

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ ТВАРИН

УДК 546.732: (597.551.2+597.552.1): 612.397

В.С. МАРКІВ, аспірант,

Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка,
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027, Україна
e-mail: viktor.markiv@tnpu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1294-7827

В.О. ХОМЕНЧУК, к. б. н, доцент,

Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка,
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027, Україна
e-mail: khomenchuk@tnpu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0500-6754

В.З. КУРАНТ, д. б. н, проф.,

Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка,
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027, Україна
e-mail: kurant@tnpu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3349-046X

ВПЛИВ ПІДВИЩЕНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ІОНІВ КОБАЛЬТУ НА ВМІСТ НЕПОЛЯРНИХ ЛІПІДІВ У ТКАНИНАХ ПРІСНОВОДНИХ РИБ

Досліджено вміст загальних ліпідів та їхніх окремих неполярних фракцій у зябрах, печінці та м'язах карася сріблястого (*Carassius gibelio* Bloch.) та щуки звичайної (*Esox lucius* L.) за дії 0,1 мг/дм³ і 0,25 мг/дм³ іонів кобальту протягом 14 діб. Встановлено, що динаміка ліпідного профілю у тканинах риб за токсичного впливу залежить від природи та концентрації металу у воді, а також має видову та тканинну специфіку. Відмічено загальну тенденцію до зростання вмісту загальних ліпідів у печінці риб та його зниження у м'язах, що зумовлено перерозподілом ліпідних резервів. У печінці риб виявлено зменшення частки фосfolіпідів та триацилгліцеролів, зростання вмісту холестеролу та продуктів гідролізу ліпідів. Зміни в ліпідних профілях зябер були більш відчутними у щуки, особливо за високих концентрацій іонів кобальту (0,25 мг/дм³). Зміни вмісту неполярних ліпідів у м'язах риб за інтоксикації іонами кобальту мали спільні тенденції: зниження вмісту триацилгліцеролів та зростання частки неестерифікованих жирних кислот. Як у карася, так і у щуки мало місце зниження співвідношення холестерол/фосfolіпідів у зябрах за дії обох концентрацій іонів кобальту, тоді як у печінці та м'язах цей показник достовірно зростав тільки у карася.

Ключові слова: карась сріблястий, щука звичайна, ліпіди, кобальт.

Важкі метали є одними з основних антропогенних забруднювачів водного середовища у світових масштабах. Швидкий темп урбанізації, ін-

Ц и т у в а н н я: Марків В.С., Хоменчук В.О., Курант В.З. Вплив підвищених концентрацій іонів кобальту на вміст неполярних ліпідів у тканинах прісноводних риб. *Гідробіол. журн.* 2025. Т. 61, № 4. С. 74—86.

дустриалізації та модернізації сільського господарства сприяє вивільненню важких металів з їхніх сполук та потраплянню у водні екосистеми. Всі вони є токсичними вище певних порогових концентрацій і можуть викликати фізіологічний стрес у гідробіонтів [26]. Деякі важкі метали мають здатність до біоаккумуляції, а їхні концентрації в біоті можуть зростати до токсичних рівнів, що наражає на небезпеку різноманітні види водних тварин, особливо ті які знаходяться на вершині харчової піраміди [6, 12].

Риби мають здатність накопичувати значну кількість важких металів, що насамперед залежить від їхньої концентрації та форми знаходження у воді [19]. Вони широко використовуються для оцінки якості водного середовища, тому що постійно населяють товщу води, яка приймає та інтегрує хімічні, фізичні та біологічні чинники [6].

Відомо, що організм гідробіонтів, зокрема риб, має багато засобів біохімічної адаптації різного ступеня складності, які дозволяють йому успішно пристосовуватися до дії токсикантів, у тому числі металів [30]. Важкі метали можуть стимулювати надмірне утворення активних форм кисню в організмі риб, що призводить до порушення окисно-відновного балансу та структури ліпідів, які є основними компонентами біологічних мембран [19]. Ліпіди впливають на проникність мембран, беруть участь у передачі нервового імпульсу, створюють міжклітинні контакти, виконують функції вторинних месенджерів [5, 26]. Особливості метаболізму ліпідів, включно з процесами транспортування та депонування, у риб інші, ніж у ендотермних тварин [31].

Кобальт є важливим біогенним елементом, який у певних концентраціях необхідний для життєдіяльності організму як тварин, так і людини. Він входить до складу низки ферментів, таких як дегідрогенази, дегідратази, гідратази, мутази, трансферази [23]. Фізіологічна роль іонів Co^{2+} для риб полягає у тому, що він є необхідним компонентом вітаміну B_{12} , який активує процеси кровотворення [9]. Крім того цей метал виконує роль метилуючого агента, бере участь у реакціях гліколізу і циклу трикарбонових кислот, синтезі ДНК, амінокислот, жирних кислот, а також впливає на ріст риб [15].

Природні концентрації кобальту у воді є досить низькими (0,04—8,0 мкг/дм³), але вони можуть зростати вище гранично допустимих у забруднених водоймах (понад 3 мг/дм³) [2, 3]. Надходження кобальту до організму риб, в основному, здійснюється через зябра, кишківник та шкіру [9, 36, 37], після чого через кровотік цей метал може надходити до різних органів, таких як печінка, нирки, м'язи [17]. При надходженні металу в організм риб вище фізіологічно необхідного рівня він може викликати низку токсичних ефектів. Проте досліджень щодо шкочинності даного металу недостатньо, що утруднює оцінку екологічних ризиків і розробку критеріїв якості води для цього металу.

З метою біоіндикації рівня забруднення водойм кобальтом та вивчення його токсичного впливу на гідробіонтів в нашому дослідженні ми зосередилися на аналізі динаміки вмісту та співвідношення фракцій ней-

тральних ліпідів у тканинах поширених прісноводних видів риб — карася сріблястого і щуки звичайної.

Матеріал і методика досліджень

Дослідження було проведено на карасі сріблястому — *Carassius gibelio* Bloch. та щуці звичайній — *Esox lucius* L. середньою масою відповідно 200—220 г і 150—170 г. В лабораторних умовах вивчали вплив на організм риб іонів кобальту у двох концентраціях 0,1 та 0,25 мг/дм³, що відповідають 2 та 5 гранично допустимим концентраціям. Метал вносили у воду 200-літрових акваріумів, де знаходилися дослідні групи риб (по п'ять особин у кожному), у вигляді $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. З метою зниження впливу на риб їхніх власних екзометаболітів воду в акваріумах змінювали щодобово. Для досягнення стану розвитку і максимального прояву компенсаторно-адаптивних реакцій до металу аклімацію риб здійснювали протягом 14 діб. Цей період, за даними авторів [25], є достатнім для формування адаптивних реакцій в організмі екзотермних тварин.

Для аналізу відбирали печінку, зябра та спинні м'язи. Тканини подрібнювали на холоді в скляному гомогенізаторі з наступним екстрагуванням загальних ліпідів сумішшю хлороформ:метанол у співвідношенні 2:1 за методом Фолча [13]. При цьому до однієї масової частини тканини додавали 20 частин екстрагуючої суміші і залишали на 12 год для екстракції. Домішки неліпідного складу видаляли з екстракту відмиванням 1%-вим розчином KCl . Кількість загальних ліпідів у тканині визначали ваговим методом після відгонки екстрагуючої суміші [21].

Розділення неполярних ліпідів здійснювали за методикою висхідної одномірної тонкошарової хроматографії на пластинках Merck, Німеччина. Перед роботою пластинки протягом 30 хв активували при температурі 105 °С в сушильній шафі. Отриманий хлороформний розчин ліпідів спочатку випаровували насухо, а потім розчиняли у 1 мл хлороформу. Одержані проби ліпідів наносили на пластинку мікродозатором в кількості 40 мкл розчину і поміщали їх у хроматографічні камери. Рухомою фазою служила суміш гексану, діетилового ефіру і льодяної оцтової кислоти у відношенні 70:30:1. Одержані хроматограми проявляли в камері, насиченій парами йоду [1]. Для ідентифікації окремих фракцій ліпідів використовували специфічні реагенти і очищені стандарти [21]. Кількість неполярних ліпідів визначали біхроматним методом [7], вміст фосфоліпідів — за кількістю неорганічного фосфору методом Васьковського [35].

Результати проведених досліджень статистично опрацьовували із використанням стандартного пакету Microsoft Office Excel.

Результати досліджень та їх обговорення

Аналіз загального вмісту ліпідів. Зміна параметрів водного середовища призводить до модуляції ліпідного профілю у гідробіонтів, що забезпечує підтримку їхньої життєдіяльності та виживання [22]. Особливістю метаболізму ліпідів у риб є значні коливання складу та інтенсивності на-

копичення жирів у організмі за впливу різних чинників [20]. Модифікації у складі ліпідів є компенсаторним механізмом, який забезпечує оптимальні функціональні можливості організму за різних умов. Характер розподілу загальних ліпідів у тканинах і органах риб залежить від виду, рухової активності, умов середовища, кормової бази, віку тощо [24].

Оскільки ліпіди зазнають швидкого розщеплення, повторного синтезу та взаємоперетворень у відповідь на зовнішні та внутрішні подразники, важливо одночасно аналізувати різні класи ліпідів у різних тканинах, щоб отримати чітке уявлення про зміни у метаболізмі ліпідів, спричинені забруднюючими речовинами [34].

Значні біохімічні зміни, пов'язані з вмістом жиру та жиркових компонентів, які викликані важкими металами, є більш небезпечними та можуть знизити плодючість, оскільки ліпіди відіграють важливу роль у розмноженні кісткових риб як джерело енергії та попередники стероїдів [34].

Аналіз отриманих результатів показав, що у стані активної життєдіяльності існує значна варіабельність загального вмісту ліпідів у тканинах досліджуваних прісноводних риб (табл. 1). За зростанням цього показника досліджуванні тканини можна розташувати в такому порядку: скелетні м'язи → зябра → печінка.

У зябрах досліджуваних видів риб загальний вміст ліпідів зазнавав достовірних змін лише за впливу 0,25 мг/дм³ іонів кобальту у щуки, де їх вміст — зменшувався на 39,4 % порівняно з контролем. Зябра є специфічною тканиною для запасання ліпідів, проте їхня кількість може зменшуватись у цій тканині за дії важких металів [14].

Печінка є важливим органом ліпідного обміну, де проходить синтез структурних ліпідів, а також процеси детоксикації у риб. Іони кобальту

Таблиця 1

Вміст загальних ліпідів у тканинах риб за дії іонів кобальту
(мг/г сирової тканини, $M \pm m$, $n = 5$)

Види риб	Контроль	0,1 мг/дм ³	0,25 мг/дм ³
Печінка			
Карась	17,84±1,13	22,85±0,99*	24,80±1,54*
Щука	49,84±4,83	53,49±2,99	47,24±4,56
Зябра			
Карась	19,84±0,83	19,35±1,53	21,34±0,92
Щука	19,55±0,77	20,31±1,58	11,84±0,77*
М'язи			
Карась	13,34±0,92	11,44±0,87*	8,46±0,63*
Щука	8,77±0,54	10,35±0,47	6,33±0,47*

Тут і в табл. 2—5: * — різниця вірогідна порівняно з контролем ($p < 0,05$).

можуть діяти як стресори, викликаючи окислювальний стрес і запускаючи компенсаторні метаболічні адаптації [18]. Отримані результати свідчать про дозозалежний характер впливу іонів кобальту на ліпідний склад печінки досліджуваних видів риб. Сумарний вміст ліпідів у печінці карася збільшився на 28,1 та 39,0 % відповідно при концентрації іонів кобальту 0,1 і 0,25 мг/дм³. У щуки було відмічено тенденцію до зростання даного показника за дії 0,1 мг/дм³ іонів кобальту та зменшення його — за впливу 0,25 мг/дм³. Збільшення кількості загальних ліпідів у печінці карася за дії обох концентрацій та у печінці щуки — за дії 0,1 мг/дм³, ймовірно, обумовлено активацією анаболічних процесів у цій тканині та мобілізацією ліпідів для адаптивних перебудов метаболізму [29].

Сумарний вміст ліпідів у м'язах карася достовірно знижувався за дії обох досліджуваних концентрацій іонів кобальту — відповідно на 14,2 і 36,6 % відносно контрольних значень. У м'язах щуки цей показник зменшився на 27,8 % лише за впливу 0,25 мг/дм³ іонів металу. Очевидно, що за інтоксикації іонами кобальту має місце перерозподіл ліпідних резервів між м'язами та печінкою. Крім того, зниження загального вмісту ліпідів у м'язах може бути зумовлено активацією іонами кобальту ліполізу та мобілізацією ліпідів як джерела енергії [4].

Отже, підвищені концентрації іонів кобальту призводили до перерозподілу та мобілізації ліпідних резервів, що передбачає також зміни їх фракційного складу у тканинах риб, для протидії токсичному чиннику.

Аналіз фракційного складу ліпідів. У результаті дослідження фракційного складу ліпідів зябер риб було виявлено підвищення вмісту фосфоліпідів (ФЛ) на 14,2 % за впливу 0,1 мг/дм³ іонів кобальту в щуки та на 19,6 і 27,3 % за дії обох концентрацій металу у карася (табл. 2). Такі зміни можна розглядати як адаптивну реакцію організму на підвищену концентрацію іонів кобальту, що призводить до структурних і функціональних змін біологічних мембран

За експозиції при обох концентраціях металу мала місце тенденція до зниження вмісту триацилгліцеролів (ТАГ) у зябрах обох видів риб, проте достовірними ці зміни були лише за дії 0,25 мг/дм³ іонів металу у зябрах щуки, коли частка ТАГ знижувалась на 22,8 %. Зниження вмісту ТАГ можна розглядати як адаптивну відповідь на вплив металу, тому що в стрес-умовах триацилгліцероли є універсальним джерелом енергії, необхідної для пом'якшення токсичної дії іонів металів [1].

Вміст холестеролу (ХЛ) знижувався у карася на 13,2 і 12,4 % та у щуки на 21,6 і 24,3 % відповідно при обох досліджуваних концентраціях іонів металу. Зменшення кількості цього компонента біліпідного шару та одночасне накопичення фосфоліпідів, ймовірно, сприяє збільшенню плинності біліпідного шару, що веде до зростання регуляторної активності інтегральних білків мембрани клітин зябер риб [38].

Зябра безпосередньо піддаються впливу металів, що може погіршити синтез ліпідів або ж посилити їх катаболізм. ТАГ і ХЛ можуть бути мобілізовані для того, щоб задовольнити енергетичні потреби або реагувати на структурні пошкодження, викликані окисним стресом [11]. Так,

за дії вищої концентрації металу (0,25 мг/дм³) спостерігалось достовірне зростання частки неестерифікованих жирних кислот (НЕЖК) у карася на 5,3 % та у щуки на 6,9 %, що, очевидно, зумовлено гідролізом ТАГ і ХЛ. Вміст моноацилгліцеролів (МАГ) та диацилгліцеролів (ДАГ) в зябрах риб практично не змінювався у дослідних групах щодо контролю за винятком зябер щуки, де за дії 0,25 мг/дм³ іонів кобальту кількість ДАГ зростала, а частка МАГ знижувалася.

Аналіз результатів фракційного складу ліпідів печінки показав (табл. 3), що за впливу обох досліджуваних концентрацій кобальту у карася та за дії 0,25 мг/дм³ іонів металу — у щуки встановлено достовірне зниження вмісту ФЛ відповідно на 16,7, 14,5 і 8,2 %. ФЛ є важливими складовими клітинної мембрани, і зниження їхнього вмісту може бути наслідком впливу металу на її архітектуру [34].

Також слід відмітити зменшення вмісту ТАГ у гепатоцитах карася за впливу 0,1 мг/дм³ кобальту на 17,6 % та у щуки за концентрації 0,25 мг/дм³ металу у воді на 25,2 %.

Опосередкованим підтвердженням деструкції ФЛ та ТАГ клітин печінки риб є загальна тенденція до накопичення кінцевих продуктів гідролізу цього процесу — НЕЖК та МАГ. Так, у карася і щуки за дії 0,25 мг/дм³ іонів кобальту відмічено зростання частки НЕЖК відповідно на 5,1 та 15,5 %. Кількість МАГ зростала на 49,3 % за дії 0,1 мг/дм³ у карася та на 39,0 і 91,7 % — за дії обох досліджуваних концентрацій іонів металу у щуки [33].

Таблиця 2

Фракційний склад неполярних ліпідів зябер риб за дії іонів кобальту
(%, $M \pm m$, $n = 5$)

Види риб	ТАГ	НЕЖК	ДАГ	ХЛ	МАГ	ФЛ
Карась						
Контроль	20,18± 0,28	36,97± 0,22	7,90± 0,34	12,20±0 ,45	6,64± 0,51	16,12± 0,47
0,1 мг/дм ³	18,22± 1,30	38,02± 1,60	8,00± 0,20	10,58± 0,30*	6,78± 0,23	18,41± 1,00*
0,25 мг/дм ³	19,02± 0,46	38,93± 0,58*	7,96± 0,27	10,69± 0,28*	6,91± 0,07	16,49± 0,15
Щука						
Контроль	20,98± 0,41	34,36± 0,31	2,57± 0,15	13,38± 0,24	4,68± 0,46	24,03± 0,93
0,1 мг/дм ³	19,32± 0,56	34,83± 1,11	2,35± 0,13	10,49± 0,56*	4,26± 0,36	28,74± 1,12*
0,25 мг/дм ³	16,20± 0,43*	36,72± 1,10*	3,17± 0,17*	10,13± 0,38*	3,20± 0,11*	30,59± 1,11*

П р и м і т к а. ТАГ — триацилгліцероли; НЕЖК — неестерифіковані жирні кислоти; ДАГ — диацилгліцероли; ХЛ — холестерол; МАГ — моноацилгліцероли; ФЛ — фосфоліпіди.

Зміни частки ХЛ за дії іонів кобальту носять видоспецифічний характер. За впливу обох досліджуваних концентрацій металу в карася встановлено достовірне збільшення вмісту ХЛ відповідно на 30,3 та 23,8 %. Такі зміни концентрації даного ліпиду у печінці риб, ймовірно, необхідні для забезпечення зростання в'язкості ліпідного бішару мембрани, з метою зменшення його проникності для іонів Co^{2+} . Адже ХЛ є важливим компонентом клітинних мембран, що синтезується у відповідь на стресчинник для стабілізації їхньої структури та функціонування [10]. У щуки ж спостерігалось зменшення частки ХЛ на 23,6 % за дії 0,25 мг/дм³ металу.

Вивчення змін ліпідного спектру м'язів риб за дії іонів важких металів має важливе практичне значення, тому що риба є цінним харчовим продуктом [19]. Аналіз результатів показав, що сублетальні концентрації іонів кобальту суттєво впливають і на фракційний склад неполярних ліпідів у м'язах риб (табл. 4). За дії обох досліджуваних концентрацій металу у м'язах карася ми виявили зменшення вмісту ФЛ відповідно на 11,6 і 16,8 %.

Частка фосфоліпідів у м'язовій тканині щуки була вищою, ніж у інших тканинах риб, включно із м'язами карася. Водночас за дії 0,1 мг/дм³ кобальту у м'язах щуки спостерігалось зростання вмісту ФЛ на 7,3 %. Також відмічено зниження кількості ДАГ на 43,6 та 35,3 % відповідно за дії 0,1 мг/дм³ і 0,25 мг/дм³. Ознакою ліполізу та перерозподілу ліпідних ресурсів є зменшення кількості ТАГ у карася на 8,6 % за дії 0,1 мг/дм³ кобальту та у щуки — на 15,3 і 9,1 % за впливу обох підвищених концентрацій металу у воді. Підтвердженням даного процесу є також зростання частки НЕЖК у риб, як продуктів ферментативного гідролізу зазначених

Таблиця 3

Фракційний склад неполярних ліпідів печінки риб за дії іонів кобальту
(%, $M \pm m$, $n = 5$)

Види риб	ТАГ	НЕЖК	ДАГ	ХЛ	МАГ	ФЛ
Карась						
Контроль	17,98± 1,01	41,22± 1,43	2,33± 0,21	8,32± 0,69	5,94± 0,41	24,22± 0,59
0,1 мг/дм ³	14,81± 0,74*	42,84± 0,80	2,47± 0,12	10,84± 0,43*	8,87± 0,86*	20,17± 0,76*
0,25 мг/дм ³	17,87± 0,31	43,30± 0,62	2,12± 0,05	10,30± 0,64*	5,69± 0,55	20,71± 1,06*
Щука						
Контроль	21,00± 2,05	44,17± 0,80	1,88± 0,10	5,98± 0,57	2,05± 0,13	24,92± 2,22
0,1 мг/дм ³	21,32± 2,13	42,20± 0,93	1,95± 0,19	5,46± 0,36	2,86± 0,28	26,22± 1,56
0,25 мг/дм ³	15,71± 1,02*	51,00± 2,00*	1,91± 0,03	4,56± 0,45	3,93± 0,31*	22,88± 1,12

вище ліпідів (ФЛ і ТАГ). Вміст НЕЖК у карася зростав за дії 0,1 мг/дм³ та 0,25 мг/дм³ іонів Co²⁺ відповідно на 25,1 і 22,6 %, у щуки за впливу вищої концентрації токсиканту — на 8,3 %. Водночас слід зазначити зменшення рівня МАГ у м'язах карася на 20,1 % за дії 0,25 мг/дм³ металу.

Підвищення активності ліпази може призвести до зниження загального вмісту ліпідів і збільшення вмісту НЕЖК з метою використання їх як енергетичних ресурсів для пом'якшення стану токсичного стресу, викликаного впливом металу. Так, у тканинах лабіринтових риб (*Anabas testudineus*) відмічалось зниження рівня ліпідів і збільшення рівня НЕЖК за впливу пестицидів і важких металів на організм [34].

Зміни вмісту ХЛ у м'язах риб за інтоксикації іонами кобальту мали насамперед видову специфіку. Так, мало місце підвищення частки ХЛ у карася на 14,7 % за впливу 0,1 мг/дм³ металу та зниження концентрації цього стеролу у м'язах щуки на 33,8 та 33,4 % щодо контролю при обох концентраціях іонів кобальту у воді.

Згідно результатів досліджень авторів [26], іони кобальту змінювали метаболізм стеролів у мідії *M. galloprovincialis*. Ці зміни залежали від концентрації іонів кобальту та забезпечували зниження шкідливого впливу іонів цього металу. Відомо, що ХЛ, як стерол зі специфічною структурою, знижує проникність клітинної мембрани [26].

Співвідношення холестеролу до фосфоліпідів у тканинах карася та щуки. Певні регуляторні механізми клітини контролюють плинність мембран шляхом зміни співвідношення окремих класів ліпідів. Підвищення вмісту холестеролу в клітинних мембранах підвищує температуру плавлення їхнього фосфоліпідного бішару [1]. При цьому співвідношен-

Таблиця 4

Фракційний склад неполярних ліпідів м'язів риб за дії іонів кобальту
(%, $M \pm m$, $n = 5$)

Види риб	ТАГ	НЕЖК	ДАГ	ХЛ	МАГ	ФЛ
Карась						
Контроль	31,56± 0,74	22,95± 1,49	2,65± 0,11	6,02± 0,15	5,86± 0,23	30,97± 1,75
0,1 мг/дм ³	28,83± 0,85*	28,70± 0,45*	2,51± 0,15	6,91± 0,24*	5,67± 0,30	27,38± 0,87*
0,25 мг/дм ³	32,53± 0,36	28,14± 0,44*	2,61± 0,09	6,27± 0,35	4,68± 0,21*	25,78± 0,78*
Щука						
Контроль	17,96± 0,47	21,68± 0,51	2,01± 0,06	3,25± 0,05	1,95± 0,13	53,15± 1,35
0,1 мг/дм ³	15,21± 0,34*	22,65± 1,33	1,13± 0,06*	2,15± 0,11*	1,83± 0,11	57,02± 1,30*
0,25 мг/дм ³	16,32± 0,32*	23,47± 0,43*	1,30± 0,09*	2,17± 0,09*	2,04± 0,15	54,70± 0,90

ня холестерол/фосфоліпідів в тканинах риб змінюється залежно від виду, а також типу тканини і є важливим показником текучості мембрани, що характеризує стан організму і його здатність адаптуватися до змін у навколишньому середовищі. Численні функції клітинних мембран залежать від їхньої плинності, а плинність, у свою чергу, залежить від співвідношення фосфоліпідів і холестеролу [38].

Аналіз результатів показав (табл. 5), що у зябрах досліджуваних видів риб мало місце зниження співвідношення ХЛ/ФЛ за дії 0,1 і 0,25 мг/дм³ іонів кобальту на 24,0 і 14,3 % у карася та на 34,4 і 40,5 % у щуки.

Зябра обох видів риб безпосередньо піддаються впливу іонів кобальту, а їхня роль у диханні та іонорегуляції забезпечує подібну адаптивну відповідь, що призводить до зниження співвідношення ХЛ/ФЛ. За впливу обох досліджуваних концентрацій іонів кобальту у карася даний показник достовірно зростає відповідно на 58,8 і 47,1 % у печінці та на 31,6 і 26,3 % у м'язах, що можна розглядати як адаптивну відповідь на зростання кількості металу у водному середовищі. Із літератури відомо, що збільшення співвідношення ХЛ/ФЛ призводить до ущільнення плазматичної мембрани [27], модуляції активності мембран-зв'язаних ферментів [8] та зменшення проникності її для іонів металів [16].

У тканинах щуки, навпаки, спостерігалось зменшення співвідношення ХЛ/ФЛ на 12,5 і 16,7 % у печінці та на 33,3 % у м'язах за дії металу у концентрації 0,1 і 0,25 мг/дм³. Одержані дані вказують на збільшення плинності мембран у тканинах риб та регулятивної активності фосфоліпідів у їхньому складі [32].

Відмінності у ліпідних профілях печінки та м'язів між карасем і щукою відображають метаболічні особливості окремих видів риб та їхню різну реакцію на стрес, викликаний кобальтом. Організм карася є більш толерантним до стресових чинників навколишнього водного середовища і реалізує стратегію накопичення ХЛ в печінці та м'язах для стабілізації

Таблиця 5

Співвідношення холестеролу та фосфоліпідів у тканинах риб за дії іонів кобальту ($M \pm m$, $n = 5$)

Види риб	Контроль	0,1 мг/дм ³	0,25 мг/дм ³
Печінка			
Карась	0,35±0,04	0,54±0,04*	0,50±0,04*
Щука	0,28±0,05	0,23±0,03	0,20±0,02
Зябра			
Карась	0,76±0,04	0,58±0,04*	0,65±0,02*
Щука	0,55±0,03	0,34±0,02*	0,33±0,03*
М'язи			
Карась	0,20±0,02	0,25±0,01*	0,24±0,01*
Щука	0,063±0,003	0,037±0,002*	0,040±0,002*

мембран і боротьби зі стресом. У щуки, як хижака з вищою швидкістю метаболізму, відмічається посилений розпад ХЛ для продукування енергії.

Висновки

Таким чином, зміни в ліпідному профілі тканин риб залежать насамперед від виду риб, концентрації іонів кобальту у воді та часу експозиції. Ймовірно, ці зміни пов'язані з поєднанням окислювального стресу та адаптаційних реакцій на індуковану металом токсичність.

За дії іонів кобальту відмічено загальну тенденцію до зростання загальної кількості ліпідів у печінці риб та її зниження у м'язах, що зумовлено перерозподілом ліпідних резервів.

У печінці риб зміни фракційного складу ліпідів за дії іонів Co^{2+} були різноспрямованими і мали видову специфіку. Відмічено зменшення частки фосфоліпідів і триацилгліцеролів, зростання вмісту холестеролу та продуктів гідролізу ліпідів (моно-, диацилгліцеролів та неестерифікованих жирних кислот).

Зміни в ліпідних профілях зябер були більш відчутними у щуки, особливо за високих концентрацій іонів кобальту ($0,25 \text{ мг/дм}^3$): зростання відсоткового вмісту фосфоліпідів, неестерифікованих жирних кислот, диацилгліцеролів та зниження — холестеролу, триацилгліцеролів та моноацилгліцеролів. У зябрах карася відмічено зниження кількості холестеролу та тенденцію до зростання продуктів гідролізу ліпідів — моноацилгліцеролів та неестерифікованих жирних кислот.

Зміни вмісту неполярних ліпідів у м'язах риб за інтоксикації іонами кобальту мали спільні тенденції: зниження вмісту триацилгліцеролів та зростання частки неестерифікованих жирних кислот. У м'язах щуки було відмічено також зниження частки холестеролу та диацилгліцеролів, а у карася — зниження фосфоліпідів за обох концентрацій та моноацилгліцеролів — за $0,25 \text{ мг/дм}^3$ іонів кобальту.

Співвідношення холестерол/фосфоліпіди у тканинах риб за дії іонів кобальту залежно від виду риб та типу тканини. У зябрах риб мало місце зниження співвідношення ХЛ/ФЛ за дії обох концентрацій металу як у карася, так і у щуки. За впливу іонів кобальту у печінці та м'язах у карася даний показник достовірно зростає, що призводило до ущільнення плазматичної мембрани та зменшення проникності її для іонів металів.

Список використаної літератури

1. Грициняк І.І., Смолянінов К.Б., Янович В.Г. Обмін ліпідів у риб. Львів: Тріада плюс. 2010. 338 с.
2. Курант В.З., Хоменчук В.О., Марків В.С., Вовчек Н.О. Вміст кобальту в прісних поверхневих водах та його біологічна роль в організмі риб. Тернопільські біологічні читання — Ternopil Bioscience — 2022 : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. (18—19 квіт. 2022 р., м. Тернопіль). Тернопіль: Вектор, 2022. С. 72—75.
3. Марків В.С., Вовчек Н.О. Кобальт у водних екосистемах: форми знаходження, біологічне значення та токсичність для риб. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Серія: Біологія*. 2024. Т. 84, № 2. С. 58—73. URL: <https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.2.7>
4. Марків В.С., Хоменчук В.О., Іваніцький Б.О., Курант В.З. Особливості вмісту ліпідів в тканинах щуки за дії підвищених концентрацій іонів кобальту (II). *Сучасні ISSN 0375-8990. Гідробіологічний журнал*. 2025. 61(4)

проблеми біології, екології та хімії : матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (25—27 квіт. 2024 р., м. Запоріжжя). Запоріжжя: Поліграфічний центр «СоруАрт», 2024. С. 32—34.

5. Поліщук В.М., Поліщук С.А., Цехмістренко С.І. Органо-тканинні особливості вмісту загальних ліпідів у прісноводних мирних видів риб. *Proceed. 7th Intern. Sci. and Pract. Conf. «Scientific Community: Interdisciplinary Research»*. 2024. С. 297—300. URL: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/11464>

6. Alkan N., Alkan A., Gedik K., Fisher A. Assessment of metal concentrations in commercially important fish species in Black Sea. *Toxicol. Industr. Health*. 2013. Vol. 32, N 3. P. 447—456. URL: <https://doi.org/10.1177/0748233713502840>

7. Amenta J.S. A rapid chemical method for quantification of lipids separated by thin-layer chromatography. *J. Lipid Res.* 1964. Vol. 5, N 2. P. 270—272. URL: [https://doi.org/10.1016/s0022-2275\(20\)40251-2](https://doi.org/10.1016/s0022-2275(20)40251-2)

8. Bastiaanse E. The effect of membrane cholesterol content on ion transport processes in plasma membranes. *Cardiovascular Res.* 1997. Vol. 33, N 2. P. 272—283. URL: [https://doi.org/10.1016/s0008-6363\(96\)00193-9](https://doi.org/10.1016/s0008-6363(96)00193-9)

9. Blust R. 6 – Cobalt. *Fish Physiology*. Acad. Press: Cambridge, MA, USA. 2012. Vol. 31. P. 291—326. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(11\)31006-0](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(11)31006-0)

10. Brown D.A., London E. Structure and Function of Sphingolipid- and Cholesterol-rich Membrane Rafts. *Journal of Biological Chemistry*. 2000. Vol. 275, N 23. P. 17221—17224. URL: <https://doi.org/10.1074/jbc.r000005200>

11. Chelomin V.P., Belcheva N.N. Alterations of microsomal lipid synthesis in gill cells of bivalve mollusc *Mizuhopecten yessoensis* in response to cadmium accumulation. *Comparative Biochem. Physiol. Part C: Comparative Pharmacology*. 1991. Vol. 99, N 1—2. P. 1—5. URL: [https://doi.org/10.1016/0742-8413\(91\)90065-2](https://doi.org/10.1016/0742-8413(91)90065-2)

12. Fawzy M.A., Hifney A.F., Adam M.S., Al-Badaani A.A. Biosorption of cobalt and its effect on growth and metabolites of *Synechocystis pevalekii* and *Scenedesmus bernardii*: Isothermal analysis. *Environ. Technol. & Innovat.* 2020. Vol. 19. P. 100953. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100953>

13. Folch J., Lees M., Stanley G. H. S. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J. Biol. Chem.* 1957. Vol. 226, N 1. P. 497—509. URL: [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)64849-5)

14. Garg S., Gupta R.K., Jain K.L. Sublethal effects of heavy metals on biochemical composition and their recovery in Indian major carps. *J. Hazard. Materials*. 2009. Vol. 163, N 2—3. P. 1369—1384. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.118>

15. Genchi G., Lauria G., Catalano A. et al. Prevalence of cobalt in the environment and its role in biological processes. *Biology*. 2023. Vol. 12, N 10. P. 1335. URL: <https://doi.org/10.3390/biology12101335>

16. Gulik-Krzywicki T. Structural studies of the associations between biological membrane components. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Reviews on Biomembranes*. 1975. Vol. 415, N 1. P. 1—28. URL: [https://doi.org/10.1016/0304-4157\(75\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0304-4157(75)90015-5)

17. Hermenean A., Damache G., Albu P. et al. Histopathological alterations and oxidative stress in liver and kidney of *Leuciscus cephalus* following exposure to heavy metals in the Tur River, North Western Romania. *Ecotoxic. Environ. Safety*. 2015. Vol. 119. P. 198—205. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.029>

18. Ipsen D.H., Lykkesfeldt J., Tveden-Nyborg P. Molecular mechanisms of hepatic lipid accumulation in non-alcoholic fatty liver disease. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2018. Vol. 75, N 18. P. 3313—3327. URL: <https://doi.org/10.1007/s00018-018-2860-6>

19. Jovičić K., Djikanović V., Santrač I. et al. Effects of trace elements on the fatty acid composition in danubian fish species. *Animals*. 2024. Vol. 14, N 6. P. 954. URL: <https://doi.org/10.3390/ani14060954>

20. Kaçar S., Başhan M., Oymak S. A. Effect of seasonal variation on lipid and fatty acid profile in muscle tissue of male and female *Silurus triostegus*. *J. Food Sci. Technol.* 2016. Vol. 53, N 7. P. 2913—2922. URL: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2253-5>

21. Kates M. *Techniques of Lipidology: Isolation, Analysis and Identification of Lipids*. North-Holland Publishing Company. 1972. 342 p.
22. Khomenchuk V.O., Lyavrin B.Z., Rabchenyuk O.O., Kurant V.Z. Lipid metabolism in the body of fish under the action of the environmental aquatic factors. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*. 2020. T. 80, № 3-4. P. 126—138. URL: <https://doi.org/10.25128/2078-2357.20.3-4.16>
23. Kubrak O.I., Husak V.V., Rovenko B.M. et al. Cobalt-induced oxidative stress in brain, liver and kidney of goldfish *Carassius auratus*. *Chemosphere*. 2011. Vol. 85, N 6. P. 983—989. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.078>
24. Leng X., Zhou H., Tan Q. et al. Integrated metabolomic and transcriptomic analyses suggest that high dietary lipid levels facilitate ovary development through the enhanced arachidonic acid metabolism, cholesterol biosynthesis and steroid hormone synthesis in Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*). *British Journal of Nutrition*. 2019. Vol. 122, N 11. P. 1230—1241. URL: <https://doi.org/10.1017/s0007114519002010>.
25. Nasri F., Heydarnejad S., Nematollahi A. Sublethal cobalt toxicity effects on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Croatian J. Fisheries*. 2019. Vol. 77 (4). P. 243—252. URL: <https://doi.org/10.2478/cjf-2019-0018>
26. Nechev J., Stefanov K., Popov S. Effect of cobalt ions on lipid and sterol metabolism in the marine invertebrates *Mytilus galloprovincialis* and *Actinia equina*. *Compar. Biochem. Physiol. Part A: Molecular & Integrative Physiology*. 2006. Vol. 144, N 1. P. 112—118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.02.022>
27. Pöhl M., Trollmann M.F.W., Böckmann R.A. Nonuniversal impact of cholesterol on membranes mobility, curvature sensing and elasticity. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14, N 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43892-x>
28. Rabcheniuk O.O., Khomenchuk V.O., Senyk Yu.I., Kurant V.Z. Lipid metabolism in carp and pike under impact of Fe (III) ions. *Hydrobiol. J.* 2019. Vol. 55, N 1. P. 66—74. URL: <https://doi.org/10.1615/hydrobj.v55.i1.70>
29. Rajamanickam V. Effect of heavy metals on the level of vitamin E, total lipid and glycogen reserves in the liver of common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Maejo Intern. J. Sci. Technol.* 2008. Vol. 2. P. 391—399.
30. Shahjahan M., Taslima K., Rahman M. S. et al. Effects of heavy metals on fish physiology — A review. *Chemosphere*. 2022. Vol. 300. P. 134519. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134519>
31. Sheridan M.A. Lipid dynamics in fish: aspects of absorption, transportation, deposition and mobilization. *Compar. Biochem. Physiol. Part B: Comparative Biochemistry*. 1988. Vol. 90, N 4. P. 679—690. URL: [https://doi.org/10.1016/0305-0491\(88\)90322-7](https://doi.org/10.1016/0305-0491(88)90322-7)
32. Somerharju P., Virtanen J.A., Cheng K.H. Lateral organisation of membrane lipids. The superlattice view. *Biochim. Biophys. Acta*. 1999., Vol. 1440 (1). P. 32—48. [https://doi.org/10.1016/S1388-1981\(99\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S1388-1981(99)00106-7)
33. Toker A. Phosphoinositides and signal transduction. *Cellular and Molecular Life Sciences (CMLS)*. 2002. Vol. 59, N 5. P. 761—779. URL: <https://doi.org/10.1007/s00018-002-8465-z>.
34. Tulasi S.J., Reddy P.U.M., Ramana Rao J.V. Accumulation of lead and effects on total lipids and lipid derivatives in the freshwater fish *Anabas testudineus* (Bloch). *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 1992. Vol. 23, N 1. P. 33—38. URL: [https://doi.org/10.1016/0147-6513\(92\)90019-y](https://doi.org/10.1016/0147-6513(92)90019-y)
35. Vaskovsky V.E., Kostetsky E.Y., Vasendin I.M. A universal reagent for phospholipid analysis. *J. Chromatography A*. 1975. Vol. 114, N 1. P. 129—141. URL: [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(00\)85249-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(00)85249-8)
36. Wang Y., Noman A., Zhang C. et al. Effect of fish-heavy metals contamination on the generation of reactive oxygen species and its implications on human health: a review. *Frontiers in Marine Science*. 2024. Vol. 11. URL: <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1500870>

37. Weber P., Behr E. R., Knorr C. De L. et al. Metals in the water, sediment, and tissues of two fish species from different trophic levels in a subtropical Brazilian river. *Microchem. J.* 2013. Vol. 106. P. 61—66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.05.004>

38. Zhang Y., Li Q., Dong M., Han X. Effect of cholesterol on the fluidity of supported lipid bilayers. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2020. Vol. 196. P. 111353. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111353>

Надійшла 12.02.2025

V.S. Markiv, PhD student,
Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University,
M. Kryvonosa, St. 2, Ternopil, 46027, Ukraine
e-mail: vitya.marktwen@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1294-7827

V.O. Khomenchuk, PhD (Biol.), Assistant Prof.,
Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University
M. Kryvonosa, St. 2, Ternopil, 46027, Ukraine,
e-mail: khomenchuk@tnpu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0500-6754

V.Z. Kurant, Dr. Sci. (Biol.), Prof.,
Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University
M. Kryvonosa, St. 2, Ternopil, 46027, Ukraine,
e-mail: kurant@tnpu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3349-046X

INFLUENCE OF ELEVATED CONCENTRATIONS OF COBALT IONS ON THE CONTENT OF NON-POLAR LIPIDS IN FRESHWATER FISH TISSUES

The content of total lipids and their individual non-polar fractions in the gills, liver, and muscles of crucian carp (*Carassius gibelio* Bloch.) and pike (*Esox lucius* L.) under the influence of 0.1 mg/dm³ and 0.25 mg/dm³ cobalt ions was studied. It has been established that the dynamics of the lipid profile in fish tissues under toxic influence depend on the nature and concentration of the metal in the water, and also has species and tissue specificity. A general trend towards an increase in the content of total lipids in the liver of fish and their decrease in the muscles was noted, which is due to the redistribution of lipid reserves. In the liver of fish, a decrease in the proportion of phospholipids and triacylglycerols, an increase in the content of cholesterol and lipid hydrolysis products was detected. Changes in gill lipid profiles were more pronounced in pike, especially at high concentrations of cobalt ions (0.25 mg/dm³). Changes in the content of nonpolar lipids in fish muscles during intoxication with cobalt ions had common trends: a decrease in the content of triacylglycerols and an increase in the proportion of non-esterified fatty acids. Both in crucian carp and in pike, there was a decrease in the cholesterol/phospholipid ratio in the gills under the influence of both concentrations of cobalt ions, while in the liver and muscles this indicator significantly increased only in crucian carp.

Key words: crucian carp, pike, lipids, cobalt.