

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГІДРОБІОЛОГІЇ

РАБЧЕНЮК ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК (577.122+577.123+577.125) : (597.551.2+ 597.552.1): 546.723

**ВПЛИВ ПІДВИЩЕНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ФЕРУМУ У ВОДІ
НА МЕТАБОЛІЧНІ ПРОЦЕСИ В ОРГАНІЗМІ КОРОПА ТА ЩУКИ**

03.00.10 – іхтіологія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата біологічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Тернопільському національному педагогічному університеті імені Володимира Гнатюка, м. Тернопіль

Науковий керівник: доктор біологічних наук, професор
Курант Володимир Зіновійович,
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка,
професор кафедри хімії та методики її навчання

Офіційні опоненти: доктор біологічних наук,
старший науковий співробітник
Потрохов Олександр Спиридонович,
Інститут гідробіології НАН України,
завідувач відділу біології відтворення риб

кандидат біологічних наук
Маренков Олег Миколайович,
Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара,
доцент кафедри загальної біології та водних біоресурсів

Захист дисертації відбудеться «16» травня 2019 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.213.01 в Інституті гідробіології НАН України за адресою: 04210, м. Київ, просп. Героїв Сталінграда, 12.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту гідробіології НАН України за адресою: 04210, м. Київ, просп. Героїв Сталінграда, 12.

Автореферат розісланий «29» березня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор біологічних наук



Н.І. Кірпенко

ВСТУП

Актуальність теми. За останні десятиліття зростаюче використання металів та їх сполук у багатьох галузях народного господарства призвело до збільшення їх надходження у водне середовище (Yang, Rose, 2003; Hemmati, 2017). Метали, особливо в іонній формі, швидко зв'язуються з пограничними епітеліальними структурами гідробіонтів, стають біодоступними і легко проходять через клітинні мембрани, порушуючи їх функціонування (Немова, 2010; Peuranen et al., 1994; Cooper, Bury, 2007; Wood et al., 2011).

Ферум є одним з найбільш поширених хімічних елементів у земній корі, але через низьку міграційну здатність концентрація металу в природних водах дуже мала і його прийнято відносити до числа мікроелементів (Wood et al., 2011). Дослідження впливу Феруму на метаболічні процеси у тварин проведені, в основному, на ссавцях (Aisen et al., 2001), у той час, як вплив підвищених концентрацій даного металу на риб досліджено недостатньо. Разом з тим відомо (Gregorovic', 2008), що біоконцентрування Феруму водними тваринами здійснюється за його низьких концентрацій і є важливим з екологічної точки зору.

Нормальне функціонування організму визначається наявністю оптимальної кількості металу та формою його знаходження в організмі (Wood et al., 2011). Нестача Феруму може викликати низку захворювань або призвести до загибелі. Однак, біоаккумуляція Феруму може становити потенційну небезпеку, навіть за незначного зростання концентрації металу у воді. Це пов'язано з тим, що біологічна функція Феруму в організмі риб здійснюється за низьких концентрацій, а надмірне його акумулювання може призводити до хронічного чи гострого отруєння (Bury, Grosell, 2003; Gurzau et al., 2003; Gregorovic', 2008).

Зважаючи на це, актуальним є пошук біомаркерних показників в організмі риб, які б дозволили оцінити негативні наслідки дефіциту чи надлишку Феруму. Такі дослідження також допоможуть оцінити рівень забруднення водного середовища сполуками Феруму, адже риби є цінними біоіндикаторами, оскільки підготовка зразків тканин риби та хімічний аналіз відносно простий, більш швидкий та інформативний й менш затратний, порівняно з традиційними аналізами води та донних відкладів (Rayment, Barry, 2000).

Метаболічно активні тканини, такі як зябра, печінка, нирки та м'язи, мають високу здатність до біоаккумуляції і використовуються для оцінки забруднення води металами. Токсикологічні дослідження показали, що окремі біохімічні показники печінки риб дозволяють оцінити ступінь і тип забруднення водних екосистем (Heier et al., 2009).

Білки, нуклеїнові кислоти та ліпіди виконують важливі функції в клітинному метаболізмі і відіграють істотну роль у біохімічних адаптаціях риб до несприятливих чинників водного середовища, у тому числі і до підвищеного вмісту металів. Оpubліковано низку робіт (Falk-Petersen et al., 2000; Курант,

2003; Сущик, 2008; Сенік, 2015; Рабченко та ін., 2016), які засвідчують важливе екологічне значення окремих ланок білково-нуклеїнового та ліпідного обміну у риб в процесах їх адаптації до температури, сезонного чинника, підвищення концентрації іонів металів тощо.

Разом з тим, кількісна сторона і біохімічні механізми впливу різних концентрацій іонів Феруму на білково-нуклеїновий та ліпідний обмін в організмі риб наразі вивчені недостатньо. Вкрай обмежена інформація з питань впливу іонів Феруму на ліпідний склад клітин різних тканин риб позбавляє екотоксикологічні дослідження важливої інформаційної складової, яку можна використовувати для діагностики екотоксикологічної ситуації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота була складовою частиною досліджень лабораторії екологічної біохімії кафедри хімії та методики її навчання Тернопільського національного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка і виконувалася в рамках науково-дослідницьких тем Міністерства освіти і науки України: «Фізіолого-біохімічні механізми формування токсикорезистентності в організмі водних тварин» (2012–2016 рр., номер держреєстрації 0112U000275) та «Пошук фізіолого-біохімічних маркерів для оцінки забруднення металами прісноводних екосистем за допомогою риб» (2017–2021 рр., номер держреєстрації 0117U002180).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження було з'ясування ролі окремих ланок білково-нуклеїнового та ліпідного обміну в організмі прісноводних риб у процесах їх адаптації до дії підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у водному середовищі.

Поставлена мета була реалізована внаслідок вирішення таких завдань:

- дослідити біонакопичення Феруму у зябрах, печінці, нирках та м'язах коропа і щуки за умов підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді;
- встановити особливості перерозподілу Мангану та Купруму в зябрах, печінці, нирках та м'язах риб за умов підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} ;
- дослідити вплив підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} на вміст нуклеїнових кислот і білків, а також їх метаболічну активність в тканинах коропа та щуки;
- дослідити роль процесів переамінування в адаптації риб до підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді;
- встановити вплив підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} на гематологічні показники та особливості зв'язування Феруму трансферином плазми крові у коропа та щуки;
- оцінити ліпідний спектр окремих тканин коропа та щуки за умов підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді;
- визначити вплив підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} на систему антиоксидантного захисту в організмі риб;
- проаналізувати можливість використання досліджуваних показників для оцінки забруднення водного середовища іонами Феруму.

Об'єкт дослідження: адаптація прісноводних риб до зміни чинників водного середовища.

Предмет дослідження: зміни білково-нуклеїнового та ліпідного обміну в тканинах коропа та щуки за умов впливу підвищених концентрацій Феруму у воді.

Методи дослідження: загальноприйняті методи відбору зразків тканин, атомно-абсорбційна спектроскопія, тонкошарова хроматографія, фотометрія, імунологічні, варіаційно-статистичні методи.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше встановлено характер впливу підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді на перерозподіл Феруму, Мангану і Купруму, співвідношення нейтральних та полярних ліпідів у зябрах, печінці, нирках та м'язах риб. Вперше проаналізовано особливості зв'язування Феруму трансферином плазми крові коропа та щуки за умов впливу сублетальних концентрацій його іонів. Розширено знання про роль білково-нуклеїнового і ліпідного обміну в формуванні токсикорезистентності організму риб до дії підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді та розглянуто можливість використання отриманих результатів для оцінки стану оточуючого водного середовища.

Практичне значення одержаних результатів. Враховуючи, що фізіолого-біохімічні показники тканин риб об'єктивно відображають стан водних організмів в конкретних умовах водного середовища, одержані дані щодо змін білкового та ліпідного складу, гематологічних показників та показників пероксидного окиснення ліпідів можуть бути використані для розробки експрес-методів виявлення біологічних ушкоджень у риб іонами металів, зокрема, при розробці методів оцінки забруднення металами водного середовища у ставковому рибництві.

Результати досліджень можуть використовуватися при викладанні навчальних дисциплін «Водна токсикологія», «Екологічна фізіологія і біохімія», «Експериментальна екологія», «Екологічний моніторинг» для студентів вузів природничих спеціальностей.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно проаналізовано фахову літературу з даної тематики, власноручно виконано експериментальну частину дисертаційної роботи, проведено статистичну обробку результатів. Спільно з науковим керівником здійснено аналіз та узагальнення отриманих результатів, сформульовано висновки і запропоновано рекомендації за результатами досліджень. Друковані праці підготовлені безпосередньо автором з наступним обговоренням зі співавторами.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень апробовано на: науково-практичній конференції, присвяченій 75-річчю ТНПУ ім. В. Гнатюка та хіміко-біологічного факультету «Концепція сталого розвитку та її реалізація в освіті» (Тернопіль, 2015); IX Міжнародній іхтіологічній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології» (Одеса, 2016); Міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми сучасної біохімії» (Львів, 2016); Науково-практичній конференції «Біологічні

дослідження – 2017» (Житомир, 2017); Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Тернопільські біологічні читання — Ternopil bioscience – 2017» (Тернопіль, 2017); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Тернопільські біологічні читання — Ternopil bioscience – 2018» (Тернопіль, 2018); XI Міжнародній іхтіологічній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології» (Львів, 2018); V Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток сучасної освіти і науки: результати, проблеми, перспективи» (Конін – Ужгород – Херсон – Кривий Ріг, 2018).

Публікації. Результати проведених наукових досліджень опубліковано в 9 статтях у наукових фахових журналах та 9 матеріалах наукових з'їздів, симпозіумів і конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, огляду фахової літератури, матеріалів та методів дослідження, 6 розділів власних досліджень, аналізу та узагальнення отриманих результатів, висновків, списку використаних джерел (271 найменування, з них 188 латиницею). Роботу викладено на 162 сторінках комп'ютерного тексту та ілюстровано 47 рисунками і 9 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

ФЕРУМ У ГІДРОЕКОСИСТЕМАХ, ЙОГО БІОЛОГІЧНА РОЛЬ, ТОКСИЧНІСТЬ ТА МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

У розділі проведено аналіз форм знаходження Феруму в природних водах. Систематизовано сучасні уявлення щодо чинників, які першочергово визначають особливості міграції металів взагалі та Феруму зокрема у гідроекосистемах України. Детально розглянуто основні методи аналізу та контролю Феруму в прісноводних екосистемах. Показано, що найчастіше для визначення у воді металів використовують атомно-абсорбційну спектрометрію, атомно-емісійну та мас-спектроскопію з індуктивно зв'язаною плазмою, електрохімічні методи.

Проаналізовано біологічне значення, особливості біоконцентрування та трансформації Феруму в організмі риб. Показано, що підвищення концентрації металу у воді в певних умовах може супроводжуватись надходженням його в надлишковій кількості в організм риб і викликати токсичні ефекти. Відмічено, що для ефективного контролю якості води актуальною є розробка комплексних, інтегральних методик з використанням фізико-хімічних та біологічних методів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведені на дворічках коропа (*Cyprinus carpio* L.) і щуки (*Esox lucius* L.) з середньою масою 300-350 г. Дослідних риб виловлювали із ставків Тернопільського рибкомбінату, урочище Залісці. Під час експерименту риб утримували в лабораторних акваріумах об'ємом 200 дм³ з розрахунку 40 дм³ води на одну особину. Вміст кисню у воді акваріумів підтримували на рівні 7,0–8,0 мг/л. З метою запобігання хронічного впливу на риб їх власних

екзометаболітів, воду в акваріумах змінювали кожні дві доби. Риб під час експерименту не годували.

Вивчали вплив на риб іонів Fe^{3+} в концентраціях 0,2 і 0,5 мг/дм³, що відповідають 2 та 5 рибогосподарським гранично допустимим концентраціям (Обобщенный перечень..., 1990). Необхідні концентрації іонів металу у воді створювали внесенням солі $FeCl_3 \times 6 H_2O$ кваліфікації “х.ч.”. Період утримування риб в експериментальних умовах становив 14 діб, що є достатнім для формування адаптивної відповіді на дію стрес-фактору (Хлебович, 1981; Хочачка, Сомеро, 1988). Контролем служили досліджувані показники в тканинах риб, які перебували у воді акваріумів без додавання іонів Fe^{3+} .

Риб забивали шляхом декапітації і проводили екстерпацію зябрових дуг, передньої долі печінки, нирок та білих м'язів спини. Досліди виконувались відповідно до правил європейської конвенції про гуманне ставлення до лабораторних тварин та «Загальних принципів експериментів на тваринах», ухвалених Першим національним конгресом з біоетики. Всі процедури відбору тканин виконували при 4⁰С. Кров для дослідження гематологічних показників відбирали із серця риб.

Для дослідження вмісту важких металів використовували методику Мур Дж. та Раммамурті С. (1987). Наважки тканин спалювали в нітратній кислоті у співвідношенні 1:5 (маса:об'єм). Вміст Феруму, Мангану та Купруму визначали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115М.

Нуклеїнові кислоти в гомогенатах тканин риб визначали спектрофотометрично (Цанев, Марков, 1960), враховуючи рекомендації Галкіна В.В., Бердишева Г.Д. (1968). Загальний вміст білків у тканинах визначали біуретовим методом (Бейли, 1965) з деякими видозмінами (Калачнюк, Гжицький, 1974), а в комплексах з нуклеїновими кислотами – за методом Лоурі (Lowry et al., 1951). Для визначення інтенсивності синтезу білків та нуклеїнових кислот у досліджуваних тканинах використовували умовні числа-тести, запропоновані авторами (Калачнюк та ін., 1978). Активність аланін- та аспартатамінотрансферази (КФ 2.6.1.2 і 2.6.1.1) в тканинах риб визначали за методом Пасхіної Т.С. (1974).

Підрахунок еритроцитів проводили в камері Горяєва. Гематокритне число визначали за допомогою мікрокапілярів, попередньо оброблених розчином гепарину та висушених при кімнатній температурі. Рівень гемоглобіну досліджували гемоглобінціанідним методом (Кушаковський, 1968). Вміст білка в плазмі крові визначали за Лоурі (Lowry et al., 1951). Активність лактатдегідрогенази (L-лактат: НАД оксидоредуктаза КФ 1.1.1.27) у плазмі крові визначали за швидкістю окиснення НАДН (Bergmeyer, Bernet, 1974).

Вміст трансферину у плазмі крові визначали турбідиметричним методом з використанням набору «Трансферин-турбі» для досліджень *in vitro*. Вміст металу у плазмі крові визначали методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії після спалювання зразків у нітратній кислоті.

Для біохімічного дослідження вмісту ліпідів та їх окремих класів зразки тканин досліджуваних риб подрібнювали на холоді в скляному гомогенізаторі з

наступним екстрагуванням загальних ліпідів хлороформ-метаноловою сумішшю у співвідношенні 2:1 за методом Фолча (Hokin, Nехum, 2002). Розділення ліпідів на окремі фракції проводили методом висхідної одновірної тонкошарової хроматографії на пластинках «Sorbfil» (Прохорова, 1982). Одержані хроматограми проявляли в камері, насиченій парами йоду, для ідентифікації окремих фракцій ліпідів використовували специфічні реагенти і очищені стандарти (Кейтс, 1975). Кількість неполярних ліпідів визначали дихроматним методом (Прохорова, 1982). Кількість фосfolіпідів визначали за методом Васьковського (Vaskovsky et al., 1985).

Вміст дієнових кон'югатів визначали згідно (Стальная, 1977). Вміст гідропероксидів ліпідів визначали фотометрично (Мирончик, 1982). Концентрацію ТБК-активних продуктів у гомогенатах тканин вимірювали за (Коробейников, 1989). Активність супероксиддисмутази (КФ 1.15.1.1) визначали за (Дубинина и др., 1983), активність каталази – за (Королюк и др., 1988). Всі одержані дані піддавали статистичній обробці з використанням t-критерію Стьюдента для визначення достовірності різниці (Лакин, 1990).

ОСОБЛИВОСТІ НАКОПИЧЕННЯ ТА РОЗПОДІЛУ ОКРЕМИХ МЕТАЛІВ У ТКАНИНАХ РИБ ЗА УМОВ ПІДВИЩЕНОГО ВМІСТУ ІОНІВ Fe³⁺ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Метаболічно активні тканини (з'ябра, печінка, нирки та м'язи) мають високу здатність до біоаккумуляції і тому можуть використовуватися для оцінки забруднення водного середовища металами (Heier et al., 2009). Саме тому ми намагалися з'ясувати, як підвищені концентрації іонів Fe³⁺ у воді впливають на біонакопичення Феруму та перерозподіл Мангану і Купруму у окремих тканинах та органах коропа і щуки.

Найбільший вміст Феруму виявлено в печінці та з'ябрах обох видів риб та нирках щуки (табл. 1). Це свідчить, що підвищення концентрацій Феруму призводить до вибіркового акумулювання металів тканинами риб. Так, спостерігається пропорційне зростання акумуляції металу з'ябрами із зростанням вмісту іонів Феруму у воді від 0,2 до 0,5 мг/дм³. В печінці обох видів риб акумулювання Феруму за дії досліджуваних концентрацій іонів Fe³⁺ нами відмічено не було.

Відомо (Лав, 1976; Хоменчук, 2003), що головним депонуючим органом у риб є скелетні м'язи. В наших дослідженнях виявлено невисокий вміст Феруму в цій тканині. У м'язах щуки відмічено зростання вмісту Феруму на 44,3% за впливу 0,2 мг/дм³ іонів Fe³⁺, тоді як дія 0,5 мг/дм³ призводила до зниження цього показника на 22,9% відносно контролю. Біоаккумуляція Феруму в м'язовій тканині коропа за впливу обох досліджуваних концентрацій іонів Fe³⁺ не спостерігалось. В нирках коропа спостерігалось зниження вмісту Феруму при обох концентраціях іонів Fe³⁺, а у щуки лише за впливу 0,2 мг/дм³. Виявлене явище може свідчити про наявність різних механізмів, які регулюють процеси накопичення та виділення металів в організмі досліджених видів.

Відомо, що перехідні метали Купрум та Манган є життєво необхідними для усіх тварин, включно риб, які в процесі еволюції виробили складні механізми підтримання їх необхідної кількості в організмі (Wood et al., 2011).

Аналіз отриманих результатів показав, що за впливу 0,2 мг/дм³ іонів Феруму у воді достовірних змін у кількості Мангану та Купруму в досліджуваних тканинах коропа не було (табл. 1). Разом з тим, підвищення концентрації іонів Fe³⁺ до 0,5 мг/дм³ у зазначений термін призводило до зменшення кількості Мангану у тканинах зябер та печінки і зростання кількості акумульованого металу у нирках коропа. Припускають, що Манган та Ферум конкурують за сайти зв'язування у зябровому епітелії риб (Playle et al., 2011). Антагонізм у накопиченні Мангану відмічався і у тканинах нирок, де кількість Феруму зменшувалася, а вміст Мангану зростає.

Вміст Купруму за впливу 0,5 мг/дм³ іонів Fe³⁺ зростає у тканинах зябер та печінки коропа, а у тканинах щуки дія 0,2 мг/дм³ іонів металу призводила до зниження кількості Купруму в печінці та зростання його вмісту в м'язах та нирках.

Таблиця 1

Вміст Феруму, Купруму та Мангану у тканинах коропа за дії підвищених концентрацій іонів Fe³⁺ (мг/кг сирової тканини, M±m, n=5)

Вміст іонів Fe ³⁺ у воді	Короп											
	Зябра			Печінка			М'язи			Нирки		
	Fe	Mn	Cu	Fe	Mn	Cu	Fe	Mn	Cu	Fe	Mn	Cu
Контроль	87,1±	0,78±	1,20±	154,0±	0,50±	10,53±	39,8±	0,49±	0,75±	87,4±	0,60±	1,70±
	8,2	0,08	0,20	8,1	0,10	0,77	3,1	0,11	0,12	6,6	0,08	0,23
0,2 мг/дм ³	100,8±	0,80±	1,18±	142,9±	0,65±	11,88±	26,2±	0,58±	0,93±	70,5±	0,50±	1,83±
	7,8	0,10	0,15	16,5	0,10	1,25	6,7	0,17	0,12	3,4*	0,06	0,19
0,5 мг/дм ³	132,4±	0,40±	1,70±	143,4±	0,45±	14,65±	36,5±	0,25±	0,75±	61,7±	0,80±	1,50±
	5,2*	0,01*	0,11	12,8	0,05	1,33	2,4	0,05	0,05	6,6*	0,08	0,13
	Щука											
Контроль	147,1±	0,12±	2,00±	349,3±	0,11±	2,77±	43,6±	0,10±	1,61±	142,5±	0,27±	2,42±
	18,8	0,01	0,19	21,0	0,01	0,2	5,2	0,01	0,06	14,5	0,03	0,48
0,2 мг/дм ³	250,6±	0,21±	2,21±	384,3±	0,17±	1,14±	62,9±	0,11±	2,02±	95,88±	0,20±	2,88±
	17,0*	0,07	0,23	17,2	0,04	0,12*	5,4*	0,02	0,23	15,0*	0,04	0,33
0,5 мг/дм ³	309,6±	0,16±	1,86±	339,9±	0,17±	3,10±	33,6±	0,13±	1,90±	136,7±	0,24±	3,76±
	22,1*	0,03	0,18	22,4	0,04	0,20	6,5	0,03	0,22	17,3	0,05	0,40

Примітка: * – тут і далі зміни порівняно з контролем достовірні (P<0,05).

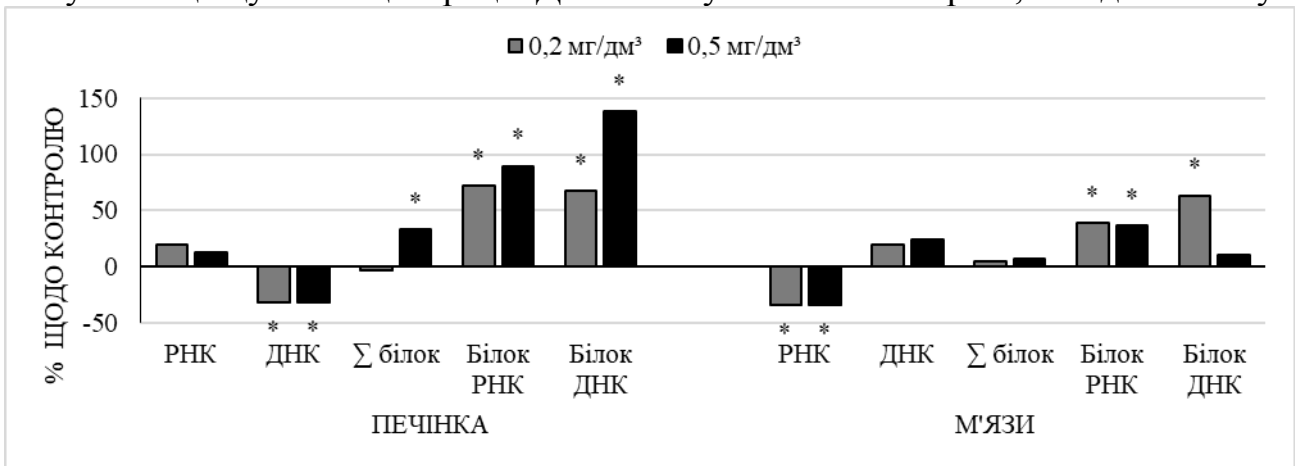
В цілому слід відзначити, що зміни у розподілі Купруму та Мангану у організмі прісноводних риб, викликані підвищеними концентраціями іонів Fe³⁺ у воді, в першу чергу, визначаються видовими особливостями та концентрацією іонів металу у водному середовищі.

БІЛКОВО-НУКЛЕЙНОВИЙ ОБМІН В ОРГАНІЗМІ КОРОПА ТА ЩУКИ ЗА ДІЇ ПІДВИЩЕНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ІОНІВ Fe³⁺ У ВОДІ

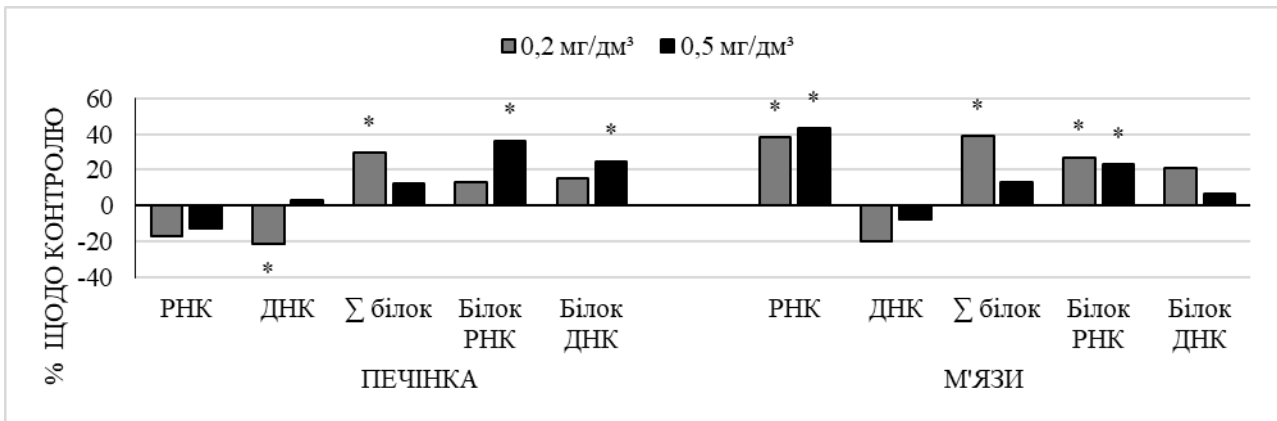
Визначення кількості ДНК, РНК, а також білків з різними функціональними властивостями в органах і тканинах прісноводних риб за дії

різноманітних чинників середовища їх існування, у тому числі іонів металів, має важливе як теоретичне, так і практичне значення.

Аналіз отриманих результатів показав, що за 14 діб аклімації риб до підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді ($0,2$ та $0,5$ мг/дм³) в їх тканинах змінювався вміст білків та нуклеїнових кислот. Так, зокрема, відмічено збільшення вмісту РНК в печінці коропа на $19,3\%$ за дії $0,2$ мг/дм³ і на $13,0\%$ за впливу $0,5$ мг/дм³ металу у воді (рис. 1 А). В печінці щуки (рис. 1 Б) дія іонів Fe^{3+} спричинила зниження концентрації РНК на $32,1\%$ та $34,4\%$ щодо контролю відповідно. При вивченні вмісту ДНК виявлено зниження цього показника в печінці коропа при обох досліджених концентраціях заліза на $32,0\%$. В той же час у печінці щуки концентрація ДНК знижувалася лише при $0,2$ мг/дм³ металу.



А



Б

Рис. 1. Зміни показників білково-нуклеїнового обміну коропа (А) та щуки (Б) за дії підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} (% відносно контролю, $M \pm m$, $n = 5$).

В результаті дії іонів Феруму в тканинах риб змінювалося також співвідношення РНК/ДНК. В печінці коропа даний показник зростав при $0,2$ мг/дм³ та при $0,5$ мг/дм³ іонів Fe^{3+} , а в печінці щуки – знижувався за впливу $0,5$ мг/дм³. В м'язах коропа відмічено зниження цього співвідношення, в м'язах щуки, навпаки, – зростання. Високе співвідношення РНК/ДНК може відображати високі потенційні білоксинтетичні можливості тканини, низьке – їх зниження (Білозерський, 1976). В результаті дії підвищених концентрацій

іонів Fe^{3+} , в основному, зростала інтенсивність синтезу білків у печінці і знижувалася в м'язах.

Дослідження виявили зростання кількості загального білка в печінці щуки за дії обох досліджуваних концентрацій іонів металу, а також в печінці коропа при $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} . Дане явище, можливо, пов'язане з синтезом захисних білків – металотіонеїнів (Hamer, 1986).

В тканинах м'язів вміст загального білка за дії іонів металу зростав як у коропа, так і у щуки (рис. 1 А, Б). Більш значною мірою це проявлялося у щуки, особливо за дії металу в концентрації $0,2 \text{ мг/дм}^3$, де цей показник збільшився на 38,6%.

Встановлено, що кількість білків у комплексах з нуклеїновими кислотами у м'язах досліджених риб вища, ніж у печінці. При цьому виявлено більше білка у комплексі з РНК, ніж ДНК. За дії $0,2$ та $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} вміст білка у комплексах як з РНК, так і з ДНК зростав у обох видів риб і в печінці, і в м'язах (рис. 1 А, Б). Очевидно, це можна пояснити тим, що деякі білки можуть виконувати роль репресорів геному (Калачнюк та ін., 1978).

Більше інформації про метаболічні процеси в тканинах риб можуть надати числа-тести, що виражають співвідношення кількості нуклеїнових кислот і відповідних білкових фракцій. Найвище значення «РНП-числа» нами відмічено в печінці щуки ($21,15 \pm 1,38$). За дії Феруму цей показник в печінці як коропа, так і щуки знижувався при обох концентраціях металу у воді.

Показник «РНП-числа» в м'язах риб був досить низьким. За дії іонів Fe^{3+} у коропа він знижувався, а у щуки зростав як при $0,2 \text{ мг/дм}^3$, так і при $0,5 \text{ мг/дм}^3$. Значення «ДНП-числа» максимуму досягали в печінці щуки. За дії іонів Fe^{3+} цей показник знижувався як в печінці, так і м'язах обох видів риб.

Відомо, що реакції переамінування відіграють важливу роль в процесах забезпечення толерантності організму гідробіонтів до токсикантів (Лукьяненко, 1983). У коропа активність аланінамінотрансферази (АлАТ) за дії металу в концентрації $0,5 \text{ мг/дм}^3$ зростала в печінці та сироватці крові (рис. 2 А). Це, очевидно, пов'язано з активацією системи детоксикації аміаку за рахунок синтезу аланіну, що спрямоване на підтримання кислотно-лужного гомеостазу шляхом зв'язування аміаку піруватом (Грубінко, Арсан, 1991).

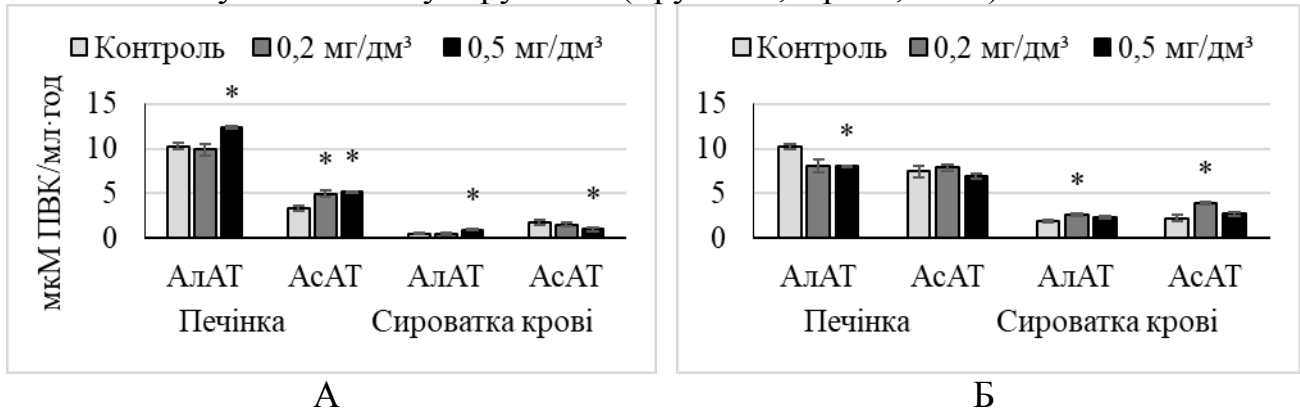


Рис. 2. Активність трансаміназ у тканинах коропа (А) та щуки (Б) за дії іонів Fe^{3+} ($\mu\text{кмоль PVK/мл}\cdot\text{год}$), $M \pm m$, $n=5$.

Дослідження активності аспартатамінотрансферази (АсАТ) в тканинах коропа показало, що активність ферменту в печінці зростала за дії обох досліджених концентрацій іонів Fe^{3+} (рис. 2 А).

Активність АЛАТ в печінці щуки знижувалася за обох концентрацій іонів (рис. 2 Б). В сироватці крові щуки, навпаки, активність цього ферменту зростала, тоді як активність АсАТ зростала лише за концентрації 0,2 мг/дм³ іонів Феруму. Активація аспартатамінотрансферази є основною ланкою малат-аспартатного човникового шляху, який активується при стимуляції фізіологічних функцій організму (Ленинджер, 1985).

РОЛЬ КРОВІ РИБ У ЇХ АДАПТАЦІЇ ДО ДІЇ ПІДВИЩЕНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ІОНІВ Fe^{3+} У ВОДІ

Параметри крові прісноводних риб диких популяцій (не трансформованих діяльністю людини) можна використовувати як еталонні при оцінці стану інших популяцій (Житенева, 2000). Нами досліджено окремі показники крові риб за впливу підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді.

Аналіз одержаних результатів показав, що за дії обох досліджуваних концентрацій іонів Fe^{3+} кількість еритроцитів, гематокритне число у коропа та щуки не відрізнялися від контрольних значень (табл. 2). Рівень гемоглобіну у коропа зростав за впливу 0,5 мг/дм³ іонів Fe^{3+} , тоді як у щуки він достовірно знижувався за даної концентрації іонів металу. Очевидно, в даному випадку відмінності обумовлені екологічними та фізіолого-біохімічними особливостями цих видів риб.

Рівень білків у плазмі крові коропа достовірно зростав лише за дії максимальної концентрації іонів металу. Очевидно у цього виду високі концентрації іонів металу обумовлюють посилений розпад білків тканин. Активність ЛДГ у плазмі зростала за дії 0,5 мг/дм³ іонів Fe^{3+} як у щуки, так і коропа, що свідчить про активацію анаеробного енергозабезпечення та пригнічення циклу трикарбонових кислот.

Таблиця 2

Гематологічні показники коропа та щуки за дії Fe^{3+} ($M \pm m$, $n=5$)

Показники крові	Короп			Щука		
	Контроль	0,2 мг/дм ³	0,5 мг/дм ³	Контроль	0,2 мг/дм ³	0,5 мг/дм ³
Кількість еритроцитів, млн/мм ³	1,4±0,1	1,5±0,2	1,5±0,2	1,8±0,1	2,1±0,3	1,8±0,2
Гематокрит, %	35,2±2,3	29,0±2,5	39,8±2,4	37,0±2,1	31,3±4,0	32,3±2,3
Гемоглобін, г/дм ³	76,9±7,6	85,1±3,5	109,6±5,6*	91,3±10,1	69,9±14,2	71,5±3,9*
Білок плазми, г/дм ³	33,3±2,1	29,4±1,5	43,9±2,7*	37,4±3,0	35,2±2,0	35,9±2,9
Активність ЛДГ, нМоль НАДН/хв×мг білка	6,0±1,1	3,3±0,3*	12,5±1,7*	3,3±0,8	4,3±0,6	7,3±1,8*

Серед білків, що безпосередньо пов'язані із регуляцією вмісту Феруму в організмі тварин, у тому числі риб, слід виділити трансферин. Хоча в організмі риб з трансферином зв'язано менше 1% Феруму, це найбільш лабільна форма даного металу (Edison et al., 2008).

Встановлено, що вміст Феруму в плазмі крові коропа зростав за дії 0,2 та 0,5 мг/дм³ іонів Fe³⁺ у 1,3 і в 1,2 рази відповідно (рис. 3 А). Одночасно мало місце пропорційне збільшення вмісту трансферину (рис. 3 Б). При цьому максимальний показник насичення трансферину металом у коропа був відмічений за впливу 0,2 мг/дм³ іонів Fe³⁺ – 43,5% проти 35,1% у контролі.

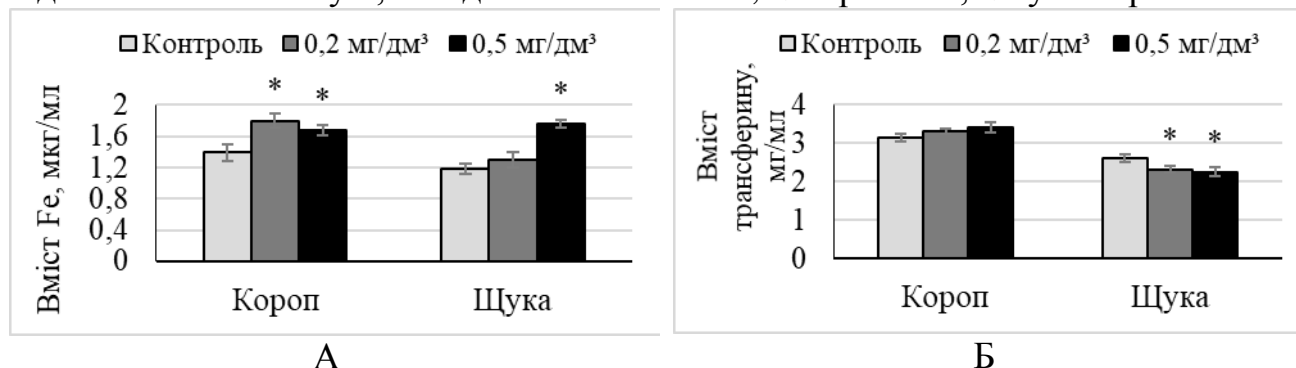


Рис. 3. Концентрація загального Феруму (А) та трансферину (Б) в плазмі крові коропа та щуки за дії підвищених концентрацій іонів Fe³⁺ у воді (M±m, n=5).

Кількісні характеристики зв'язування Феруму трансферином крові щуки за впливу підвищених концентрацій іонів Fe³⁺ у воді були відмінними від коропа. Відмічено максимальне акумулювання Феруму плазмою крові щуки (1,76 мг/дм³ проти 1,18 мг/дм³ в контролі) за дії 0,5 мг/дм³ іонів Fe³⁺. Разом з тим у плазмі крові щуки мало місце зменшення кількості трансферину в 1,13 та 1,15 рази за дії 0,2 та 0,5 мг/дм³ іонів металу.

Пропорційно концентрації іонів Fe³⁺ у воді зростав і показник насичення трансферину металом. Так, у плазмі крові риб контрольної групи він становив 36,2%, а у риб за дії 0,2 та 0,5 мг/дм³ іонів металу – 44,8 і 62,4% відповідно. Надлишок Феруму, і паралельно зростання показника насичення металом трансферину може свідчити про токсичну дію іонів металу та призводити до паталогії печінки, адже відомо, що для риб частка насичення трансферину Ферумом є нижчою, ніж для ссавців (Carriguiriborde et al., 2004).

ВПЛИВ ІОНІВ Fe³⁺ НА ЛІПІДНИЙ ОБМІН ТА ПРОЦЕСИ ПЕРОКСИДНОГО ОКИСНЕННЯ ЛІПІДІВ В ТКАНИНАХ КОРОПА ТА ЩУКИ

Збереження функціональної активності біологічних мембран клітин гідробіонтів за дії несприятливих хімічних чинників середовища забезпечується модуляцією роботи векторних ферментів та якісними і кількісними змінами у складі полярних та неполярних ліпідів.

Нами відмічено достовірне зростання кількості моноацилгліцеролів (МАГ) і неестерифікованих жирних кислот (НЕЖК) за дії 0,2 мг/дм³ та диацилгліцеролів (ДАГ) за впливу 0,5 мг/дм³ металу у зябрах коропа. Разом з тим, вміст холестеролу (ХЛ) достовірно зменшувався у 1,4 та у 1,3 рази за дії 0,2 та 0,5 мг/дм³ іонів металу відповідно.

У зябрах щуки слід відмітити зростання частки фосфоліпідів у 1,5 рази за дії 0,2 мг/дм³ та у 1,1 рази за 0,5 мг/дм³ іонів Fe³⁺, що можна розглядати як

своєрідну адаптивну відповідь організму на підвищені концентрації іонів Fe^{3+} шляхом структурно-функціональних перебудов біологічних мембран. Зі зростанням концентрації іонів металу в воді у зябрах щуки спостерігалось посилення ліполізу. Так, за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} зростала в 2,3 рази кількість ДАГ та зменшувався у 2,6 рази вміст триацилгліцеролів (ТАГ), тоді як за впливу $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу у клітинах зябер щуки підвищувався вміст НЕЖК та ДАГ у 1,6 і 1,4 рази відповідно, а кількість ТАГ зменшувалася у 3,5 рази. Частка ХЛ у зябрах щуки, як і в коропа, знижувалася відносно контролю за впливу обох досліджуваних концентрацій Fe^{3+} .

На відміну від зябер, у печінці коропа відмічено зменшення у 1,2 рази кількості ФЛ за впливу $0,2 \text{ мг/дм}^3$ та у 1,3 рази за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ металу. Слід відзначити достовірне зростання МАГ у обох видів риб дослідних груп, що обумовлено посиленням ліполізу ТАГ внаслідок зростання енергетичних витрат для протидії стрес-чиннику.

У нирках риб спостерігалось зростання кількості ФЛ у обох дослідних групах та ХЛ за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} . За дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ металу у нирках коропа відмічено зменшення вмісту ДАГ у 1,6 рази та НЕЖК у 1,7 рази. Разом з тим, кількість МАГ зростала у 1,9 рази, а вміст ТАГ знижувався у 1,6 рази. За дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} зменшувався вміст МАГ, НЕЖК та ХЛ, а кількість ДАГ і ТАГ у нирках коропа зростала. У нирках щуки за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} відмічено інтенсифікацію ліполітичних процесів, про що свідчить зменшення кількості ТАГ і ДАГ та зростання вмісту НЕЖК та МАГ.

В м'язах коропа має місце зменшення кількості ФЛ за дії обох досліджуваних концентрацій металу, тоді як у щуки відмічено зростання вмісту ФЛ за впливу $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} . В цілому слід зазначити, що відбувалося активне використання ліпідних резервів м'язів риб для енергетичного забезпечення підтримання оптимальної кількості Феруму в організмі, на що вказує зростання кількості МАГ і НЕЖК та зниження кількості ТАГ.

Функціональним показником активності біомембрани є відношення холестерол/фосфоліпіди (Ohvo-Rekila et al., 2002). У клітинах зябер як коропа, так і щуки мало місце зменшення даного показника (табл. 3), що, в цілому, вказує на зменшення кристалічності мембран клітин зябер та зростання регулятивної ролі фосфоліпідів у її складі.

За дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Феруму відмічено зменшення відношення холестерол/фосфоліпіди у печінці досліджуваних видів риб, тоді як за впливу $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} у коропа цей показник збільшився у 1,4 рази, що вказує на зростання мікрров'язкості клітинних мембран (Finean J., 1991). У клітинах нирок обох видів відмічено зростання відношення холестерол/фосфоліпіди за впливу $0,2 \text{ мг/дм}^3$ та зменшення його за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} . Аналіз даного відношення холестерол/фосфоліпіди у м'язах показав зростання цього показника у щуки за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Феруму.

В цілому, амплітуда та характер змін ліпідного складу досліджуваних тканин коропа та щуки визначалися концентрацією іонів Феруму, видом риб та метаболічною активністю тканин.

Відношення холестерол/фосфоліпіди в клітинах тканин риб за дії іонів Fe^{3+}
($M \pm m, n=5$)

Вид риб	Тканина	Група риб		
		Контроль	0,2 мг/дм ³	0,5 мг/дм ³
Коропа	Зябра	0,74±0,03	0,54±0,02*	0,52±0,03*
	Печінка	0,72±0,05	1,01±0,06*	0,52±0,02*
	Нирки	0,53±0,04	0,98±0,05*	0,24±0,03*
	М'язи	0,31±0,04	0,31±0,05	0,28±0,02
Щука	Зябра	0,93±0,04	0,47±0,02*	0,68±0,05*
	Печінка	1,69±0,04	1,66±0,06	1,13±0,03*
	Нирки	0,58±0,03	0,91±0,04*	0,38±0,04*
	М'язи	0,86±0,03	1,02±0,04*	0,80±0,06

За дії іонів Феруму відмічено дозозалежні та видоспецифічні зміни фосфоліпідного спектру зябер риб. Так, за дії 0,2 мг/дм³ металу мала місце активація синтезу фосфоліпідів у клітинах зябер коропа, тоді як дія 0,5 мг/дм³ іонів Феруму в коропа та вплив обох концентрацій заліза у щуки індукували їх деструкцію. У зябрах коропа за дії 0,2 мг/дм³ іонів Fe^{3+} спостерігалось вірогідне зростання у 2,05 рази вмісту ФХ та зниження вмісту фосфатидилетаноламіну (ФЕА) і фосфатидилсерину (ФС). Дія обох концентрацій іонів Fe^{3+} у воді у щуки та 0,5 мг/дм³ металу у коропа індукували схожі зміни ФЛ складу. Так, спостерігалася загальна тенденція до зниження вмісту фосфатидилхоліну (ФХ) та зростання кількості лізофосфатидилхоліну (ЛФХ).

У печінці коропа відмічено збільшення кількості ФХ та сфінгомієліну (СМ) відповідно у 2,65 і 1,64 рази за дії 0,2 мг/дм³ іонів Феруму та у 1,70 і 2,12 рази за впливу 0,5 мг/дм³ іонів металу. Такі зміни сприяють ущільненню мембрани. Зміни вмісту ФЛ гепатоцитів щуки, аклімованої до підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} , схожі до перебудов фосфоліпідного профілю клітин зябер цих риб.

У нирках вміст ФХ зростав за дії обох концентрацій як у коропа, так і щуки. За впливу 0,2 мг/дм³ металу встановлено достовірне збільшення вмісту ФХ у 1,24 рази та зниження у 1,33 рази концентрації ЛФХ. Зниження кількості ФС, ймовірно, є наслідком зниження вмісту ФЕА.

Аналіз кількісного співвідношення фосфоліпідів у м'язах риб показав пропорційність змін фосфоліпідного профілю до кількості металу у воді. Так, у м'язах коропа спостерігалось вірогідне зниження вмісту ФХ та зростання кількості ЛФХ, що вказує на гідроліз ФЛ. Натомість у м'язах щуки зміни фосфоліпідного профілю мали протилежний характер. Так, за обох концентрацій металу вміст ФХ зростав, тоді як кількість ФЕА знижувалася. Опосередкованим підтвердженням активації синтезу фосфатидилхоліну в біліпідному шарі м'язів риб є зниження вмісту лізофосфатидилхоліну.

Таким чином, зміни фосфоліпідного спектру досліджуваних тканин коропа та щуки були спрямовані на зменшення плинності біологічних мембран та зниження їх проникності для Феруму.

Перехідні метали, в тому числі і Ферум, індукують окисний стрес у прісноводних риб. Тому ми дослідили вплив іонів Fe^{3+} на вміст окремих продуктів пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ) та активність антиоксидантних ферментів, які є важливими індикаторами окисного стресу.

Аналіз отриманих результатів показав, що вміст дієнових кон'югатів (ДК) у печінці коропа за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} зростав у 1,2 рази, тоді як за впливу $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу достовірних відмінностей щодо контролю не відмічено (рис. 4 А). У зябровій тканині коропа мало місце пропорційне до концентрації іонів Fe^{3+} зростання кількості ДК у 1,8 та 2,1 рази відповідно, що свідчить про активацію процесів пероксидації ліпідів.

У печінці щуки за впливу $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Феруму зростав вміст ДК у 1,4 рази, а за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} – у 1,6 рази. У зябрах щуки за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу відмічено достовірне зниження концентрації ДК у 1,7 рази.

Максимальна з досліджуваних концентрацій іонів металу викликала зростання рівня гідропероксидів ліпідів у 1,5 рази в печінці та у 1,2 рази у зябровому апараті коропа відносно контрольних значень (рис. 4 Б). За впливу $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} зміни вмісту відмічено лише в зябрах коропа, де спостерігалось достовірне зниження вмісту гідропероксидів у 2,1 рази.

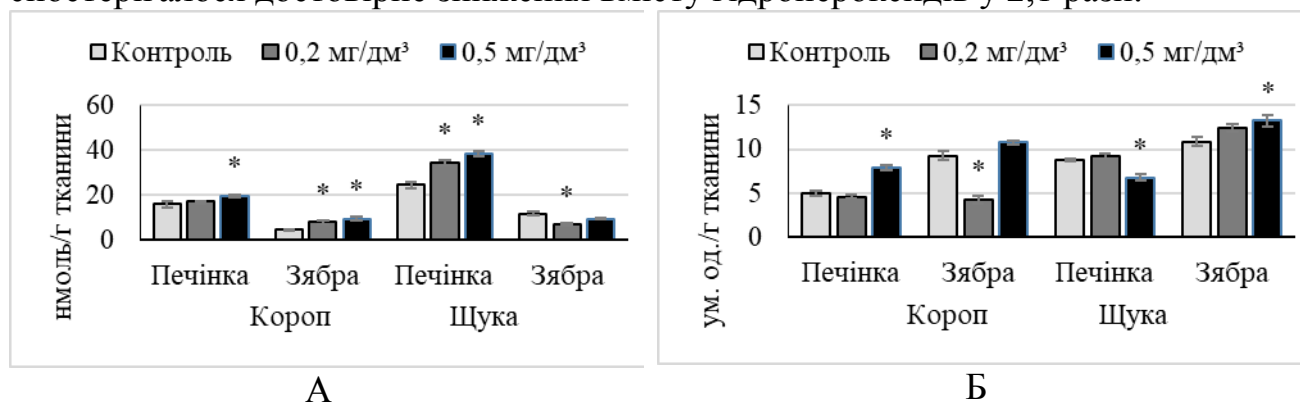


Рис. 4. Вміст дієнових кон'югатів (А) та гідропероксидів ліпідів (Б) у тканинах риб за різного вмісту іонів Fe^{3+} у воді ($M \pm m$, $n=5$).

На відміну від коропа, в печінці щуки мало місце достовірне зниження гідропероксидів ліпідів у 1,3 рази лише за впливу $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} (рис. 4 Б). У зябрах щуки спостерігалось зростання вмісту гідропероксидів ліпідів у 1,1 та 1,2 рази щодо контролю за впливу $0,2$ та $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу відповідно. Зростання кількості гідропероксидів ліпідів у зябрах обох видів риб за впливу $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} є свідченням посилення пероксидації ліпідів, що пов'язано із значним акумулюванням Феруму у зябрах досліджуваних видів риб.

Вміст малонового діальдегіду у печінці та зябрах коропа за впливу підвищених концентрацій іонів Феруму достовірно не відрізнявся від контрольних значень. У щуки відмічено зменшення кількості малонового діальдегіду лише за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу у зябрах.

Отже, високі концентрації іонів Fe^{3+} ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) активували процеси ПОЛ у зябрах та печінці риб, на що, в цілому, вказує підвищення вмісту дієнових кон'югатів та гідропероксидів ліпідів.

Дослідження активності ферментів системи антиоксидантного захисту риб за впливу підвищених концентрацій іонів металу у воді показало виражену концентраційну та видову специфіку змін. Так, за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} у воді активність каталази в печінці коропа знижувалася в 1,3 рази, тоді як вплив $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу призводив до зростання активності ензиму у 1,1 рази (рис. 5 А). У тканині зябрового апарату коропа за впливу обох концентрацій іонів Fe^{3+} достовірних відмінностей у функціонуванні каталази дослідних та контрольної груп не було виявлено.

У печінці щуки підвищені концентрації іонів Феруму викликали незначні зміни активності каталази. Так, активність цього ферменту в печінці обох видів знижувалася за впливу $0,2 \text{ мг/дм}^3$ та зростала за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу. У зябрах щуки було відмічено зростання активності каталази у 1,5 рази лише за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} .

Активність СОД у тканинах риб, згідно (Hemmati, 2017), є специфічним біомаркером забруднення водного середовища сполуками Феруму і Меркурію. Аналіз результатів показав, що у зябрах коропа зростала активність СОД за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} (рис. 5 Б). Водночас, у зябрах щуки відмічено зниження активності СОД за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу та активація даного ензиму за умов наявності у воді $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Феруму.

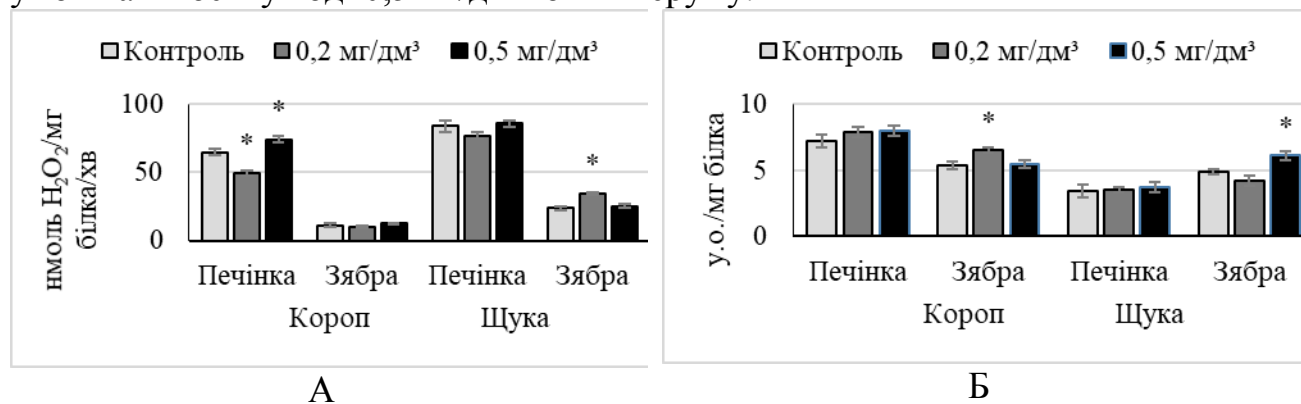


Рис. 5. Активність каталази (А) та супероксиддисмутази (Б) у тканинах риб за дії підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} у воді ($M \pm m$, $n=5$).

В цілому можна відмітити різну векторність змін активності ключових ензимів антиоксидантної системи риб за впливу підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} .

АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

В більшості випадків токсичність металу визначається ступенем його акумулювання в метаболічно активних структурах риб (Ghada et al., 2013; Athikesavan et al., 2006). Проведений нами аналіз тканинного біонакопичення та розподілу Феруму показав, що в нормі найбільше металу міститься в печінці, а найменше у м'язах. Розподіл Феруму в досліджуваних тканинах обох видів риб можна показати такою схемою:

Печінка > Зябра > Нирки > М'язи

Накопичення металів в печінці вище оптимального рівня, а також окремі фізіолого-біохімічні показники цього органа є біомаркерними і можуть реально відображати хронічне отруєння риб металами (Atli, Canli, 2003).

Дія підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} призводила до суттєвих змін у обміні білків та нуклеїнових кислот у печінці. Виявлено зростання кількості РНК у печінці коропа і м'язах щуки та зниження її вмісту в печінці щуки і м'язах коропа за підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} . Кількість ДНК знижується в печінці коропа та м'язах щуки за дії обох досліджуваних концентрацій іонів Fe^{3+} . Зміни співвідношення РНК/ДНК та чисел метаболічної активності за дії іонів Феруму свідчать про посилення експресії геному та біосинтезу білків.

Відмічено як для коропа, так і щуки зростання активності процесів переамінування та зниження чисел метаболічної активності, що можна пояснити активною участю білків печінки в протидії токсичному чиннику.

Накопичення Феруму в тканинах риб може індукувати утворення АФК через реакцію Фентона (Nishida, 2011) та посилювати ПОЛ. Підвищені концентрації у воді Феруму хоч і не призводять до накопичення металу у печінці, проте індукують утворення проміжних метаболітів ПОЛ – дієнових кон'югатів та гідропероксидів.

Зябра риб є першочерговою мішенню токсикантів в силу свого безпосереднього контакту з водним середовищем. Аналіз отриманих результатів показав, що в зябрах обох видів риб спостерігається дозозалежне акумулювання Феруму, яке значною мірою корелює з біохімічними показниками. При цьому домінуючу роль у знешкодженні АФК у коропа відіграє СОД, а у щуки – каталаза, про що свідчить зростання їх активності у тканинах зябер.

Показники крові можуть бути цінними біомаркерами інтоксикації організму риб важкими металами (Ranjana, 2011). Слід зазначити, що підвищені концентрації іонів Fe^{3+} у воді викликають зростання кількості металу у плазмі, що, в свою чергу, призводить до змін у функціонуванні досліджених ферментних систем. Накопичення металу та активності АЛАТ, АсАТ, ЛДГ у плазмі крові риб можуть бути використані як біомаркери отруєння організму риб сполуками Феруму.

У всіх досліджуваних тканинах щуки та у печінці і нирках коропа встановлено зниження кількості ДАГ та зменшення вмісту МАГ і НЕЖК, що підтверджує активацію синтетичних перетворень у цих тканинах.

Обидві досліджені концентрації Феруму у зябрах та м'язах коропа індукували зростання активності ліполізу, що виразилося у збільшенні кількості НЕЖК, ДАГ та МАГ. Загальна тенденція до зниження кількості ФС, ймовірно, є наслідком активації його декарбоксілювання, що сприяло накопиченню ФЕА.

На рис. 6 показані основні ефекти впливу підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} на фізіолого-біохімічні показники риб.

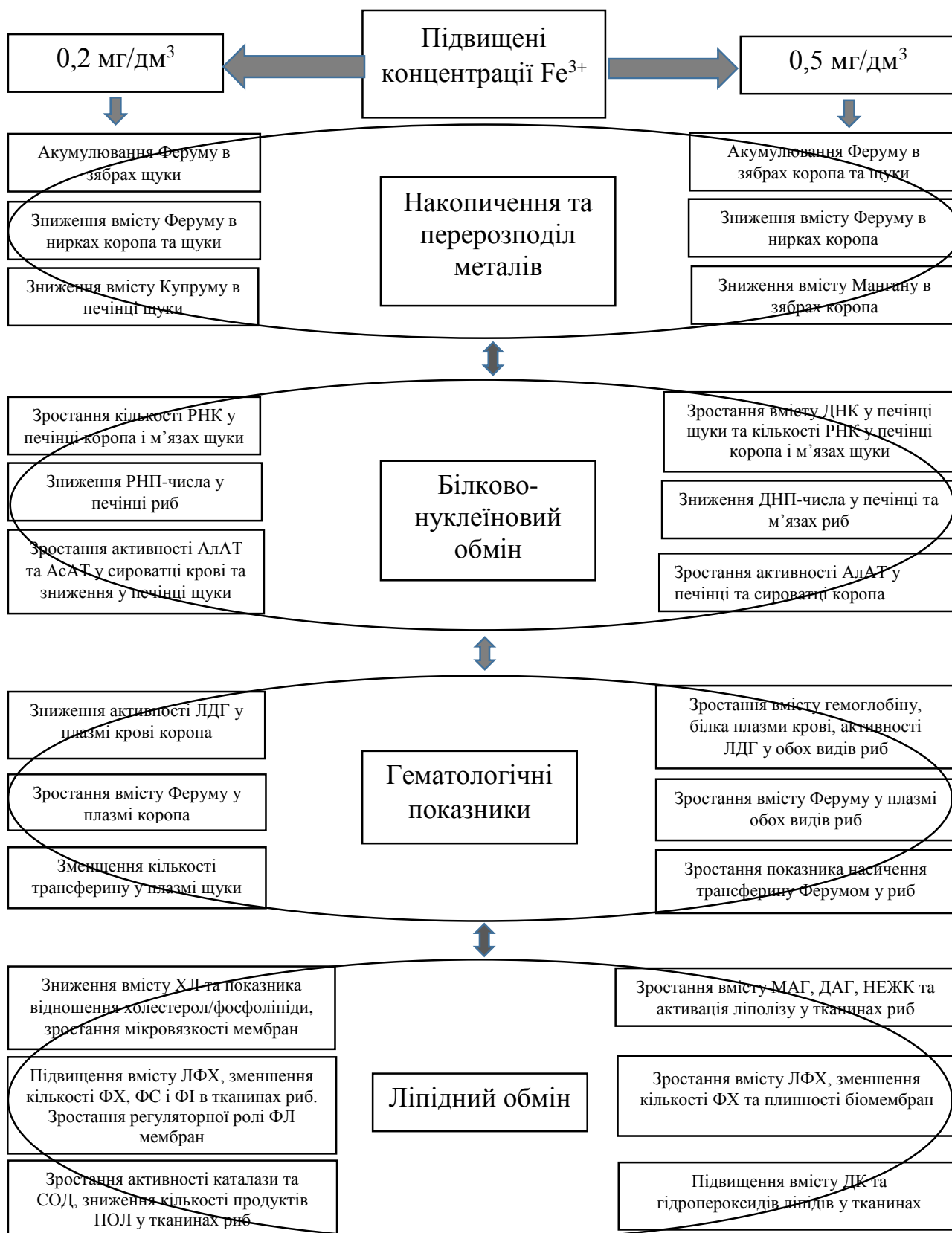


Рис. 6. Схема впливу підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} на фізіолого-біохімічні показники риб.

В загальному, зміни білково-нуклеїнового та ліпідного обміну у тканинах коропа і щуки спрямовані на забезпечення структурно-функціональної

активності тканин риб з метою регулювання надходження, зв'язування і екскреції Феруму та підтримання енергетичного статусу організму риб для протидії токсичному чиннику.

ВИСНОВКИ

На підставі дослідження закономірностей акумулювання Феруму і окремих показників білково-нуклеїнового та ліпідного обміну встановлено особливості формування адаптивної відповіді в організмі коропа і щуки на підвищення концентрації іонів Fe^{3+} у водному середовищі.

1. Накопичення Феруму тканинами риб залежить від концентрації металу у воді. За дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} вміст Феруму у зябрах коропа та щуки зростав у 1,5 і 2,1 рази відповідно. За цієї ж концентрації у нирках коропа кількість металу зменшувалась у 1,4 рази. Водночас у нирках щуки вміст Феруму знижувався в 1,5 рази за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу.

2. Підвищення концентрації іонів Fe^{3+} у воді впливає на накопичення інших металів в тканинах риб. У коропа концентрація $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу викликає перерозподіл Мангану між печінкою, зябрами та нирками, Купруму – між печінкою та зябрами порівняно з контролем. У щуки за концентрації іонів Fe^{3+} $0,2 \text{ мг/дм}^3$ спостерігалось зниження, а за $0,5 \text{ мг/дм}^3$ – підвищення вмісту Купруму у тканинах м'язів та нирок.

3. Динаміка змін вмісту РНК і ДНК у відповідь на підвищення концентрації Феруму відзначалась протилежним характером у коропа та щуки. Зміни співвідношення РНК/ДНК та чисел метаболічної активності за дії іонів Fe^{3+} свідчать про посилення експресії геному та біосинтезу білків, що підтверджується зростанням загальної кількості цих біополімерів у досліджених тканинах риб.

4. Активність аланінамінотрансферази за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} зростала як в печінці, так і в сироватці крові коропа. Активність аспартатамінотрансферази зростала в печінці та знижувалась в сироватці крові коропа пропорційно до концентрації іонів Fe^{3+} у воді. За дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів металу у сироватці крові риб відмічене зростання аланін- та аспартатамінотрансферази. Зміни активностей зазначених ферментів в печінці та сироватці крові риб спрямовані на перебудову амінокислотного та білкового метаболізму в їх організмі для забезпечення енергетичної та пластичної адаптації до стрес-дії токсиканта.

5. У зябрах обох видів риб за дії іонів Fe^{3+} знижувався вміст холестеролу та показник відношення холестерол/фосфоліпіди. Зміни вмісту жирних кислот, моно-, ди- та триацилгліцеролів у клітинах зябер мали різну направленість та залежали від концентрації іонів металу у воді та виду риб. У печінці коропа та щуки вплив іонів Fe^{3+} призводив до порушення синтезу холестеролу і фосфоліпідів та посилення ліполітичних процесів. Відмічено активне використання ліпідів м'язів риб для енергетичного забезпечення підтримання оптимальної кількості Феруму в організмі коропа за дії іонів Fe^{3+} .

6. Вплив підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} викликав активацію ліполізу у тканинах печінки та зябер досліджуваних видів риби, про що свідчить зростання вмісту лізофосфатидилхоліну та зменшення – фосфатидилхоліну, фосфатидилсерину і фосфатидилінозиту. Такі зміни, насамперед, спрямовані на підтримання енергетичного статусу організму риби для протидії токсичному чиннику.

7. Відмічено зростання кількості гемоглобіну, білка плазми крові коропа, активності лактатдегідрогенази та зниження вмісту гемоглобіну у щуки за впливу $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} . Підвищений вміст іонів Fe^{3+} у воді призводив до зростання кількості металу в плазмі крові обох видів риби та збільшення показника насичення трансферину Ферумом (особливо у щуки).

8. У зябрах риби за дії $0,2 \text{ мг/дм}^3$ іонів Феруму антиоксидантна система ефективно інактивувала вільні радикали, про що свідчить зростання активності досліджуваних ферментів (СОД і каталази) та зниження продуктів ПОЛ (у 1,5 разів вмісту МДА, у 1,7 разів кількості ДК в зябрах щуки та в 2,2 рази – гідропероксидів ліпідів у зябрах коропа). Високі концентрації іонів Fe^{3+} ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) посилювали процеси пероксидного окиснення ліпідів в зябрах та печінці риби, на що вказує підвищення в 1,2 та 1,6 рази вмісту дієнових кон'югатів у печінці коропа і щуки та в 1,6 рази кількості гідропероксидів ліпідів у печінці коропа.

9. Одержані у дисертаційній роботі результати щодо змін вмісту гемоглобіну крові, Феруму та білка в плазмі крові, насичення трансферину Ферумом та активності лактатдегідрогенази в плазмі крові, кількості продуктів пероксидації і активності ферментів пероксидації в зябрах та печінці риби можуть бути використані як біомаркери інтоксикації організму риби іонами Fe^{3+} та для біоіндикації забруднення прісноводних водойм сполуками Феруму.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях

1. **Рабченко О.О.**, Хоменчук В.О., Курант В.З. Вплив підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} на гематологічні показники коропа та щуки. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія*. 2015. № 2 (63). С. 28–31. (Участь у проведенні експериментів, обробці даних та написанні статті).

2. **Рабченко О.О.**, Бияк В.Я., Хоменчук В.О., Курант В.З. Активність трансаміназ в організмі прісноводних риби за дії йонів заліза. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія*. 2016. № 1 (65). С. 130–134. (Проведення експериментів, участь в аналізі даних та написанні статті).

3. **Рабченко О.О.**, Хоменчук В.О., Курант В.З. Ферум у водних екосистемах: форми знаходження, біологічне значення та токсичність для риби. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія*. 2016. № 3–4 (67). С. 107–119. (Участь у проведенні експериментів, обробці даних та написанні статті).

4. **Рабченко О.О.**, Хоменчук В.О., Курант В.З., Грубінко В.В. Фосфоліпідний склад окремих тканин коропа та щуки за дії іонів Fe^{3+} . *Доп. НАН України*. 2017. № 1. С. 97–102. (Відбір та обробка матеріалу, аналіз даних та участь у написанні статті).

5. **Рабченюк О.О.**, Хоменчук В.О., Ляврін Б.З., Курант В.З. Накопичення феруму в організмі прісноводних риб за його підвищеного вмісту у водному середовищі. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія*. 2017. № 1 (68). С. 96–101. (Проведення експериментів, участь в аналізі даних та написанні статті).

6. **Rabcheniuk O.O.**, Biyak V.Ya., Khomenchuk V.O. & Kurant V.Z. Protein-nucleic metabolism in freshwater fishes under impact of ferum ions. *Hydrobiological Journal*. 2017. Vol. 53, Iss. 4. P. 85–93. (Відбір та обробка матеріалу, аналіз даних та участь у написанні статті).

7. **Рабченюк О.О.** Вплив підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} у воді на вміст заліза та трансферину у плазмі крові риб. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія*. 2018. № 2 (73). С. 83–87. (Проведення експериментів, участь в аналізі даних та написанні статті).

8. **Рабченюк О.О.**, Хоменчук В.О., Сенік Ю.І., Курант В.З. Ліпідний обмін в організмі коропа і щуки за дії йонів феруму (III). *Гідробіол. журн.* 2018. Т. 54, № 5. С. 71–80. (Участь у проведенні експериментів, обробці даних та написанні статті).

9. **Рабченюк О.О.**, Хоменчук В.О., Станіславчук Г.В., Згурська С.Б. Курант В.З. Особливості перекисного окиснення ліпідів риб за умов підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} . *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія*. 2018. № 3–4 (74). С. 38–46. (Відбір та обробка матеріалу, аналіз даних та участь у написанні статті).

Матеріали та тези доповідей конференцій

10. **Рабченюк О.О.**, Голіней Г.М., Марценюк В.М., Сідлецька О.В., Хоменчук В.О. Вплив підвищених концентрацій Fe^{3+} на деякі показники крові коропа. *Концепція сталого розвитку та її реалізація в освіті* : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої 75-річчю ТНПУ ім. В. Гнатюка та хіміко-біологічного факультету, 16–18 квітня 2015 р. Тернопіль : Видавн. відділ ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2015. С. 91–93.

11. **Рабченюк О.О.**, Хоменчук В.О., Бияк В.Я., Курант В.З. Вплив йонів заліза на активність білково-нуклеїнового обміну в організмі коропа та щуки. *Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології* : матеріали ІХ Міжнародної іхтіологічної науково-практичної конференції, 14–16 вересня 2016 р. Одеса : ТЕС, 2016. С. 217–220. (Участь у відборі і обробці матеріалу та аналізі даних).

12. **Рабченюк О.О.**, Хоменчук В.О., Далєвський В.М., Курант В.З. Вплив підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} на вміст фосфоліпідів в окремих тканинах прісноводних риб. *Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології* : матеріали ІХ Міжнародної іхтіологічної науково-практичної конференції, 14–16 вересня 2016 р. Одеса : ТЕС, 2016. С. 221–224.

13. **Рабченюк О.**, Хоменчук В., Гладюк М., Далєвський В., Курант В. Особливості ліпідного складу клітинних мембран печінки та зябер риб за дії йонів Fe^{3+} . *Актуальні проблеми сучасної біохімії* : матеріали Міжнародної

наукової конференції, 16–18 листопада 2016 р. Львів : Вісник Львівського університету. Серія біологічна, 2016. Випуск 73. С. 121.

14. **Рабченюк О.О.**, Луцик З.М., Хоменчук В.О., Курант В.З. Особливості ліпідного складу тканин печінки та зябер риб за дії підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} . *Біологічні дослідження – 2017* : збірник наукових праць VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, 14–16 березня 2017 р. Житомир : ПП «Рута», 2017. С. 141–143. (Участь у проведенні експериментів, обробці даних та написанні матеріалів).

15. Курант В.З., Хоменчук В.О., **Рабченюк О.О.**, Далєвська Д.Я., Ляврін В.З. Metали як регулятори білкового обміну в організмі прісноводних риб. *Тернопільські біологічні читання – Ternopil Bioscience — 2017* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, присвяченої 20-річчю заснування наукового фахового видання України «Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія Біологія», 20–22 квітня 2017 р. Тернопіль : «Терно-граф», 2017. С. 132–135.

16. **Рабченюк О.О.**, Хоменчук В.О., Станіславчук А.В., Ковалик І.Г., Курант В.З. Зв'язування заліза трансферином плазми крові коропа та щуки за умов підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} у водному середовищі. *Тернопільські біологічні читання – Ternopil Bioscience — 2018* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, 19–21 квітня 2018 р. Тернопіль : «Вектор», 2018. С. 127–131.

17. Хоменчук В.О., **Рабченюк О.О.**, Станіславчук А.В., Курант В.З. Вільнорадикальне перекисне окиснення ліпідів у тканинах риб за дії Феруму (III). *Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології* : матеріали XI Міжнародної іхтіологічної науково-практичної конференції, 18–20 вересня 2018 р. Львів, 2018. С. 82–85. (Участь у проведенні експериментів, обробці даних та написанні матеріалів).

18. **Рабченюк О.**, Гудзь К., Гаврилук Х., Хоменчук В., Курант В. Активність каталази та супероксиддисмутази в тканинах риб за дії підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} у воді. *Розвиток сучасної освіти і науки: результати, проблеми, перспективи* : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. Конін–Ужгород–Херсон–Кривий Ріг : Посвіт, 2018. С. 397–399.

АНОТАЦІЯ

Рабченюк О.О. Вплив підвищених концентрацій Феруму у воді на метаболічні процеси в організмі коропа та щуки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук (доктора філософії) зі спеціальності 03.00.10 «Іхтіологія». – Інститут гідробіології НАН України, Київ, 2019.

Досліджено роль окремих ланок білково-нуклеїнового та ліпідного обміну в організмі коропа та щуки у адаптації до дії підвищених концентрацій йонів Fe^{3+} (0,2 і 0,5 мг/дм³) у водному середовищі. Показано, що накопичення

рибами Феруму є видо- та тканинноспецифічним процесом. Встановлено зростання кількості РНК у печінці коропа і м'язах щуки та зниження вмісту її в печінці щуки і м'язах коропа за підвищених концентрацій іонів Fe^{3+} . Кількість ДНК знижувалася в печінці коропа та м'язах щуки за дії обох досліджуваних концентрацій іонів Fe^{3+} . Зміни співвідношення РНК/ДНК та чисел метаболічної активності за дії іонів Феруму свідчать про посилення експресії геному та біосинтезу білків. Відмічено, що в печінці та сироватці крові коропа зміни активності аланін- та аспартатамінотрансферази спрямовані на перебудову амінокислотного та білкового метаболізму для забезпечення енергетичної та пластичної адаптації до стрес-дії токсиканта.

За впливу $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} відбувалося зростання вмісту гемоглобіну і білка у плазмі крові коропа та зниження концентрації гемоглобіну у щуки. Активність лактатдегідрогенази зростала за дії $0,5 \text{ мг/дм}^3$ іонів Fe^{3+} , що свідчить про активацію анаеробного енергозабезпечення. Підвищення вмісту іонів Fe^{3+} у воді призводило до зростання кількості металу в плазмі крові обох видів риб та збільшення показника насичення трансферину Ферумом.

Модуляція ліпідного спектру тканин риб спрямована на забезпечення структурно-функціональної активності біологічних мембран з метою регулювання надходження і виведення Феруму з організму риб та підтримання його енергетичного статусу для протидії стресовому чиннику. Високі концентрації іонів Fe^{3+} ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) посилювали процеси пероксидного окиснення ліпідів в зябрах та печінці риб.

Ключові слова: короп, щука, Ферум, адаптація, метаболізм, білки, нуклеїнові кислоти, ліпіди.

АННОТАЦІЯ

Рабченко Е.А. Влияние повышенных концентраций железа в воде на метаболические процессы в организме карпа и щуки. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук (доктора философии) по специальности 03.00.10 «Ихтиология». – Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, 2019.

Показана роль отдельных звеньев белково-нуклеинового и липидного обмена в организме карпа и щуки в адаптации к влиянию повышенных концентраций ионов Fe^{3+} ($0,2$ и $0,5 \text{ мг/дм}^3$) в водной среде. Показано, что накопление рыбами железа является видо- и тканеспецифическим процессом. Установлено увеличение количества РНК в печени карпа и мышцах щуки и снижение содержания ее в печени щуки и мышцах карпа при повышенных концентрациях ионов Fe^{3+} . Количество ДНК снижалось в печени карпа и мышцах щуки под влиянием обеих исследуемых концентраций ионов Fe^{3+} . Изменения соотношения РНК/ДНК и показателей метаболической активности при действии ионов железа свидетельствуют об усилении экспрессии генома и биосинтеза белков. Отмечено, что в печени и сыворотке крови карпа изменения активности аланин- и аспартатаминотрансферазы направлены на перестройку

аминокислотного и белкового метаболизма для обеспечения энергетической и пластической адаптации к стресс-действию токсиканта.

При воздействии $0,5 \text{ мг/дм}^3$ ионов Fe^{3+} прослеживался рост содержания гемоглобина и белка в плазме крови карпа и снижение концентрации гемоглобина у щуки. Активность лактатдегидрогеназы рыб возрастала при действии $0,5 \text{ мг/дм}^3$ ионов Fe^{3+} , что свидетельствует об активации анаэробного энергообеспечения. Повышенное содержание ионов Fe^{3+} в воде способствует возрастанию количества металла в плазме крови обоих видов рыб и увеличению показателя насыщения трансферрина железом.

Модуляция липидного спектра тканей рыб направлена на обеспечение структурно-функциональной активности биологических мембран с целью регулирования поступления и экскреции железа из организма рыб, а также на поддержание энергетического статуса их организма для противодействия стресс-фактору. Высокие концентрации ионов Fe^{3+} ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) усиливали процессы перекисного окисления липидов в жабрах и печени рыб.

Ключевые слова: карп, щука, железо, адаптация, метаболизм, белки, нуклеиновые кислоты, липиды.

ABSTRACT

Rabchenyuk O.O. Influence of increased concentrations of Ferum in water on metabolic processes in the organism of carp and pike. – Manuscript.

Thesis for obtaining the Doctor of Philosophy degree (PhD) in Biological Sciences, specialty 03.00.10 «Ichthyology». – Institute of Hydrobiology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The work deals the role of some links of protein-nucleic and lipid metabolism in the organism of carp and pike in adaptation to the action of elevated concentrations of Fe^{3+} ions in water environment is illustrated. It is show, that the accumulation of iron by fishes is tissue-specific process. Thus, the increase in the content of iron in the carp and pike gills, respectively with the action of $0,5 \text{ мг/дм}^3$ of Fe^{3+} ions was noted. In carp kidneys there was a decrease the amount of metal due to the effect of $0,5 \text{ мг/дм}^3$ of Fe^{3+} ions, and in the kidneys of the pike – with the action of $0,2 \text{ мг/дм}^3$ of iron (III) ions. Changes in the redistribution of Copper and Manganese in freshwater fish tissues caused by increased concentrations of Iron (III) ions, which are primarily determined by their species peculiarity. Thus, in the carp, under the influence of increased concentrations of iron ions in water ($0,5 \text{ мг/дм}^3$), there are changes in the distribution of Manganese between the liver, gills and kidneys; for Copper, was noted the modulation of its content in the liver and gills of fish with the action of $0,5 \text{ мг/дм}^3$ of Fe^{3+} ions. In pike, first of all, should be noted the growth of the amount of Copper in muscle and kidney tissues under the influence of both concentrations of Iron (III) ions and the decrease in the content of Copper in the action of $0,2 \text{ мг/дм}^3$ of Fe^{3+} ions.

The growth of the amount of RNA in the carp liver and muscle of the pike and the decrease of its content in the liver of pike and carp at increased concentrations of Fe^{3+} ions has been established. The amount of DNA is reduced in the liver of carp

and muscle of the pike with the action of both investigated concentrations of Fe^{3+} ions and increases in the liver of the pike (only with the action of $0,5 \text{ mg/dm}^3$) and carp muscle. Changes in the ratio of RNA/DNA and the numbers of metabolic activity under the action of iron ions indicate an intensify in genome expression and biosynthesis of proteins. It is noted that in the liver and in the blood serum of carp changes of alanine and aspartateaminotransferase were directed to rebuilding on aminoacid and protein metabolism in order to provide energy and plastic adaptation to the stress-action of the toxicant.

The influence of $0,5 \text{ mg/dm}^3$ of Fe^{3+} ions results in an increase of hemoglobin and protein content in the blood plasma of the carp and a decrease in the concentration of hemoglobin in the pike. The activity of lactate dehydrogenase of fish increases with $0,5 \text{ mg/dm}^3$ of Fe^{3+} ions, which indicates about the activation of anaerobic energy supply. The high content of Fe^{3+} ions in water resulted in the increase of the amount of metal in the blood plasma of both species of fish and an increase in the saturation index of transferrin by iron.

Changes in the content of lipids in fish tissues under the action of Fe^{3+} ions are determined by the concentration of metal ions in water and ecological characteristics of investigated species of fish. So, in the gills of both fish species under the actions of Fe^{3+} ions decreases the content of cholesterol and increased the ratio of cholesterol/phospholipids. In the liver of carp and pike the influence of Fe^{3+} ions leads to the violation of the synthesis of cholesterol and phospholipids and to increasing of lipolytic processes. The active use of lipid reserve of muscle of fish for the energy supply of iron transformation in the carp organism. The effect of elevated concentrations of Fe^{3+} ions, in general, causes activation of lipolysis in liver and gills tissues of investigated species of fish. The modulation of the lipid spectrum of fish tissues is aimed at ensuring the structural and functional activity of biological membranes in order to regulate the intake and removal of iron from the organism of fish and maintain the energy status of their organism for counteracting the stress factor.

The initiation of free radical oxidation and the formation of its products has an individual character for each species of fish. In gills of fish at a low concentration of iron ($0,2 \text{ mg/dm}^3$) the antioxidant system inactivates free radicals, as evidenced by the growth, in general, of the activity of the studied enzymes and the decrease in the amount of LPO products. High concentrations of Fe^{3+} ions ($0,5 \text{ mg/dm}^3$) increased the lipid peroxidation processes in gills and liver of fish, indicating an increase in the content of diene conjugates and lipid hydroperoxides.

The obtained results in the dissertation (changes in the content of blood hemoglobin, iron and protein in blood plasma, the saturation of transferrin by iron and the activity of lactatedehydrogenase in blood plasma, the number of peroxidation products and the activity of peroxidation enzymes in gills and liver of fish) can be used as biomarkers of intoxication of fish with ions Fe^{3+} and for the bioindication of pollution of freshwater ponds with iron compounds.

Key words: carp, pike, iron, adaptation, metabolism, proteins, nucleic acid, lipids.

Підписано до друку 21.02.2019 р.
Формат 60x84/16.
Папір друк. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 02/19/2-1

Віддруковано у видавничому центрі "Вектор"
46018, м. Тернопіль, вул. Львівська, 12,
Тел. 8 (0352) 40-08-12

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ТР № 46 від 07 березня 2013р.
ФОП Осадца Ю.В.