження кількісного вмісту нуклеїнових кислот у тканинах риб, зокрема співвідношення РНК/ДНК. Цей показник відображає метаболічну активність клітин, оскільки РНК безпосередньо пов'язана з білковим синтезом, а стабільний рівень ДНК характеризує клітинну масу. Зниження співвідношення РНК/ДНК може свідчити про стрес, токсичне пригнічення біосинтетичних процесів або загальне виснаження організму.

У сучасних умовах екологічної нестабільності особливого значення набуває рання діагностика впливу забруднювальних чинників на гідробіонтів. Саме біоіндикація є одним із найбільш ефективних інструментів оцінювання стану водного середовища, що базується на вивченні реакцій живих організмів на зміни

в довкіллі (Грубінко, 2005a; Yatsenko et al., 2017).

Серед усіх гідробіонтів риби часто використовуються як біоіндикатори, оскільки мають високу чутливість до змін у складі води, зокрема до наявності токсикантів різної природи (Мехед, 2013a; Ніколаєнко та ін., 2023). Особливо небезпечними для риб є ксенобіотики, що надходять у водойми із промисловими та сільськогосподарськими стоками. Відомо, що ці сполуки можуть спричиняти сублетальні зміни, які важко зафіксувати традиційними методами (Мусієнко та ін., 2005; Полотнянко і Мехед, 2023b).

На цьому тлі особливу увагу дослідників привертають молекулярно-біохімічні маркери, зокрема кількісний вміст нуклеїнових кислот (ДНК і РНК) у тканинах риб. Співвідношення РНК/ДНК вважається інформативним показником метаболічної активності та загального фізіологічного стану організму, адже РНК безпосередньо пов'язана з білковим синтезом, а ДНК є маркером клітинної маси (Lowry et al., 1951; Polotnianko et al., 2024). Раніше вже було доведено, що мікотоксини (зокрема, T2 й афлатоксин B1), важкі метали, гербіциди та ПАР можуть впливати на нуклеїновий гомеостаз у тканинах риб, змінювати рівень транскрипції та активність рибосом (Апецько та ін., 2021; Матюшко і Мехед, 2024). Отже, актуальність дослідження зумовлена потребою в чутливих біомаркерах для виявлення сублетальних ефектів токсикантів. Ця робота спрямована на з'ясування змін вмісту нуклеїнових кислот у різних тканинах *Carassius carassius* під впливом токсикантів з метою оцінювання фізіологічного стану організмів і обґрунтування доцільності використання показника РНК/ДНК як біоіндикатора.

Токсин T2 – один із найбільш токсичних представників трихотеценових мікотоксинів, продукується грибами роду *Fusarium*. Його механізм дії пов'язаний із пригніченням синтезу білків на рівні рибосом, що спричиняє глибокі порушення метаболізму. У риб T2 токсин спричиняє дегенеративні зміни у тканинах, зменшення вмісту РНК, пригнічення ферментативної активності, імунодефіцит і зміни кровотворення (Желай та ін., 2023a; Мехед, 2024). Навіть у малих дозах він впливає на морфологічні показники та розвиток молоді риб. Афлатоксин B1 – один із най-

сильніших природних гепатотоксинів, синтезується грибами роду *Aspergillus*. У риб діє переважно на печінку, спричиняє некротичні зміни, порушення білкового й енергетичного обміну, накопичення вільних радикалів. Відомий своєю канцерогенністю та мутагенністю, навіть у незначних концентраціях призводить до функціональних порушень організму (Матюшко і Мехед, 2024). Сvineць належить до важких металів, а його сполуки здатні кумулюватися у тканинах гідробіонтів, чинячи токсичну дію. Найбільше накопичення відбувається в печінці, нирках, зябрах і мозку. Сvineць здатен інгібувати ферменти, заміщати кальцій у клітинах, спричиняти оксидативний стрес, пошкодження ДНК, пригнічення росту й репродукції. Особливо чутливими до свинцю є молоді особини, у яких він спричиняє деформації та затримку розвитку (Грубінко, 2005a; Мехед, 2013a). Зенкор – гербіцид на основі метрибузину, широко застосовується в сільському господарстві. Після потрапляння у водойми спричиняє деструкцію клітинних мембран, порушення фотосинтезу у водоростей, а в риб – ураження зябер, печінки, зниження активності антиоксидантних систем. Хоча Зенкор вважається «помірно токсичним», у разі хронічної дії він здатен спричиняти накопичення токсичних метаболітів і зміну вмісту РНК/ДНК (Апецько та ін., 2021). Натрій лаурилсульфат (далі – ЛСН) – поверхнево-активна речовина, що входить до складу миючих засобів. У водному середовищі діє як детергент, який руйнує ліпідні мембрани клітин. У риб спричиняє ушкодження зябер, зниження дихальної ефективності, а також пригнічення синтезу білків і нуклеїнових кислот. Хоча ЛСН швидко розкладається в середовищі, його короткотривалий вплив може бути критичним для ембріонів і мальків (Мусієнко та ін., 2005).

У контексті вивчення токсичного впливу ксенобіотиків на водні організми все більшу увагу приділяють біохімічним показникам як чутливим маркерам фізіологічного стану гідробіонтів. В.В. Грубінко у своїх працях окреслив концепцію інтегрального оцінювання токсичного ураження в біологічних системах і заклавав основи системного підходу до аналізу метаболічних адаптацій у гідробіонтів (Грубінко, 2005b). Подібні біохімічні підходи застосовуються і в дослідженнях,

присвячених діагностиці дії забруднювачів на рибу. Зокрема, А.М. Апецько та співавтори дослідили зміни біохімічних показників у тканинах коропа лускатого під впливом гербіцидів у поєднанні із солями цинку, виявили значне зниження активності ферментів і метаболічних параметрів (Мекед, 2013b; Апецько та ін., 2021). Підтвердженням цього слугують результати дослідження І.С. Пантюшенко, О.Б. Мекед, О.П. Третьяка, які проаналізували нюанси нуклеїнового гомеостазу в цьогорічці коропа за токсичних умов утримання (Пантюшенко та ін., 2012).

Особливу увагу науковців привернули мікотоксини, які є поширеними природними забруднювачами кормів. Вплив токсину Т2 на іхтіологічні показники, морфологічний стан і вміст аденілатів у тканинах карпових риб було продемонстровано в низці досліджень (Желай та ін., 2023a; Матюшко і Мекед, 2024; Мекед, 2024). Останні дослідження підкреслюють зростання актуальності використання біомаркерів для оцінювання впливу забруднювачів на водні екосистеми. Риби, як важливі компоненти цих систем, часто використовуються для моніторингу стану навколишнього середовища, оскільки вони реагують на зміни у водному середовищі на різних рівнях біологічної організації.

Зокрема, нуклеїнові кислоти (ДНК та РНК) та їх співвідношення все частіше розглядаються як чутливі біомаркери токсичної дії (Gilbey et al., 2021). Зміни у вмісті нуклеїнових кислот можуть вказувати на фізіологічний стрес, порушення синтезу білка та загальні метаболічні зрушення в організмі риб під впливом різноманітних токсикантів (Stat et al., 2019).

Вплив забруднювачів на генетичний апарат водних організмів є ключовим аспектом екоотоксикологічних досліджень. Дослідження показують, що вплив екологічних забруднювачів може призводити до генотоксичних і гістопатологічних змін у риб, що підкреслює важливість цих показників для оцінювання стану здоров'я популяцій (Marques et al., 2021).

Для всебічного оцінювання впливу забруднення водного середовища застосовуються інтегровані мультибіомаркерні підходи. Вони дозволяють отримати повнішу картину реакції організму риб на стресові фактори, ніж використання одного біомаркера (Pawlowski et al., 2021).

Сучасні дослідження надають глибоке розуміння екоотоксикологічних ефектів нових забруднювачів на водні організми, відкривають нові перспективи для біоіндикації (Veilleux et al., 2021).

Інші автори також досліджували морфологічні порушення в риб за дії ксенобіотиків (Мусієнко та ін., 2005) та забруднення водного середовища (Ніколаєнко та ін., 2023). Окремі роботи акцентують на використанні співвідношення РНК/ДНК як показника росту та фізіологічної активності, що добре узгоджується із класичними методами білкового аналізу (Lowry et al., 1951). Окрім того, у низці досліджень підкреслено гігієнічні та токсикологічні аспекти використання гідробіонтів у харчових ланцюгах (Yatsenko et al., 2017).

Отже, літературні джерела підтверджують, що біохімічний аналіз нуклеїнових кислот, зокрема РНК/ДНК, є обґрунтованим, перспективним і універсальним підходом у системах біоіндикації, особливо в умовах забруднення водного середовища різного походження.

Метою досліджень є вивчення особливостей впливу токсикантів на динаміку зміни вмісту нуклеїнових кислот в органах карася звичайного.

Матеріал і методи

Дослідження проводили на двохрічках карася звичайного (*Carassius carassius*) вагою 250–350 г, відібраних із контрольної водойми на території Київської області, 50°56'52.0"N 29°55'47.7"E (штучна водойма без відомих джерел техногенного навантаження). Досліди проводилися в модельних умовах в акваріумах об'ємом 200 дм³, де рибу розміщували з розрахунку 1 екземпляр на 40 дм³ води. В експерименті риби групами по 5 особин були в шести варіантах, як-от: контроль (фізіологічні умови утримання, без додавання токсичних речовин), за дії мікотоксину Т2 (2 мг/дм³), афлатоксину В1 (1 мг/дм³), Зенкору (3 мг/дм³), солі свинцю (5 мг/дм³) у перерахунку на іон і натрій лаурилсульфату (2 мг/дм³). Для аналізу використовували зразки печінки, м'язової тканини, зябер і мозку. Загальна кількість тварин – 30 екземплярів. Риби витримувались в умовах досліду протягом 14 діб. Температура води коливалася в межах +15 – +16°C, вміст розчиненого кисню був у межах фізіологічної норми (5–7 мг/дм³) (Bulbul et al., 2022). Воду змінювали кожні

3 доби. Після закінчення експерименту рибу піддавали евтаназії методом декапітації згідно з етичними принципами поводження із тваринами (World ..., 2001).

Визначення кількості ДНК та РНК здійснювалося спектрофотометричним методом, екстинції визначали для РНК за 260 і 286 нм, для ДНК за 268 і 284 нм. Співвідношення РНК/ДНК розраховувалося з метою оцінювання метаболічної активності організмів, як це описано у праці К.С. Афанасьєвої, М.І. Чопей (Афанасьєва і Чопей, 2024).

Отримані дані оброблялися методами варіаційної статистики з використанням програмного забезпечення "Statistica 10.0". Статистична достовірність відмінностей між контрольною та експериментальними групами визначалася за критерієм Стюдента (t-тест). Результати вважалися достовірними за $p < 0,05$.

Результати та їх обговорення

У процесі експериментального дослідження було визначено кількісний вміст

нуклеїнових кислот (ДНК, РНК) та співвідношення РНК/ДНК у чотирьох типах тканин карася звичайного – мозку, білих м'язах, печінці та зябрах – за умов впливу різних ксенобіотиків: мікотоксину Т2, мікотоксину В1, солі свинцю, гербіциду Зенкор і натрію лаурилсульфату. Результати нашого дослідження наведено в таблиці 1.

Аналіз вмісту нуклеїнових кислот у тканинах *Carassius carassius* в умовах впливу різних токсикантів продемонстрував зміни біохімічних показників залежно від тканини та використаної токсичної речовини. Найбільш стабільним виявився рівень ДНК, що змінювався несуттєво (не більше ніж 10%) незалежно від умов експозиції. Це може свідчити про збереження клітинної структури та відсутність масштабної загибелі клітин.

Натомість рівень РНК знижувався значно, що вказує на пригнічення транскрипційної активності та синтезу білків. Насуттєвіше зменшення цього показника

Таблиця 1

Вміст нуклеїнових кислот і співвідношення РНК/ДНК у тканинах карася залежно від умов утримання, $M \pm m$ (мкг/г)

Умова/показник	Мозок	Білі м'язи	Печінка	Зябра
Контроль				
ДНК	$1,40 \pm 0,07$	$1,10 \pm 0,05$	$1,60 \pm 0,08$	$1,30 \pm 0,06$
РНК	$1,10 \pm 0,06$	$0,75 \pm 0,04$	$1,60 \pm 0,10$	$1,45 \pm 0,07$
РНК/ДНК	$0,79 \pm 0,04$	$0,68 \pm 0,03$	$1,00 \pm 0,05$	$1,12 \pm 0,06$
Мікотоксин Т2, 2 мг/дм ³				
ДНК	$1,30 \pm 0,08$	$1,00 \pm 0,06$	$1,50 \pm 0,09$	$1,20 \pm 0,07$
РНК	$0,80 \pm 0,05^*$	$0,45 \pm 0,03^*$	$0,90 \pm 0,06^*$	$0,75 \pm 0,04^*$
РНК/ДНК	$0,62 \pm 0,03^*$	$0,45 \pm 0,02^*$	$0,60 \pm 0,04^*$	$0,63 \pm 0,03^*$
Мікотоксин В1, 1 мг/дм ³				
ДНК	$1,35 \pm 0,07$	$1,05 \pm 0,05$	$1,55 \pm 0,08$	$1,25 \pm 0,06$
РНК	$0,90 \pm 0,06^*$	$0,55 \pm 0,04^*$	$1,10 \pm 0,07^*$	$1,05 \pm 0,05$
РНК/ДНК	$0,67 \pm 0,04^*$	$0,52 \pm 0,03^*$	$0,71 \pm 0,04^*$	$0,84 \pm 0,04^*$
Іони свинцю, 5 мг/дм ³				
ДНК	$1,30 \pm 0,08$	$1,00 \pm 0,06$	$1,50 \pm 0,10$	$1,20 \pm 0,07$
РНК	$0,75 \pm 0,05^*$	$0,50 \pm 0,03^*$	$0,85 \pm 0,06^*$	$0,70 \pm 0,04^*$
РНК/ДНК	$0,58 \pm 0,03^*$	$0,50 \pm 0,02^*$	$0,57 \pm 0,04^*$	$0,58 \pm 0,03^*$
Зенкор, 3 мг/дм ³				
ДНК	$1,33 \pm 0,07$	$1,03 \pm 0,05$	$1,55 \pm 0,07$	$1,23 \pm 0,06$
РНК	$0,85 \pm 0,05^*$	$0,52 \pm 0,03^*$	$1,00 \pm 0,06^*$	$0,90 \pm 0,05^*$
РНК/ДНК	$0,64 \pm 0,03^*$	$0,50 \pm 0,02^*$	$0,65 \pm 0,03^*$	$0,73 \pm 0,04^*$
Натрій лаурил сульфат, 2 мг/дм ³				
ДНК	$1,31 \pm 0,07$	$1,01 \pm 0,06$	$1,53 \pm 0,08$	$1,22 \pm 0,06$
РНК	$0,82 \pm 0,04^*$	$0,51 \pm 0,03^*$	$0,95 \pm 0,05^*$	$0,87 \pm 0,05^*$
РНК/ДНК	$0,63 \pm 0,03^*$	$0,51 \pm 0,02^*$	$0,62 \pm 0,03^*$	$0,71 \pm 0,04^*$

* – статистично вірогідно, $p < 0,05$.

виявлено за дії мікотоксину T2, який спричинив падіння РНК у тканинах печінки й м'язів майже в 1,8–2,2 рази щодо контролю. Подібний ефект, хоча дещо менш виражений, спостерігався за дії іонів свинцю. Це може пояснюватися високою токсичністю зазначених сполук і здатністю порушувати рибосомну активність.

У контрольній групі максимальний вміст РНК зафіксовано в печінці ($1,60 \pm 0,10$ мкг/г), що узгоджується з її ключовою роллю в обміні речовин. Також саме печінка демонструє найвище співвідношення РНК/ДНК ($1,00 \pm 0,05$), що вказує на високий рівень метаболічної активності у фізіологічно стабільних умовах.

Під впливом мікотоксину T2 в усіх тканинах спостерігається достовірне зниження РНК ($p < 0,05$), найсильніше – у печінці та білих м'язах, зниження майже на 44 та 40% відповідно. Це супроводжується зниженням співвідношення РНК/ДНК – на 40% ($p < 0,05$) та 34% ($p < 0,05$) щодо контролю, що свідчить про пригнічення білкового синтезу.

У результаті дослідження встановлено, що всі досліджені токсиканти спричиняли зниження вмісту РНК у тканинах карася порівняно з контролем, що свідчить про їхній негативний вплив на синтетичну активність клітин.

Мікотоксин B1, гербіцид Зенкор і натрій лаурилсульфат зумовили зниження вмісту РНК в межах 25–35% залежно від типу тканини. Найбільш виражене зниження спостерігалось в печінці та білих м'язах – тканинах із високим рівнем білкового метаболізму, що робить їх особливо чутливими до дії ксенобіотиків. Наприклад, за дії мікотоксину B1 у печінці рівень РНК знижувався приблизно на 31%, а в білих м'язах – на понад 26% щодо контролю. Попри меншу вираженість порівняно з T2, ефекти залишались статистично достовірними ($p < 0,05$).

Під впливом іонів свинцю зниження вмісту РНК сягало 45–50% у більшості тканин, з максимумом у печінці та білих м'язах. Це супроводжувалося суттєвим зниженням співвідношення РНК/ДНК, що свідчить про системну дію токсиканту та метаболічне пригнічення навіть у відносно стабільних тканинах, як-от мозок і зябра.

Гербіцид Зенкор спричинив достовірне зниження РНК у всіх досліджених тканинах, найпомітніше – у печінці та м'язах

(зниження на 30–35%). Подібну динаміку відзначено також для натрію лаурилсульфату, де вміст РНК у печінці та білих м'язах знижувався в середньому на 33% ($p < 0,05$).

Зменшення вмісту ДНК було незначним (менш ніж 10%) і статистично недовірливим, що свідчить про збереження цілісності клітинного ядра. Це дозволяє зробити висновок, що основним ефектом токсикантів було порушення синтетичної функції клітин, а не цитоліз чи зменшення клітинної маси.

Інтегральний показник – співвідношення РНК/ДНК – знижувався в усіх експериментальних групах. Найбільше зниження спостерігалось в білих м'язах під дією мікотоксину T2 (на 34%) та іонів свинцю (на 26%). У печінці співвідношення РНК/ДНК зменшувалося на 35–40% ($p < 0,05$), що свідчить про глибоке пригнічення білкового синтезу в метаболічно активних тканинах.

У мозку та зябрах зниження рівня РНК і співвідношення РНК/ДНК було менш вираженим (на 15–20%), однак достовірним, що вказує на системний, хоча і помірніший, вплив токсикантів на відносно резистентні тканини нервової та дихальної систем.

Отримані результати підтверджують, що рівень РНК та співвідношення РНК/ДНК є чутливими маркерами токсичної дії ксенобіотиків. Їхні зміни у тканинах з високим метаболізмом можуть бути використані як ранні індикатори метаболічного пригнічення за дії екзогенних забруднювачів.

Усі токсиканти спричиняли порушення нуклеїнового обміну зі збереженням порівняно стабільного рівня ДНК, що дозволяє інтерпретувати зниження співвідношення РНК/ДНК як індикатор пригнічення синтетичних процесів. Найбільш значущі зміни зафіксовано за дії мікотоксину T2 та іонів свинцю, що свідчить про високу чутливість тканин карася до цих чинників.

Отримані дані демонструють чіткі зміни в нуклеїновому гомеостазі тканин карася звичайного під впливом досліджуваних токсикантів. Стабільність рівня ДНК за помітних коливань РНК та співвідношення РНК/ДНК свідчить про те, що саме ці показники є більш чутливими до гострої токсичної дії і можуть виступати як ранні індикатори фізіологічного стресу. Зокрема, значне зниження вмісту

РНК та співвідношення РНК/ДНК, відзначене в печінці та м'язах під впливом мікотоксину Т2 та іонів свинцю, вказує на суттєве пригнічення синтетичних процесів і метаболічної активності в цих органах, що є прямою відповіддю на токсичне навантаження.

Ці результати підтверджують гіпотезу, що зміни вмісту нуклеїнових кислот у тканинах карася є високопотенційним маркером для біоіндикації токсичної дії водного середовища. Чутливість показника РНК/ДНК до дії різних за природою забруднювачів (мікотоксинів, металів, гербіцидів, ПАР) демонструє його універсальність та придатність для моніторингу широкого спектра ксенобіотиків. Отже, інтеграція аналізу нуклеїнових кислот у програми екологічного моніторингу дозволить отримати оперативну та точну інформацію про рівень забруднення та його вплив на водні біоти, сприятиме розробленню більш ефективних стратегій захисту водних екосистем

Висновки

Проведене дослідження засвідчило, що у тканинах і органах карася під впливом низки ксенобіотиків (мікотоксини Т2 і В1, іони Pb^{2+} , гербіцид Зенкор, натрій лаурилсульфат) відбувається статистично досто-

вірне зниження вмісту РНК у всіх досліджених структурах. Найбільш виражені зміни зафіксовано в печінці та білих м'язах – метаболічно активних тканинах, що вирізняються підвищеною чутливістю до токсичної дії. У цих органах рівень РНК знижувався на 30–50% залежно від характеру токсиканта, що супроводжувалося зменшенням співвідношення РНК/ДНК на 25–40%. Концентрація ДНК змінювалася неістотно ($\leq 10\%$ від контрольних значень) і статистично недостовірно, що свідчить про збереження клітинної цілісності та відсутність масового цитолізу.

Зниження співвідношення РНК/ДНК, яке відображає загальну метаболічну активність, виявилось чітко вираженим у всіх експериментальних групах, особливо під дією мікотоксину Т2 й іонів свинцю, де цей показник наближався до критично низьких значень. Отримані результати дають підстави розглядати рівень РНК та співвідношення РНК/ДНК як інформативні біомаркери раннього прояву токсичної дії ксенобіотиків. Їх застосування в біоіндикаційних дослідженнях є перспективним для оцінювання якості водного середовища, екологічного моніторингу та збереження здоров'я гідробіонтів.

Список використаної літератури

- Апецько А.М., Симонова Н.А., Мехед О.Б. Зміни біохімічних показників в органах та тканинах коропа лускатого *Cyprinus carpio* L. за дії гербіцидів у поєднанні із солями цинку. *Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології* : збірник наукових праць. Харків, 2021. С. 9–13.
- Афанасьєва К.С., Чопей М.І. Сучасні методи молекулярної біології. Київ : КНУ імені Т.Г. Шевченка, 2024. 129 с.
- Грубішко В.В. Інтегральна оцінка токсичного ураження у біологічних системах. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія «Біологія». 2005а. № 3. С. 111–114.
- Грубішко В.В. Системна оцінка метаболічних адаптацій у гідробіонтів. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія «Біологія». 2005б. № 2. С. 36–39.
- Желай М.В., Полотнянко А.В., Ячна М.Г., Мехед О.Б., Третьак О.П. Вплив мікотоксину Т2 на іхтіологічні показники коропових риб. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія «Біологія». 2023а. Т. 84. № 1. С. 35–40. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.1.5>.
- Желай М.В., Ячна М.Г., Мехед О.Б., Третьак О.П. Адаптивні зміни іхтіологічних показників коропових риб за дії мікотоксину Т2. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату* : збірник наукових праць. Чернівці, 2023б. С. 77–78.
- Матюшко С.М., Мехед О.Б. Зміни вмісту аденілатів у тканинах коропа за дії мікотоксину Т2. *Biota. Human. Technology*. 2024. № 3. С. 78–83. <https://doi.org/110.58407/bht.3.24.5>.
- Мехед О.Б. Вплив мікотоксину Т2 на деякі біохімічні показники гідробіонтів. *Молюски: результати, проблеми і перспективи досліджень* : збірник наукових праць. Житомир, 2024. С. 19–21.
- Мехед О.Б. Вплив токсикантів різної хімічної природи на вміст нуклеїнових кислот в організмі коропа різного віку. *Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології* : збірник наукових праць. Тернопіль, 2013а. С. 203–205.

Мехед О.Б. Вміст нуклеїнових кислот в органах та тканинах коропа залежно від умов утримання. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія «Біологія». 2013b. № 3 (56). С. 73–78.

Мусієнко Н.Г., Жиденко А.О., Мехед О.Б., Коваленко О.М. Вплив пестицидів на морфологічні показники коропа. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка*. Серія «Біологія». 2005. № 3 (26). С. 319–321.

Ніколаєнко Т.М., Іващенко М.О., Іващенко Н.В., Мехед О.Б. Адаптивні зміни показників крові коропа лускатого (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) як відповідь на забруднення води. *Природні ресурси прикордонних територій в умовах зміни клімату* : збірник наукових праць. Чернівці, 2023. С. 99–100.

Пантюшенко І.М., Мехед О.Б., Третяк О.П. Особливості нуклеїнового гомеостазу цьогорічки коропа за токсичних умов утримання. *Екологічний інтелект – 2012* : збірник наукових праць. Дніпропетровськ, 2012. С. 63–65.

Полотнянко Л.В., Мехед О.Б. Зміни біохімічних показників у тканинах коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.) під дією мікотоксину Т2. *Актуальні проблеми дослідження довкілля* : збірник наукових праць. Суми, 2023а. С. 205–207.

Полотнянко Л.В., Мехед О.Б. 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* : збірник наукових праць. Чернівці, 2023b. С. 105–106.

Gilbey J., Carvalho G., Castilho R., Coscia I., Coulson M.W., Dahle G., Derycke S., Francisco S.M., Helyar S.J., Johansen T., Junge C., Layton K.K., Martinsohn J., Matejusova I., Robalo J.I., Rodriguez-Ezpeleta N., Silva G., Strammer I., Vasemägi A., Volckaert F.A. Life in a drop: Sampling environmental DNA for marine fishery management and ecosystem monitoring. *Marine Policy*. 2021. № 124. P. 104331–104331. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104331>.

Lowry O., Rosebrough N., Farr A., Randall R. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal Biological Chemistry*. 1951. № 193. P. 265–275.

Marques V., Milhau T., Albouy C., Dejean T., Manel S., Mouillot D., Juhel J. GAPeDNA: Assessing and mapping global species gaps in genetic databases for eDNA metabarcoding. *Diversity and Distributions* / T. Dutta (Ed.). 2021. № 27 (10). P. 1880–1892. <https://doi.org/10.1111/ddi.13142>.

Pawlowski J., Bonin A., Boyer F., Cordier T., Taberlet P. Environmental DNA for biomonitoring. *Molecular Ecology*. 2021. № 30 (13). P. 2931–2936. <https://doi.org/10.1111/mec.16023>.

Polotnianko L., Mekhed O. Changes in the morphological indicators of carp under the action of mycotoxin T2. *Biota. Human. Technology*. 2024. № 3. P. 69–76. <https://doi.org/10.58407/bht.3.24.4>.

Stat M., John J., DiBattista, J.D., Newman S.J., Bunce M., Harvey E.S. Combined use of eDNA metabarcoding and video surveillance for the assessment of fish biodiversity. *Conservation Biology*. 2019. № 33 (1). P. 196–205. <https://doi.org/10.1111/cobi.13183>.

Yatsenko I.V., Bohatko N.M., Bulgakova N.V. Hygiene and expertise of food hydrobionts and their processing products. Part 1 : Hygiene and expertise of fishery products : A textbook. Kharkiv : Disa Plus, 2017. 168 p.

Veilleux H.D., Misutka M.D., Glover C.N. Environmental DNA and environmental RNA: Current and prospective applications for biological monitoring. *Science of the Total Environment*. 2021. № 782. P. 146891–146891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146891>.

World Medical Association. World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *Bulletin of the World Health Organization*. 2001. № 79 (4). P. 373–374. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/268312>.

References

Apetsko, A.M., Symonova, N.A., & Mekhed, O.B. (2021). Zminy biokhimichnykh pokaznykiv v orhanakh ta tkanynakh koropa luskatogo *Cyprinus carpio* L. za dii herbicidiv v poiednanni iz soliamy tsynku [Changes in biochemical parameters in organs and tissues of scaly carp *Cyprinus carpio* L. under the influence of herbicides combined with zinc salts]. *Zbirnyk naukovykh prats "Suchasni problemy teoretychnoi i praktychnoi ikhtiolohii"* [Collection of scientific works "Modern problems of theoretical and practical ichthyology"], Kharkiv, 9–13 [in Ukrainian].

Afanasieva, K.S., & Chopei, M.I. (2024). Suchasni metody molekuliarnoi biolohii [Modern methods of molecular biology]. Kyiv, Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Ukrainian].

Grubinko, V.V. (2005). Integralna otsinka toksychnoho urazhennia u biolohichnykh systemakh [Integral assessment of toxic damage in biological systems]. *Naukovi zapysky TNPU. Serii: Biologiya*, 3, 111–114 [in Ukrainian].

Grubinko, V.V. (2005). Systemna otsinka metabolichnykh adaptatsii u hidrobiontiv [Systemic assessment of metabolic adaptations in hydrobionts]. *Naukovi zapysky TNPU. Serii: Biologiya*, 2, 36–39 [in Ukrainian].

Zhelai, M.V., Polotnianko, L.V., Yachna, M.H., Mekhed, O.B., & Tretiak, O.P. (2023). Vplyv mikotoksynu T2 na ikhtiologichni pokaznyky koropovykh ryb [Influence of mycotoxin T2 on ichthyological parameters of carp fish]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biologiya* [Scientific notes of TNPU. Series: Biology], 84 (1), 35–40 [in Ukrainian].

Zhelai, M., Yachna, M., Mekhed, O., & Tretiak, O. (2023). Adaptivni zminy ikhtiologichnykh pokaznykiv koropovykh ryb za dii mikotoksynu T2 [Adaptive changes in ichthyological parameters of carp fish under the action of mycotoxin T2]. *Zbirnyk naukovykh prats "Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu"* [Collection of scientific works "Natural resources of border areas in the context of climate change"]. Chernihiv, 77–78 [in Ukrainian].

Matiushko, S., & Mekhed, O. (2024). Zminy vmistu adenilativ v tkanynakh karpa za dii mikotoksynu T2 [Changes in adenylate content in carp tissues under the action of mycotoxin T2]. *Biota. Human. Technology* [Biota. Human. Technology], 3, 78–83. <https://doi.org/110.58407/bht.3.24.5> [in Ukrainian].

Mekhed, O.B. (2024). Vplyv mikotoksynu T2 na deiaki biokhimichni pokaznyky hidrobiontiv [Influence of mycotoxin T2 on some biochemical parameters of hydrobionts]. *Zbirnyk naukovykh prats "Moliusky: rezultaty, problemy i perspektivy doslidzhen"* [Collection of scientific works "Mollusks: results, problems and research prospects"]. Zhytomyr, 19–21 [in Ukrainian].

Mekhed, O.B. (2013). Vplyv toksykantiv riznoi khimichnoi pryrody na vmist nukleinovyykh kyslot v orhanizmi koropa raznoho viku [Influence of toxicants of different chemical nature on the content of nucleic acids in the body of carp of different ages]. *Zbirnyk naukovykh prats "Suchasni problemy teoretychnoi ta praktychnoi ikhtiologii"* [Collection of scientific works "Modern problems of theoretical and practical ichthyology"]. Ternopil, 203–205 [in Ukrainian].

Mekhed, O.B. (2013). Vmist nukleinovyykh kyslot v orhanakh ta tkanynakh koropa zalezho vid umov utrymanna [Content of nucleic acids in organs and tissues of carp depending on keeping conditions]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biologiya* [Scientific notes of TNPU. Series: Biology], 3 (56), 73–78 [in Ukrainian].

Musiienko, N.H., Zhydenko, A.O., Mekhed, O.B., & Kovalenko, O.M. (2005). Vplyv pestytsydiv na morfolohichni pokaznyky koropa [Influence of pesticides on morphological parameters of carp]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biologiya* [Scientific notes of TNPU. Series: Biology], 3 (26), 319–321 [in Ukrainian].

Nikolaenko, T., Ivashchenko, M., Ivashchenko, N., & Mekhed, O. (2023). Adaptivni zminy pokaznykiv krove koropa luskatogo (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) yak vidpovid na zabrudnennia vody [Adaptive changes in blood parameters of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) as a response to water pollution]. *Zbirnyk naukovykh prats "Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii v umovakh zminy klimatu"* [Collection of scientific works "Natural resources of border areas in the context of climate change"]. Chernihiv, 99–100 [in Ukrainian].

Pantiushenko, I.M., Mekhed, O.B., & Tretiak, O.P. (2012). Osoblyvosti nukleinovoho homeostazu tsohorichky koropa za toksychnykh umov utrymanna [Features of nucleic homeostasis of this year's carp under toxic keeping conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats "Ekologichni intelekt – 2012"* [Collection of scientific works "Ecological Intelligence – 2012"]. Dnipropetrovsk, 63–65 [in Ukrainian].

Polotnianko, L.V., & Mekhed, O.B. (2023). Zminy biokhimichnykh pokaznykiv v tkanynakh koropa luskatogo (*Cyprinus carpio* L.) pid dieiu mikotoksynu T2 [Changes in biochemical parameters in tissues of scaly carp (*Cyprinus carpio* L.) under the action of mycotoxin T2]. *Zbirnyk naukovykh prats "Aktualni problemy doslidzhennia dovkillia"* [Collection of scientific works "Current issues in environmental research"]. Sumy, 205–207 [in Ukrainian].

Polotnianko, L., & Mekhed, O. (2023). Nakopychennia mikotoksyniv u m'iazakh koropa luskatogo (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) pry zghodovuvanni kormu, kontaminovanoho T2-toksynom [Accumulation of mycotoxins in the muscles of scaly carp (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758) when fed T2-toxin contaminated feed]. *Zbirnyk naukovykh prats "Pryrodni resursy prykordonnykh terytorii"*

v umovakh zminy klimatu” [Collection of scientific works “Natural resources of border areas in the context of climate change”]. Chernihiv, 105–106 [in Ukrainian].

Gilbey, J., Carvalho, G., Castilho, R., Coscia, I., Coulson, M.W., Dahle, G., Derycke, S., Francisco, S.M., Helyar, S.J., Johansen, T., Junge, C., Layton, K.K., Martinsohn, J., Matejusova, I., Robalo, J.I., Rodríguez-Ezpeleta, N., Silva, G., Strammer, I., Vasemägi, A. & Volckaert, F.A. (2021). Life in a drop: Sampling environmental DNA for marine fishery management and ecosystem monitoring. *Marine Policy*, 124, 104331–104331. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104331> [in English]

Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A. & Randall, R. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal Biological Chemistry*. 193: 265–275 [in English].

Marques, V., Milhau, T., Albouy, C., Dejean, T., Manel, S., Mouillot, D., & Juhel, J. (2021). GAPeDNA: Assessing and mapping global species gaps in genetic databases for eDNA metabarcoding. In: Dutta, T. (Ed.), *Diversity and Distributions*, 27 (10), 1880–1892. <http://doi.org/10.1111/ddi.13142> [in English].

Pawlowski, J., Bonin, A., Boyer, F., Cordier, T., & Taberlet, P. (2021). Environmental DNA for biomonitoring. *Molecular Ecology*, 30 (13), 2931–2936. <http://dx.doi.org/10.1111/mec.16023> [in English].

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> [in English].

Stat, M., John, J., DiBattista, J.D., Newman, S.J., Bunce, M., & Harvey, E.S. (2019). Combined use of eDNA metabarcoding and video surveillance for the assessment of fish biodiversity. *Conservation Biology*, 33 (1), 196–205. <http://dx.doi.org/10.1111/cobi.13183> [in English].

Yatsenko, I.V., Bohatko, N.M., & Bulgakova, N.V. (2017). Hygiene and expertise of food hydrobionts and their processing products. Part 1. Hygiene and expertise of fishery products: A textbook. Kharkiv: Disa-Plus [in English].

Veilleux, H.D., Misutka, M.D., & Glover, C.N. (2021). Environmental DNA and environmental RNA: Current and prospective applications for biological monitoring. *Science of the Total Environment*, 782, 146891–146891. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146891> [in English].

World Medical Association (2001). World Medical Association Declaration of Helsinki. Ethical principles for medical research involving human subjects. *Bulletin of the World Health Organization*, 79 (4), 373–374. <https://iris.who.int/handle/10665/268312> [in English].

Отримано: 28.04.2025

Прийнято: 17.09.2025

Опубліковано: 17.10.2025

