

БІОРЕСУРСИ ТА ЕКОЛОГІЯ ВОДОЙМ

Ribogospod. nauka Ukr., 2016; 1(35): 5-30

DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/fsu2016.01.005>

УДК 628.394.6:597.553.2

ВИКОРИСТАННЯ ЛОСОСЕВИХ РИБ (*SALMONIDAE*) У БІОМОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА (ОГЛЯД)

Д. О. Янович, yandeni@yandex.ru, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького, м. Львів

І. І. Грициняк, hrytsyniak@if.org.ua, Інститут рибного господарства НААН, м. Київ

Т. М. Швець, irguaan@bigmir.net, Інститут рибного господарства НААН, м. Київ

Мета. У зв'язку із забрудненням рибогосподарських водойм промисловими та сільськогосподарськими стоками, а також ксенобіотиками, які надходять з інших джерел, з огляду на прогнозоване зростання обсягів подібних викидів у коротко- та довготерміновій перспективі, особливої актуальності набувають питання дослідження впливу забруднюючих речовин різної природи та походження на гідробіонтів, зокрема риб, а також прогнозування можливих несприятливих наслідків забруднення водних екосистем. Метою представленої роботи є аналіз та узагальнення існуючих літературних відомостей щодо індикації в системі біомоніторингу якості водного середовища на підставі показників реакції лососевих риб як високочутливих об'єктів їхтіофауни до дії зовнішніх чинників.

Результати. У роботі узагальнено та систематизовано дані стосовно використання лососевих риб у системі біомоніторингових досліджень. Виділено та охарактеризовано специфічність таких біоіндикаційних показників екологічного стану водного середовища як біохімічні, генетичні, фізіологічні, морфологічні, гістопатологічні та популяційні маркери, а також біоіндикаційне значення поведінкових реакцій риб. Означено наслідки ектопаразитозу гідроекосистем у розрізі різних рівнів біологічної організації (клітина, особина, популяція, угруповання риб). Описано можливість проведення біологічного моніторингу, базуючись на індексах сапробності, виявлених для видів-індикаторів з родини лососевих риб.

Наукова новизна. В статті наведено структуру та визначено переваги і недоліки використання окремих біомаркерів організму та популяцій лососевих риб для оцінки екологічного стану водного середовища.

Практична значимість. Наведені у статті дані можуть бути використані для вдосконалення системи екологічного моніторингу водного середовища шляхом включення до індикаторних показників біомаркерів організму та популяцій високочутливих видів лососевих риб.

Ключові слова: біомоніторинг, лососеві риби, водні екосистеми, біохімічні маркери, генетичні біомаркери, фізіологічні біомаркери, морфологічні біомаркери, гістопатологічні біомаркери, популяційні біомаркери.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Можливості використання представників родини лососевих риб у системі біомоніторингових досліджень зумовлені їх підвищеною токсикочутливістю [1–3]. Біоіндикація з використанням цих риб застосовується для оцінки якості

© Д. О. Янович, І. І. Грициняк, Т. М. Швець, 2016



водного середовища за станом показників реакції лососевидних, сиговидних і харіусовидних видів. Кожна з цих груп має ряд переваг і недоліків, які визначають можливості та обмеження у виконанні тих чи інших задач. Так, одним з біоіндикаторів погіршення екологічних умов водойми та тест-об'єктом для їх оцінки є представник сиговидних риб — європейська ряпушка. Від інших представників роду сигів її відрізняє порівняно короткий цикл розвитку. Процеси обміну речовин та накопичення токсикантів в її організмі протікають швидше. У довгоциклічних сигових ці процеси затягуються у часі. Так, Антонова В. П. зі співавторами відзначали різке збільшення чисельності ряпушки з порушеннями у розвитку внутрішніх органів (печінки, серця, гонад), а потім і зниження виживання її потомства після нафтових аварій на річці Печорі, що супроводжувались надходженням до водного середовища тисяч тонн нафти. В стадії ж звичайного сига патологія виявилася дещо пізніше, однак за спільною з ряпушкою схемою [3–6].

Для вивчення дії забруднювачів на риб у якості індикаторного об'єкта обирається також райдужна форель. Для дослідження токсичного впливу в ранньому онтогенезі цей вид, в порівнянні з іншими, має низку переваг. Тривалі ембріональний і личинковий періоди розвитку форелі дозволяють проводити хронічні експерименти тривалістю до 70–75 діб. Порівняно з іншими лососевими рибами, широкі температурні межі дозволяють здійснювати досліди в звичайних морозильних камерах. Ікра і личинки форелі є відносно великими за розміром експериментальними об'єктами, що розширює можливість їхнього використання для оцінки токсичності водного середовища [7].

Взаємодія як окремого організму риб, так і їх популяцій та угруповань з навколишнім середовищем ґрунтується на адаптаційних механізмах. Забруднення водного середовища призводить до порушення їхнього функціонування, що супроводжується загибеллю окремих клітин, пригніченням певних фізіолого-біохімічних процесів, а за подальшого наростання — загибеллю організму, зникненням із угруповань чутливих видів з переважанням толерантних та зміни продуктивних характеристик водойм. Як складові елементи інтегральної оцінки негативного впливу забруднюючих сполук як на організм риб, так і на гідроєкосистему в цілому, постають специфічні біологічні ефекти (табл. 1) та генетичні, молекулярні, біохімічні, фізіологічні, морфологічні біомаркери, що ґрунтуються на них (табл. 2) [5, 6, 8–12].

Біомаркери характеризують взаємодію організму риб з потенційно небезпечними речовинами різного походження, та включають функціональні зміни в організмі, що відбуваються переважно на молекулярному та клітинному рівнях організації, а також біохімічні показники, як, наприклад, біохімічний склад тканин та рідин тіла риб. Реакції організму, що виникають на субклітинному рівні, призводять до змін процесів метаболізму в цілому, і можуть бути ідентифіковані в доволі короткий термін та за досить низьких концентрацій поллютантів. Разом з тим, вважається, що молекулярні маркери характеризуються порівняно низькою екологічною інформативністю, на відміну від популяційних або біоценотичних показників, таких як екологічна структура популяцій, видове та таксономічне різноманіття тощо, недоліком яких, втім, є низький рівень чутливості [5, 12–14].



Таблиця 1. Наслідки негативного впливу забруднюючих речовин на іхтіофауну в розрізі різних рівнів біологічної організації [6]

| Рівень | Відсутність згубної дії | Вплив токсикантів |
|-------------|---|---|
| Клітина | Нормальне функціонування клітин, стабільність лізосом, генетична цілісність | Тривала детоксикаційна активність, генетичні ушкодження |
| Особина | Відсутність морфологічних відхилень, низький рівень зараженості паразитами, нормальні поведінка та коефіцієнт вгодованості | Пошкодження плавців та інші аномалії, утворення пухлин, поведінкові відхилення, зниження коефіцієнта вгодованості |
| Популяція | Самопідтримуваність популяцій, нормальна демографічна структура, представленість усіх вікових груп, передбачуваний просторовий розподіл | Недостатнє або нульове популяційне поповнення личинками, низька чисельність молоді та дозріваючих особин, зміни просторового розподілу |
| Угруповання | Нормальна або висока різноманітність, присутність усіх трофічних рівнів, комплексна біотична взаємодія, очікувані сезонні цикли | Низька різноманітність, відсутність деяких груп, зменшення чисельності чутливих видів, послаблення біотичної взаємодії, зміни сезонних циклів |

Біохімічні маркери

Біохімічні механізми, що використовуються як маркери реакцій організму риб на дію зовнішніх чинників, включають синтез специфічних білків (цитохром-Р450-монооксигеназ, металотіонеїнів, білків стресу і множинної стійкості до ліків, ферментів другої фази метаболізму ксенобіотиків, антиоксидантних ферментів), утворення ендогенних метаболітів (флуоресцентних ароматичних сполук, порфіринів, ретиноїдів), а також індикаторів генотоксичної дії [9, 15].

Для прикладу, цитохром-Р450-монооксигенази — мультигенна група ферментів, з яких цитохром Р4501А часто використовується як маркер у процесі проведення біомоніторингових досліджень. Його експресія зростає через активацію арил-вуглеводного рецептора цитозолу, що слугує фактором транскрипції, ініціює експресію мРНК цитохрому Р4501А, індуюючи синтез етоксирезорифін-О-диетилази. З огляду на вибірковість зв'язування арил-вуглеводневих рецепторів з ароматичними вуглеводнями, експресія цитохрому Р4501А може бути використана у якості біомаркера як інтоксикації, так і адаптації організму лососевих риб до забруднення водойм широким спектром вказаних органічних сполук — від поліхлорованих біфенілів і діоксинів до численних поліциклічних ароматичних вуглеводнів.

В основі визначення активності цитохрому Р4501А лежить реакція деетилювання 7-етоксирезорифіну, з використанням як кофактора НАДФ відновленого, до флуоресцентного продукту — резорифіну. Останній легко визначається в гомогенатах печінки у дослідженнях, для яких обґрунтованим є відбір самців або незрілих особин однакового розміру та аналогічної стадії онтогенезу [5, 9, 12, 16–24].

Важливим індикатором впливу на лососевих риб іонів деяких металів є металотіонеїни — внутрішньоклітинні низькомолекулярні термостабільні білки з



**ВИКОРИСТАННЯ ЛОСОСЕВИХ РИБ (*SALMONIDAE*) У БІОМОНІТОРИНГУ
ЯКОСТІ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА (ОГЛЯД)**

високим вмістом тіолових груп, що беруть участь у кон'югації ксенобіотиків (табл. 2). Вони задіяні у низці процесів, пов'язаних з метаболізмом певних елементів, зокрема міді, цинку, кадмію, селену, миш'яку та ртуті — від регулювання їхнього поглинання (для есенціальних металів) і депонування до детоксикації. Крім того, зростання вмісту металотіонеїнів за певних умов є можливим у відповідь на розвиток оксидативного стресу. З метою проведення біомоніторингових досліджень не слід обирати статевозрілих самиць, оскільки у лососевих риб спостерігається пригнічення рівня металотіонеїнів за впливу естрадіолу, свідченням чого стали досліди з райдужною фореллю. Крім того, в експерименті слід уникати стресових ситуацій, наприклад, хендлінгу, різкої зміни температури тощо [5, 12, 15, 31–41].

Таблиця 2. Біомаркери риб [5, 12, 25–30]

| Біомаркер | Індикатор забрудненням конкретним токсикантом | Специфічність біологічних процесів | Вплив нетоксичних чинників |
|----------------------------------|--|--|---|
| Акумуляція | Так | Низька специфічність | Чинники середовища |
| Біотрансформація | Кілька груп ліпофільних ксенобіотиків | Детоксикація | Температура води, стать, вид риб |
| Оксидативний стрес | Ні | Детоксикація | Відсутній |
| Металотіонеїни | Кадмій, ртуть, цинк, мідь | Детоксикація | Стрес |
| Білки теплового шоку | Ні | Захист білків | Стрес, температура води, захворювання |
| Амінолевулінат-дегідратаза (АЛД) | Неорганічний свинець | Зниження гемосинтезу за надзвичайно високого вмісту свинцю | Умови середовища, вид, розмір риб |
| Ацетилхолін-естераза | Більшість інсектицидів | Нервова система | Вид риб, середовище |
| Гістологія | Ні | Специфічні ушкодження тканин, компенсаційні процеси | Захворювання, вік риб |
| Гематологія | Зазвичай — ні, за виключенням метгемоглобіну — для окислювачів та АЛД — для свинцю | Стресові реакції, анемія, пошкодження тканин | Стрес, захворювання риб |
| Ендокринні розлади | Гормони та гормоноподібні токсиканти | Відтворення | Відсутній |
| Скелетні деформації | Тератогенні сполуки, нейротоксини | Зниження виживання | Генетичний вплив, механічні ушкодження, вітамін С |

Білки теплового шоку (хітшовкові протеїни — HSP30, HSP60, HSP70, HSP90 та інші) — неспецифічна група висококонсервативних внутрішньоклітинних



гострофазових білків, що виконують важливу захисну та гомеостатичну роль, забезпечуючи, в тому числі, адаптацію клітини до цитотоксичних чинників. Індукторами їх експресії, яка є індикатором негативного впливу та основою використання цих білків як біомаркерів, можуть виступати дія металів, зокрема кадмію, міді, цинку, миш'яку, свинцю; поліциклічних ароматичних вуглеводнів; детергентів; гіпертермія; оксидативний стрес тощо. Утворення хітшових протеїнів в організмі риб характеризується тканинно-видовою специфічністю. В той час як білки родини HSP70 локалізуються у цитоплазмі, мітохондріях, ендоплазматичному ретикулумі та ядрі, HSP90 — в цитозолі, ядрі, HSP60 (шаперонін) є мітохондріальним білком.

Білки родини HSP70 є найбільш вивченими, в тому числі у лососевих риб. Експресія їх спостерігалась у випадках впливу на них сезонних чинників, температури, а також деяких органічних та неорганічних забруднювачів. Зокрема, показовим є приклад зміни метаболічного статусу печінки райдужної форелі за дії β -нафтофлавану, зі зниженням активності фосфоенолпіруваткарбоксікінази, лактатдегідрогенази та 3-гідроксиацил-коА-дегідрогенази, яка корелює з експресією HSP70 печінки риб [44, 45].

Протеїн HSP30, відомий як гемоксигеназа, виконує роль ферменту, що бере участь у катаболізмі простетичних груп до білівердину та білірубину за участю білівердинредуктази. Індукцію його активності за впливу хімічних токсикантів спостерігали на прикладі кількох видів лососевих риб, зокрема атлантичного лосося. Оскільки індукція HSP30 є обернено пропорційною до зростання активності цитохрому P4501A, перший може використовуватися як підтверджуючий маркер пригнічення цитохромів [12, 48].

HSP90 слугує біомаркером у випадку забруднення водою детергентами та поліциклічними ароматичними вуглеводнями, а також арсенітами [5, 12, 42–49].

Ще однією категорією білкових біомаркерів є білки множинної лікарської, або мультіксенобіотичної, стійкості — P-глікопротеїни. Це мембранні протеїни, які забезпечують транспорт ліпідів, пептидів, білірубину та інших речовин через клітинну мембрану, та задіяні у формуванні стійкості пухлинних клітин до хіміотерапевтичних препаратів. Зростання їхнього рівня спостерігається за впливу багатьох як органічних поллютантів, зокрема поліциклічних ароматичних вуглеводнів — креозоту, бенз(а)пірену тощо, пестицидів, так і неорганічних сполук. Згідно з дослідженнями, значна їх експресія відмічається у тканинах з індукованою неоплазією, що вказує на перспективність P-глікопротеїнів як біохімічних маркерів онкогенних процесів або потенційної сприйнятливості до них організму риб [12, 50–55].

Біотрансформація токсикантів в організмі риб проходить протягом двох фаз. Перша включає модифікацію молекули ксенобіотика з залученням ферментних систем, що результує в утворення чи вивільнення функціональних груп, зокрема (OH), (NH₂), (SH), друга являє собою кон'югацію поллютантів або їх метаболітів з великими ендогенними полярними молекулами. Експресія деяких ферментів, задіяних у другій фазі біотрансформації, наприклад глутатіон-S-трансферази (за хронічної дії) або уридиндифосфат-глюкуронозилтрансферази, вказує на забрудненість водного середовища поллютантами, серед яких можуть бути поліхлоровані біфеніли, поліциклічні ароматичні вуглеводні, хлорорганічні



пестициди. З огляду на це, вказані ферменти можна використовувати як біомаркери впливу на організм риб вказаних забруднюючих речовин [5, 9, 12, 56].

Основою токсичної дії багатьох органічних сполук та важких металів є посилення продукування активних форм кисню, здатних пошкоджувати структуру мембранних білків, нуклеїнових кислот та ліпідів. З цієї причини, біомаркери оксидативного стресу можна використовувати як індикатори токсичної дії полютантів. Клітинні тіюли, зокрема глутатіон, відіграють вкрай важливу роль у підтриманні окисно-відновного потенціалу клітини впродовж розвитку оксидативного стресу. В свою чергу, ферменти, що забезпечують підтримання глутатіону у відновленому стані, можуть використовуватися як індикатори оксидативного стресу за дії на організм риб токсичних речовин. Крім того, біомаркером вказаних процесів може виступати ДТ-діафороза, експресія якої пов'язана з дією планарних ароматичних вуглеводнів, таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні та поліхлоровані біфеніли [5, 12, 56–58].

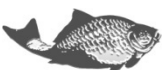
Значна кількість біологічних маркерів включає в себе ендогенні метаболіти токсичних речовин. Перш за все, це стосується флуоресцентних ароматичних сполук. У процесі біотрансформації численних поліциклічних ароматичних вуглеводнів утворюються активні проміжні сполуки, які здатні зв'язуватися з макромолекулами клітин, порушуючи їх нормальне функціонування. Оскільки токсичність вказаних полютантів безпосередньо залежить від їх трансформації в організмі, закономірною є оцінка і використання метаболітів ПАВ як специфічних біомаркерів забруднення водного середовища даними сполуками та впливу їх на організм лососевих риб. Слід зазначити, що необхідною умовою застосування вказаних маркерів є однаковий розмір досліджуваних особин [12, 59, 60].

Досить ефективними маркерами забруднення водойм та інтоксикації риб хлорованими вуглеводнями є порфірини — продукти катаболізму гему. Так, у випадку впливу стоків крафт-целюлозного заводу на озерного сига *Xu N.* зі співавторами було запропоновано використання профілів карбоксильованого порфірину як біологічного індикатора [12, 61, 62].

Перспективним є використання з біоіндикаційною метою ретиноїдів — ендогенних похідних вітаміну А, утворення яких пов'язане з впливом на риб планарних ароматичних вуглеводнів. Показовим у даному випадку є експеримент з американською палією, підданою впливу ін'єкції тетрахлорбіфенілу, що результувало у зниження вмісту ретиноїдів у деяких її тканинах [63–65].

Генетичні біомаркери

Важливою групою індикаторів токсичного впливу ксенобіотиків є генетичні біомаркери, оскільки зміни у генетичному матеріалі риб, у кінцевому результаті, мають наслідки для всіх рівнів організації живої речовини — від молекулярного до популяційного та біоценотичного. В окремих випадках, пошкодження молекули ДНК, що не спричиняють прямого негативного впливу на організм, можуть служити джерелом генетичного обтяження популяції. На даний час набули поширення декілька методів, що застосовуються для оцінки генетичних ефектів як на молекулярному та клітинному рівнях, так і для визначення генетичної структури популяції. До першої групи відносяться: ідентифікація ДНК-аддуктів, аналіз одиничних клітин (ДНК-комет), мікроядерний аналіз, метод



лужного розкручування ДНК, проточна цитометрія, специфічна оцінка точкових мутацій, до другої — метод випадково ампліфікованої поліморфної ДНК (RAPD), аналіз алозимів та мітохондріальної ДНК, метод поліморфізму довжини ампліфікованих фрагментів (AFLP), мікросателітів, а також ДНК-фінгерпринтинг [12, 66–73].

Фізіологічні біомаркери

Іншою групою біомаркерів, що відрізняються широким упровадженням у практику біологічного моніторингу та застосовуються у комплексі з біохімічними, є фізіологічні маркери, які включають гематологічні та клініко-хімічні параметри, показники фізичного стану риб (коефіцієнт вгодованості, темп росту, органосоматичні індекси), респіраторні та серцево-судинні показники, поведінкові особливості.

Кров — одна з найбільш доступних для аналізу рідин організму лососевих риб, що дозволяє визначати в ній кількість кров'яних клітин, гемоглобіну, концентрацію іонів плазми, активність ферментів і гормонів, вміст токсикантів тощо. Гематологічні параметри, що мають індикаторне значення при забрудненні середовища існування лососевих риб металами, компонентами стічних вод целюлозної промисловості, поліхлорованими біфенілами та численними іншими поллютантами, включають такі показники: гематокрит, кількість еритроцитів в одиниці об'єму крові, вміст гемоглобіну, концентрація натрію та калію у плазмі, вміст кров'яних ензимів, білка, ендометаболітів (холінестераза, аланінамінотрансфераза, дегідратаза амінолевулінової кислоти, альбумін, сечовина, глюкоза; естрогени, андрогени, прогестини, тиреоїдні гормони, кортизон, інсуліноподібний чинник росту). Передумовами отримання вірогідних результатів під час проведення гематологічних досліджень у іхтіотоксикології вважається використання уніфікованих методик та врахування можливості зміни показників крові за дії низки чинників, зокрема антикоагулянтів, хендлінгу, анестезії тощо. З огляду на це, найбільш доцільним видається відбір проб крові риб протягом 5 хв. після їх вилову [12, 74–79].

Морфологічні біомаркери

Наступною групою біомаркерів є показники фізичного стану організму, що здавна використовувалися з метою оцінки здоров'я риб. Найбільш поширеними з них є співвідношення розміру тіла (або окремого органа) і маси особини. Зокрема, при визначенні патологічних змін у функціях окремо взятих органів доцільно використовувати морфометричні показники — коефіцієнт вгодованості, виражений як відношення маси риби до її довжини, а також органосоматичні індекси — відношення маси певного органа до маси тіла. Перевагою вказаних біомаркерів є легкість проведення досліджень, однак вони перебувають у тісній залежності від сезонних і температурних чинників, фізіологічного стану риб, що ускладнює процес ідентифікації визначального чинника, яким не обов'язково є вплив поллютанта. Разом з тим, останній може спровокувати швидкі та масштабні зміни у роботі органів, наприклад, гонад лососевих риб, що значною мірою відрізнятимуться від таких, викликаних сезонними чи подібними чинниками [12, 37, 80–82]. Приклади реакції організму представників родини лососевих за дії забруднюючих речовин з позицій впливу на коефіцієнт вгодованості та органосоматичні індекси наведені у таблиці 3.



Таблиця 3. Зміни фізичного стану лососевих риб в умовах впливу токсичних речовин [12, 82, 88–91]

| Вид риб | Токсикант | Тип відповіді |
|--------------------------------|--|---|
| <i>Коефіцієнт вгодованості</i> | | |
| Озерний сиг | Хронічний дієтарний вплив нікелю (до 1000 мг/г корму) впродовж 104 діб | Відсутність впливу на ріст чи коефіцієнт вгодованості |
| Райдужна форель | Стоки мідних шахт | Відсутність впливу на коефіцієнт вгодованості |
| | Згодовування кальцію у складі корму (60 мг/г) протягом 30 діб | Зниження коефіцієнта вгодованості |
| <i>Гепатосоматичний індекс</i> | | |
| Райдужна форель | Вплив фенолу у концентрації 0,6; 1,2 та 2,4 мг/дм ³ протягом 8 тижнів | Зниження гепатосоматичного індексу |
| Атлантичний лосось | Дієтарний вплив хлориду ртуті (до 100 мг/кг корму) або метилртуті (до 10 мг/кг корму) протягом 4 місяців | Відсутність впливу на масу, довжину або гепатосоматичний індекс |
| <i>Гонадосоматичний індекс</i> | | |
| Райдужна форель | Згодовування кальцію у складі корму (60 мг/г) протягом 30 діб | Зниження гонадосоматичного індексу |

Використання гепатосоматичного індексу як біомаркера доцільне за умови впливу на риб гепатотоксичних сполук, прикладом яких є кадмій, в той час як гонадосоматичний індекс виявляє дію ксеноестрогенних поллютантів. Інші ж показники (спленосоматичний та соматовісцеральний індекси, відносна маса шлунка) використовують для досліджень впливу солоності, температури і сезонних змін, та переважно не застосовують у іхтіотоксикологічній практиці [12, 83, 84].

Окрім наведених параметрів, традиційним біомаркером вважається ріст риб, який вираховується як на організмовому — шляхом визначення змін маси тіла протягом тривалого часу, так і на біохімічному рівнях — з урахуванням змін вмісту протеїну в клітині або розрахунком співвідношення РНК/ДНК. Причини зниження темпу росту за впливу поллютантів полягають у зменшенні споживання енергії або зростанні її витрат рибами для уникнення небезпечних сполук, детоксикації ксенобіотиків та відновлення тканин [12, 85–87].

Слід згадати також дихальні та серцево-судинні показники лососевих риб, зміна яких може вказувати на забруднення водойм. Наведені біомаркери включають частоту та об'єм вентиляції, споживання кисню, вміст газів у крові, парціальний тиск кисню в артеріальній крові, парціальний тиск вуглекислого газу. Загалом, будь-який поллютант, що впливає на два останні параметри, змінює рН крові, судинний опір, кровопостачання або індукує проліферацію клітин зябер, здатний спричинити порушення дихальної функції [92, 93].

Гістопатологічні біомаркери

Окремою категорією індикаторних показників є патологічні маркери. За сублетальних впливів токсичних речовин на риб відбуваються зміни у гістологічній структурі тканин та органів, і провокуються патології, здатні значною мірою порушити їхнє функціонування. Впровадження в практику



біоіндикації гістологічних досліджень із залученням імуногістохімічних методів дозволяє досліджувати органи та клітини-мішені токсичної дії забруднюючих сполук як за гострого, так і за хронічного впливу. З огляду на висококонсервативну природу органел клітин і загальної клітинної організації риб, та тісний зв'язок молекулярних, генетичних, цитологічних і гістологічних показників, гістопатологічні маркери виявляються дієвими інструментами детермінації негативної дії поллютантів, що знайшли широке застосування у іхтіотоксикологічній практиці. Вони постають як прямі, чутливі та надійні індикатори впливу зовнішніх стресорів. Найчастіше вивчаються специфічні зміни структури тканин зябер як мультифункціонального органу, через який відбувається поглинання поллютантів, печінки, де проходить їхня біотрансформація та детоксикація, нирок як одного з органів виведення поллютантів, гонад — за умови дії сполук з характерними ксеноестрогенними властивостями, залоз внутрішньої секреції — у випадку забруднення водою ендокринними дизрапторами тощо. Разом з тим, до недоліків використання гістопатологічних біомаркерів відносяться інвазивність, трудомісткість та висока вартість досліджень [12, 94–97].

Поведінкові реакції риб як біомаркери

Поведінкові реакції риб також дають інформацію про функціональні зміни в організмі. За впливу токсичних сполук, найбільш вираженими реакціями лососевих риб є уникнення забруднювачів, зміни рухливості, поведінки, пошуку їжі та живлення, а також репродуктивної, соціальної та плавальної активності. Поведінкові біомаркери відзначаються низкою переваг перед біохімічними, фізіологічними та морфологічними внаслідок їхньої часто порівняно вищої індикаторної чутливості до дії поллютантів, можливості швидкого виявлення гострого впливу цих речовин, інтегративності ефектів, в основі яких лежать біохімічні та фізіологічні зміни, та відображення комплексів токсичних реакцій і компенсаторних відповідей [12, 98–105].

Популяційні біомаркери

Біоіндикація стану водного середовища в умовах антропогенного забруднення може ґрунтуватися і на оцінці параметрів структури популяцій лососевих риб та різноманіття особин з відмінними властивостями в одній популяції. Із вказаною метою проводиться аналіз кількох показників, серед яких співвідношення статей, абсолютна плодючість, розмірна різноманітність особин, чисельність особин з морфологічними відхиленнями. Співвідношення статей береться до уваги у випадках яскравого виявлення статевого диморфізму лососевих риб, та показує відхилення від норми, які знаходять відображення у зниженні урожайності поколінь, у той час як абсолютна плодючість є індикатором сприятливості умов для нересту риб. Важливим біомаркером є розмірне різноманіття особин в межах окремих вікових груп, оскільки якість середовища здатна значною мірою визначати їхній фізичний стан, зокрема темп росту, коефіцієнт вгодованості особин тощо, про що йшлося вище. Показники відносної частки особин з наявністю морфологічних асиметрій у різних вікових групах та різноманітності вікових груп у особин з морфологічними асиметріями в популяції спроможні вказати на актуальний екологічний стан водоюми і тимчасову зміну якості водного середовища, а також визначати присутність несприятливих чинників у минулому на основі показників відповідних вікових груп лососевих риб [5, 11, 106, 107].



Оцінити якість вод природних водних об'єктів з позиції пристосованості виду до певного рівня забрудненості і гідрохімічної відповідності можна за допомогою **індексів сапробності** [108]. Види лососевих риб, що використовуються для біоіндикації, із зазначенням ступеня сапробності води, яку витримують дані об'єкти, індикаторного значення та їх сапробної валентності, що показує, якою мірою вид характерний для водойми того чи іншого ступеня сапробності, і яка виражається однією або декількома цифрами, рівними для кожного виду 10, представлені в таблиці 4.

Таблиця 4. Біологічні показники якості води за видами-індикаторами з родини лососевих риб [109]

| Види | СС | КС | ОС | α-М | β-М | ПС | ІЗ |
|---------------------|-------|----|----|-----|-----|----|----|
| Звичайний сиг | ОС | – | 8 | 2 | – | – | 4 |
| Дунайський лосось | ОС-МС | – | 2 | 4 | 4 | – | 2 |
| Райдужна форель | ОС-МС | – | 5 | 5 | – | – | 3 |
| Струмкова форель | КС-ОС | 6 | 4 | – | – | – | 3 |
| Європейський харіус | ОС | 1 | 7 | 2 | – | – | 3 |

Примітка. СС — ступінь сапробності; КС — ксеносапроби; ОС — олігосапроби; α-М — α-мезосапроби; β-М — β-мезосапроби, ПС — полісапроби; ІЗ — індикаторне значення.

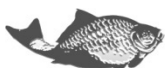
Вказаний метод має характер спостереження та передбачає існування певного виду лососевих риб за оптимальних для нього параметрів водного середовища і зникнення з водойм за погіршення екологічних умов. Як показують дані таблиці 4, наведені види лососевих риб, яким властива низька токсикорезистентність та підвищена сприйнятливість до негативного впливу, є переважно ксено- та олігосапробами.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

Загострення проблеми забруднення водного середовища поллютантами різноманітної природи, походження та характеру впливу на живі організми вимагає вдосконалення системи екологічного моніторингу гідроєкосистем. Можливими шляхами цього є включення до системи моніторингових досліджень чутливих видів риб, до яких відносяться лосоसेві. Такий підхід, з одного боку, дозволяє встановити факт забруднення водойм, а з іншого — вивчити особливості впливу ксенобіотиків на живі організми на різних рівнях організації живої речовини — від субклітинного до популяційного. В свою чергу, одержані під час проведення біомоніторингових досліджень дані можуть бути використані для нормування антропогенного навантаження на водні екосистеми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алабастер Дж. Критерии качества воды для пресноводных рыб / Дж. Алабастер, Р. Ллойд ; [пер. с англ. М. П. Ерофеева, С. В. Кожин, В. В. Кузнецов, О. П. Цвылев]. — М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. — 344 с.
2. Васенко А. Г. О роли биотестирования и биоиндикации в системе токсикологического контроля / А. Г. Васенко // Первая Всесоюзная



- конференція по рыбохозяйственной токсикологии (Юрмала, декабрь 1988 г.) : тезисы докл. Ч. 1. — Рига, 1988. — С. 55—56.
3. Моисеенко Т. И. Водная экотоксикология. Теоретические и прикладные аспекты / Моисеенко Т. И. ; Институт водных проблем РАН. — М. : Наука, 2009. — 400 с.
 4. Причины неблагополучного состояния запасов лососевидных рыб Печорского бассейна в современных условиях / В. П. Антонова, А. Л. Безумова, А. Г. Завиша [и др.] // Сборник научных трудов ГосНИОРХ. — 2000. — Вып. 326. — С. 31—40.
 5. Chovanec A. Fish as bioindicators / A. Chovanec, R. Hofer, F. Schiemer // Bioindicators & biomonitors. Principles, concepts and applications / [eds. V. A. Markert, A. M. Breure, H. G. Zechmeister]. — Oxford : Elsevier, 2003. — P. 639—676.
 6. Scardi M. Monitoring methods based on fish / M. Scardi, L. Tancioni, S. Cataudella // Biological monitoring of rivers / [eds. G. Ziglio, M. Siligardi, G. Flaim]. — Chichester : John Wiley & Sons, 2006. — P. 135—153.
 7. Курзыкина Л. Г. Влияние полиамидной смолы «Кюмене» на рыб и водных беспозвоночных / Л. Г. Курзыкина, Н. В. Артемьева // Проблемы водной токсикологии : межвузовский сборник. — Петрозаводск, 1985. — С. 54—57.
 8. USEPA biomonitoring and bioindicator concepts needed to evaluate the biological integrity of aquatic systems / J. M. Lazorchak, B. H. Hill, B.S. Brown [et al.] // Bioindicators & biomonitors. Principles, concepts and applications / [eds. V. A. Markert, A. M. Breure, H. G. Zechmeister]. — Oxford : Elsevier, 2003. — P. 831—874.
 9. Van der Oost R. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review / R. Van der Oost, J. Beyer, N. P. E. Vermeulen // Environ. Toxicol. Pharmacol. — 2003. — Vol. 13. — P. 57—149.
 10. Дудкин С. И. Биохимические методы биоиндикации токсического воздействия на гидробионты / С. И. Дудкин // Методы рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне. — Краснодар, 2005. — С. 292—315.
 11. Биоиндикация качества воды и состояния гидроекосистем с использованием характеристик особей, популяций и сообществ рыб / В. А. Демченко, А. Г. Антоновский, Н. А. Демченко [и др.] // Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології : І Міжнар. іхтіол. наук.-практ. конф. : тези. — Канів, 2008. — С. 52—56.
 12. Biomarkers / D. Schlenk, R. Handy, S. Steinert [et al.] // The toxicology of fishes / [eds. R. T. Di Giulio, D. E. Hinton]. — Boca Raton ; London ; New York : CRC Press, 2008. — P. 683—731.
 13. Munkittrick K. R. An integrated approach to aquatic ecosystem health: top-down, bottom-up or middle-out? / K. R. Munkittrick, L. S. McCarty // J. Aquat. Ecosyst. Health. — 1995. — Vol. 4. — P. 77—90.
 14. Руднева И. И. Применение биомаркеров рыб для экотоксикологической диагностики водной среды / И. И. Руднева // Рыбне господарство України. — 2006. — № 1(42). — С. 20—24.
 15. Molecular responses to environmental contamination: enzyme and protein systems as indicators of chemical exposure and effect / J. J. Stegeman, M. Brouwer, R. T. DiGiulio [et al.] // Biomarkers: biochemical, physiological, and histological markers of anthropogenic stress. — Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 1992. — P. 235—335.



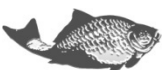
16. Stegeman J. J. Biochemistry and molecular biology of monooxygenases: current perspectives on forms, functions, and regulation of cytochrome P450 in aquatic species / J. J. Stegeman // *Aquatic Toxicology: Molecular, Biochemical, and Cellular Perspectives*. — Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 1994. — P. 87—206.
17. Stegeman J. J. Cytochrome P450 monooxygenase systems in aquatic species: carcinogen metabolism and biomarkers for carcinogen and pollutant exposure / J. J. Stegeman, J. J. Lech // *Environ. Health Perspect.* — 1991. — Vol. 90. — P. 101—109.
18. Stegeman J. J. The cytochromes P450 in fish / J. J. Stegeman // *Molecular Biology Frontiers*. — Amsterdam : Elsevier, 1993.
19. Bucheli T. D. Induction of cytochrome P450 as a biomarker for environmental contamination in aquatic ecosystems / T. D. Bucheli, K. Fent // *CRC Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* — 1995. — Vol. 25. — P. 201—268.
20. Cook P. M. The TCDD toxicity equivalence approach for characterizing risks for early life-stage mortality in trout / P. M. Cook, E. W. Zabel, R. E. Peterson // *Chemically induced alterations in functional development and reproduction of fishes*. — Pensacola, FL : SETAC Press, 1997. — P. 9—27.
21. Buhler D. R. Rainbow trout cytochrome P450s: purification, molecular aspects, metabolic activity, induction, and role in environmental monitoring / D. R. Buhler, J. L. Wang-Buhler // *Comp. Biochem. Physiol.* — 1998. — Vol. 121C. — P. 107—137.
22. Sarasquete C. Cytochrome P4501A (CYP1A) in teleostean fishes. A review of immunohistochemical studies / C. Sarasquete, H. Segner // *The Science of the Total Environment*. — 2000. — Vol. 247, № 2—3. — P. 313—332.
23. Hahn M. E. Xenobiotic receptors in fish: structural and functional diversity and evolutionary insights / M. E. Hahn, R. R. Merson, S. I. Karchner // *Biochemistry and molecular biology of fishes*. Vol. 6. *Environmental Toxicology*. — Amsterdam : Elsevier, 2005. — P. 191—232.
24. Юрченко В. В. Активность этоксирезорифин-О-диэтилазы (ЭРОД) рыб как биомаркер загрязнения водной среды стойкими органическими загрязняющими веществами / В. В. Юрченко, Г. М. Чуйко // *Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов*. Т. 1 : *Экологическая физиология и биохимия водных организмов : сборник науч. статей*. — Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2010. — С. 316—319.
25. Johansson-Sjöbeck M. L. Effects of inorganic δ -amino levulinic acid dehydratase activity and haematological variables in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) / M. L. Johansson-Sjöbeck, A. Larsson // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* — 1979. — Vol. 8. — P. 419—431.
26. Cortisol induction of metallothionein in primary cultures of rainbow trout hepatocytes / J. S. Hyllner, C. Haux, T. Andersson [et al.] // *J. Cell Physiol.* — 1989. — Vol. 139. — P. 24—28.
27. The role of metallothionein in cadmium accumulation of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) from high mountain lakes / R. Dallinger, M. Egg, G. Köck [et al.] // *Aquat. Toxicol.* — 1997. — Vol. 38. — P. 47—66.
28. Stress protein expression in fish / G. K. Iwama, M. M. Thomas, M. M. Vijayan [et al.] // *Rev. Fish Biol. Fish.* — 1998. — Vol. 8. — P. 35—56.
29. Heat shock proteins and physiological stress in fish / G. K. Iwama, M. M. Vijayan, R. B. Forsyth [et al.] // *Am. Zoologist*. — 1999. — Vol. 39. — P. 901—909.
30. Janssens de Bisthoven L. Biomonitoring with morphological deformities in aquatic organisms / L. Janssens de Bisthoven // *Biomonitoring of Polluted Water*. *Environmental Research Forum*. — 1999. — Vol. 9. — P. 65—94.



31. Петухов С. А. Роль металлотіонеїна в концентруванні важких металів рибами / С. А. Петухов, А. И. Глубоков, И. Н. Горкин // Экологические аспекты химического и радиоактивного загрязнения водной среды : сборник науч. трудов ВНИРО. — М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. — С. 36—40.
32. Roesijadi G. Metallothionein in metal regulation and toxicology / G. Roesijadi // *Aquat. Toxicol.* — 1992. — Vol. 22. — P. 81—114.
33. Sato M. Oxygen free radicals and metallothionein / M. Sato, I. Bremner // *Free Radic. Biol. Med.* — 1993. — Vol. 14. — P. 325—337.
34. Olsson P. E. Metallothionein gene expression and regulation in fish / P. E. Olsson // *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes.* — Amsterdam : Elsevier, 1993. — P. 259—278.
35. Olsson P. E. Metallothioneins in fish: induction and use in environmental monitoring / P. E. Olsson // *Toxicology of Aquatic Pollution: Physiological, Molecular and Cellular Approaches.* — Cambridge, U.K. : Cambridge University Press, 1996. — P. 187—203.
36. Interaction of cadmium and oestradiol 17 beta on metallothionein and vitellogenin synthesis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / P. E. Olsson, P. Kling, C. Petterson [et al.] // *Biochem. J.* — 1995. — Vol. 307. — P. 197—203.
37. The physiological impairment of free-ranging brown trout exposed to metals in the Clarke Fork River, Montana / A. M. Farag, M. A. Stansbury, C. Hogstrund [et al.] // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* — 1995. — Vol. 52. — P. 2038—2050.
38. Столяр О. Б. Роль металотіонеїнів в детоксикації йонів міді і цинку, марганцю та свинцю в організмі прісноводних риб і молюсків : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. біол. наук / О. Б. Столяр. — Львів, 2004. — 32 с.
39. Порівняльний аналіз функції металотіонеїнів прісноводних тварин за дії на організм важких металів / О. Б. Столяр, Г. І. Фальфушинська, Р. Л. Михайлів [та ін.] // Наукові записки Тернопільського нац. пед. ун-ту імені Володимира Гнатюка. — 2005. — №3(26) : Спеціальний випуск: Гідроекологія. — С. 423—425. — (Серія : Біологія).
40. Kling P. Metallothionein: structure and regulation / P. Kling, P. E. Olsson // *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes.* Vol. 6. *Environmental Toxicology.* — Amsterdam : Elsevier, 2005. — P. 289—302.
41. Функції металотіонеїнів та системи антиоксидантного захисту за дії Co- та Zn-вмісних нанокompatитів на карася сріблястого (*Carassius auratus gibelio*) / Г. І. Фальфушинська, Л. Л. Гнатишина, О. О. Турта [та ін.] // Український біохімічний журнал. — 2013. — Т. 85, № 3. — С. 52—61.
42. Kothary R. K. Induction of a novel set of polypeptides by heat shock or sodium arsenite in cultured cells of rainbow trout / R. K. Kothary, E. P. M. Candido // *Can. J. Biochem.* — 1982. — Vol. 60. — P. 347—357.
43. Sanders B. M. Stress proteins in aquatic organisms: an environmental perspective / B. M. Sanders // *CRC Crit. Rev. Toxicol.* — 1993. — Vol. 23. — P. 49—75.
44. Accumulation of HSP70 in juvenile and adult rainbow trout gill exposed to metal-contaminated water and/or diet / J. H. Williams, A. M. Farag, M. A. Stasbury [et al.] // *Environ. Toxicol. Chem.* — 1996. — Vol. 15. — P. 1324—1328.
45. Handling stress does not affect the expression of hepatic heat shock protein 70 and conjugation enzymes in rainbow trout treated with beta-naphthoflavone / M. M. Vijayan, C. Pereira, R. B. Forsyth [et al.] // *Life Sci.* — 1997. — Vol. 61. — P. 117—127.



46. Heat shock protein expression in fish / G. K. Iwama, P. T. Thomas, R. B. Forsyth [et al.] // *Rev. Fish Biol. Fish.* — 1998. — Vol. 8. — P. 35—56.
47. Induction of heme oxygenase in fish by heavy metals, phenylhydrazine and high lipid diets / M. Lunde, B. E. Gosvik, K. Hamre [et al.] // 9th Intern. Symp. on Pollutant Responses in Marine Organisms (PRIMO 9) (Bergen, Norway, April 27-30) : proc. — Bergen, 1998.
48. Genetic damage and the molecular/cellular response to pollution / M.P. Cajaraville, L. Hauser, G. Carvalho [et al.] // *Effects of pollution on fish. Molecular effects and population responses* / [eds. A. Lawrence, K. Hemingway]. — Oxford : Blackwell Science, 2003. — P. 14—82.
49. Онисковец М. Я. Влияние ионов свинца на уровень экспрессии белков теплового шока HSP70 и HSC70 в головном мозге *Cyprinus carpio* L. / М. Я. Онисковец, В. В. Снитинский // *Труды БГУ.* — 2013. — Т. 8, ч. 1. — С. 167—169.
50. Kurelec B. A new type of hazardous chemical: the chemosensitizers of multixenobiotic resistance / B. Kurelec // *Environ. Health Perspect.* — 1997. — Vol. 105. — P. 855—860.
51. Kurelec B. The multixenobiotic resistance mechanism in aquatic organisms / B. Kurelec // *CRC Crit. Rev. Toxicol.* — 1992. — Vol. 22. — P. 23—43.
52. Expression and functional activity of P-glycoprotein in cultured hepatocytes from *Oncorhynchus mykiss* / A. Sturm, C. Ziemann, K. I. Hirsch-Ernst [et al.] // *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* — 2001. — Vol. 281. — P. R1119—1126.
53. Sturm A. P-glycoproteins and xenobiotic efflux transport in fish / A. Sturm, H. Segner // *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes* / [eds. T. P. Mommsen, T. W. Moon]. — 2005. — Vol. 6. — P. 495—533.
54. Gene expression analysis of the ABC efflux transporters in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / J. Loncar, M. Popovic, R. Zaja [et al.] // *Comp. Biochem. Physiol.* — 2010. — Vol. C, 151. — P. 209—215.
55. P-gp expression in brown trout erythrocytes: evidence of a detoxification mechanism in fish erythrocytes / E. Valton, C. Amblard, I. Wawrzyniak [et al.] // *Scientific Reports.* — 2013. — № 3.
56. Effects on UDP glucuronosyl transferase, glutathione transferase, DT-diaphorase and glutathione reductase activities in rainbow trout liver after long-term exposure to PCB / L. Forlin, S. Blom, M. Celander [et al.] // *Mar. Environ. Res.* — 1996. — Vol. 42. — P. 213—216.
57. Forlin L. Comparative studies of hepatic xenobiotic metabolizing and antioxidant enzymes in different fish species / L. Forlin, P. Lemaire, D. R. Livingstone // *Mar. Environ. Res.* — 1995. — Vol. 39. — P. 201—204.
58. Борвинская Е. В. Глутатион-S-трансферазы рыб — потенциальные экологобиохимические индикаторы антропогенного воздействия на водную среду (обзор) / Е. В. Борвинская, Л. П. Смирнов, Н. Н. Немова // *Труды Карельского научного центра РАН.* — 2009. — № 3. — С. 8—19.
59. Incorporation of biomarkers into ecological risk assessments of contaminated nearshore marine habitats / T. K. Collier, L. L. Johnson, M. S. Myers [et al.] // *Mar. Environ. Res.* — 1996. — Vol. 42. — P. 274—275.
60. Ruddock P. J. Bile metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in three species of fish from the severn estuary / P. J. Ruddock, D. J. Bird, D. V. McCalley // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* — 2002. — Vol. 51. — P. 97—105.



61. Metabolic products as biomarkers / M. J. Melancon, R. Alscher, W. H. Benson [et al.] // Biomarkers: Biochemical, Physiological, and Histological Markers of Anthropogenic Stress. — Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 1992. — P. 87—123.
62. Xu H. Suitability of carboxylated porphyrin profiles as a biochemical indicator in whitefish (*Coregonus clupeaformis*) exposed to bleached kraft pulp mill effluent / H. Xu, S. Lesage, K. R. Munkittrick // Environ. Toxicol. Water Q. — 1994. — Vol. 9. — P. 223—230.
63. Spear P. A. Retinoids: from metabolism to environmental monitoring / P. A. Spear, A. Y. Bilodeau, A. Branchard // Chemosphere. — 1992. — Vol. 25. — P. 1733—1738.
64. Effects of 3,3',4,4'-tetrachlorobiphenyl on the dynamics of vitamin A in brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and intestinal retinoid concentrations in lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) / A. Ndayibagira, M. J. Cloutier, P. D. Anderson [et al.] // Can. J. Fish. Aquat. Sci. — 1995. — Vol. 52. — P. 512—520.
65. The biology and toxicology of retinoids in fish / D. Alsop, G. Van der Kraak, S. B. Brown [et al.] // Biochemistry and Molecular Biology of Fishes. Vol. 6. Environmental Toxicology. — Amsterdam : Elsevier, 2005. — P. 413—430.
66. Gillespie R. B. Allozyme frequency analysis of aquatic populations as an indicator of contaminant-induced impacts / R. B. Gillespie, S. I. Guttman // Environmental Toxicology and Risk Assessment. Vol. 2. — Philadelphia, PA : American Society for Testing and Materials, 1993. — P. 34—135.
67. Genetic and molecular ecotoxicology: a research framework / S. Anderson, W. Sadinski, L. Shugart [et al.] // Environ. Health Perspect. — 1994. — Vol. 102, suppl. 12. — P. 3—8.
68. High frequency of K-ras mutations in pink salmon embryos experimentally exposed to Exxon Valdez oil / N. K. Roy, J. Stabile, J. E. Seeb [et al.] // Environ. Toxicol. Chem. — 1999. — Vol. 18. — P. 1521—1528.
69. Theodorakis C. W. Genetic responses as population-level biomarkers of stress in aquatic ecosystems / C. W. Theodorakis, I. I. Wirgin // Biological indicators of aquatic ecosystem stress. — Bethesda, MD : American Fisheries Society, 2002. — P. 149—186.
70. Wirgin I. I. Molecular biomarkers in aquatic organisms: DNA damage and RNA expression / I. I. Wirgin, C. W. Theodorakis // Biological indicators of aquatic ecosystem stress. — Bethesda, MD : American Fisheries Society, 2002. — P. 43—110.
71. Fish and chips: various methodologies demonstrate utility of a 16,006-gene salmonid microarray / K. R. von Schalburg, M. L. Rise, G. A. Cooper [et al.] // BMC Genomics. — 2005. — Vol. 6. — P. 126.
72. Gene expression patterns in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, exposed to a suite of model toxicants / S. E. Hook, A. D. Skillman, J. A. Small [et al.] // Aquat. Toxicol. — 2006. — Vol. 77. — P. 372—385.
73. Differential gene expression associated with dietary methylmercury (MeHg) exposure in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and zebrafish (*Danio rerio*) / Q. Liu, N. Basu, G. Goetz [et al.] // Ecotoxicology. — 2013. — Vol. 22(4). — P. 740—751.
74. Korcock D. E. Effects of sampling conditions on selected blood variables of rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson / D. E. Korcock, A. H. Houston, J. D. Gray // J. Fish Biol. — 1988. — Vol. 33. — P. 319—330.



75. Iwama G. K. The effects of five fish anaesthetics on acid-base balance, haematocrit, blood gases, cortisol, and adrenaline in rainbow trout / G. K. Iwama, J. C. McGeer, M. P. Pawluk // *Can. J. Zool.* — 1989. — Vol. 76. — P. 2065—2073.
76. Waring C. P. The effects of handling on flounder (*Platichthys flesus* L.) and Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) / C. P. Waring, R. M. Stagg, M. G. Poxton // *J. Fish Biol.* — 1992. — Vol. 41. — P. 131—144.
77. Houston A. H. Review: are the classical hematological variables acceptable indicators of fish health / A. H. Houston // *Trans. Am. Fish. Soc.* — 1997. — Vol. 126. — P. 879—894.
78. Sepúlveda M. S. Physiological changes in largemouth bass exposed to paper mill effluents under laboratory and field conditions / M. S. Sepúlveda, E. P. Gallagher, T. S. Gross // *Ecotoxicology.* — 2004. — Vol. 13. — P. 291—301.
79. Histopathological markers for copper toxicity in rainbow trout fry (*Oncorhynchus mykiss*) / N. A. Salman, J. L. Ullman, K. Snekvik [et al.] // *Basrah J. Agric. Sci.* — 2012. — Vol. 25, sp. iss. 2. — P. 26—39.
80. Inhibition of testicular growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to estrogenic alkylphenolic chemicals / S. Jobling, D. Sheahan, J. A. Osborne [et al.] // *Environ. Toxicol. Chem.* — 1996. — Vol. 15. — P. 194—202.
81. Руднева И. И. Изменение состава сывороточных преальбуминов рыб как ответная реакция на хроническое загрязнение морской среды / И. И. Руднева, Т. Б. Вахтина, И. Н. Залевская // *Проблемы иммунологии, патологии и охраны здоровья рыб и других гидробионтов-2 : Междунар. науч.-практ. конф. : расш. мат.* — Борок ; М., 2007. — С. 230—233.
82. Ali Louei Monfared. Histomorphometric and biochemical studies on the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after exposure to sublethal concentrations of phenol / Ali Louei Monfared, Amir Parviz Salati // *Toxicology and Industrial Health.* — 2012. — Vol. 29, № 9. — P. 856—861.
83. A field study of physiological effects on fish in lead-contaminated lakes / C. Haux, Å. Larsson, G. Lithner [et al.] // *Environ. Toxicol. Chem.* — 1986. — Vol. 5. — P. 283—288.
84. Inhibition of testicular growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to estrogenic alkylphenolic chemicals / S. Jobling, D. Sheahan, J. A. Osborne [et al.] // *Environ. Toxicol. Chem.* — 1996. — Vol. 15. — P. 194—202.
85. Pottinger T. G. The three-spined stickleback as an environmental sentinel: effects of stressors on whole-body physiological indices / T. G. Pottinger, T. R. Carrick, W. E. Yeomans // *J. Fish Biol.* — 2002. — Vol. 61. — P. 207—229.
86. Immunocompetence of juvenile Chinook salmon against *Listonella anguillarum* following dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons / R. C. Palm, D. B. Powell, A. Skillman [et al.] // *Environ. Toxicol. Chem.* — 2003. — Vol. 22. — P. 2986—2994.
87. Toxic effects of dietborne metals: laboratory studies / R. D. Handy, J. C. McGeer, H. E. Allen [et al.] // *Toxic effects of dietborne metal exposure: laboratory studies.* — Pensacola, FL : SETAC Press, 2005. — P. 59—112.
88. Dethloff G. M. Effects of dissolved copper on select hematological, biochemical, and immunological parameters of wild rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / G. M. Dethloff, H. C. Bailey, K. J. Maier // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* — 2001. — Vol. 40. — P. 371—380.
89. Toxicology of dietary nickel in lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) / M. D. Ptashynski, R. M. Pedlar, R. E. Evans [et al.] // *Aquat. Toxicol.* — 2002. — Vol. 58. — P. 229—247.



90. Maximum limits of organic and inorganic mercury in fish feed / M. H. G. Berntssen, K. Hylland, K. Julshamn [et al.] // *Aquacult. Nutr.* — 2004. — Vol. 10. — P. 83—97.
91. Adiele R. C. Reciprocal enhancement of uptake and toxicity of cadmium and calcium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) liver mitochondria / R. C. Adiele, D. Stevens, C. Kamunde // *Aquatic Toxicology.* — 2010. — Vol. 96, iss. 4. — P. 319—327.
92. Desforges P. R. The effects of exogenous extracellular carbonic anhydrase on CO₂ excretion in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): role of plasma buffering capacity / P. R. Desforges, K. M. Gilmour, S. F. Perry // *J. Comp. Physiol.* — 2001. — Vol. 171B. — P. 465—473.
93. Handy R. D. Biomarker approaches for ecotoxicological biomonitoring at different levels of biological organisation / R. D. Handy, A. N. Jha, M. H. Depledge // *Handbook of Environmental Monitoring.* — New York, 2002. — P. 9.1—9.32.
94. Hinton D. E. Integrative histological approaches to detecting effects of environmental stressors on fishes / D. E. Hinton, D. J. Laurén // *Biological Indicators of Stress in Fish.* Vol. VIII. — Bethesda, MD : American Fisheries Society, 1990. — P. 51—66.
95. Histopathologic biomarkers / D. E. Hinton, P. C. Baumann, G. R. Gardner [et al.] // *Biomarkers: biochemical, physiological, and histological markers of anthropogenic stress.* — Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 1992. — P. 155—209.
96. Liebel S. Fish histopathology as biomarker to evaluate water quality / S. Liebel, M. E. M. Tomotake, C. A. Oliveira Ribeiro // *Ecotoxicol. Environ. Contam.* — 2013. — Vol. 8, iss. 2. — P. 9—15.
97. Reddy P. B. Assessment of aquatic pollution using histopathology in fish as a protocol / P. B. Reddy, S. S. Rawat // *International Research Journal of Environment Sciences.* — 2013. — Vol. 2, iss. 8. — P. 79—82.
98. Терновенко В. А. Поведенческие реакции рыб и их использование для обнаружения загрязнителей в водной среде / В. А. Терновенко, Е. Л. Никифоров // *Методы ихтиотоксикологических исследований : Первый Всесоюз. симп. по методам ихтиотокс. исследований (Ленинград, октябрь 1987 г.) : тезисы докл.* — Л., 1987. — С. 125—126.
99. Черкашин С. А. Метод оценки токсичности веществ, основанный на избегании гидробионтами неблагоприятных факторов / С. А. Черкашин // *Методы ихтиотоксикологических исследований : Первый Всесоюз. симп. по методам ихтиотокс. исследований (Ленинград, октябрь 1987 г.) : тезисы докл.* — Л., 1987. — С. 133—135.
100. Little E. E. Swimming behaviour as an indicator of sublethal toxicity in fish / E. E. Little, S. E. Finger // *Environ. Toxicol. Chem.* — 1990. — Vol. 9. — P. 13—20.
101. Handy R. D. Physiological responses: their measurement and use as environmental biomarkers in ecotoxicology / R. D. Handy, M. H. Depledge // *Ecotoxicology.* — 1999. — Vol. 8. — P. 329—349.
102. Metabolic trade-off between locomotion and detoxification for maintenance of blood chemistry and growth parameters by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during chronic dietary exposure to copper / R. D. Handy, D. W. Sims, A. Giles [et al.] // *Aquat. Toxicol.* — 1999. — Vol. 47, № 1. — P. 23—41.
103. Campbell H. A. Increased metabolic cost of swimming and consequent alterations to circadian activity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to dietary



- copper / H. A. Campbell, R. D. Handy, D. W. Sims // Can. J. Fish. Aquat. Sci. — 2002. — Vol. 59. — P. 768—777.
104. Campbell H. A. Shifts in a fish's resource holding power during a contact paired interaction: the influence of a copper contaminated diet in rainbow trout / H. A. Campbell, R. D. Handy, D. W. Sims // Physiol. Biochem. Zool. — 2005. — Vol. 78. — P. 706—714.
105. Scott G. R. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity / G. R. Scott, K. A. Sloman // Aquatic Toxicology. — 2004. — Vol. 68. — P. 369—392.
106. Шакирова Ф. М. Биоіндикація забруднення Куйбышевського водохранилища по морфологічним аномаліям риб / Ф. М. Шакирова // Рациональное использование пресноводных экосистем — перспективное направление реализации национального проекта «Развитие АПК»: Междунар науч.-практ. конф., 17-19 дек. 2007 г. : мат. — М., 2007. — С. 370—372.
107. Швырева Н. С. Ихтиоценозы как эффективный индикатор экологического состояния водоемов / Н. С. Швырева // Рациональное использование пресноводных экосистем — перспективное направление реализации национального проекта «Развитие АПК»: Междунар науч.-практ. конф., 17-19 дек. 2007 г. : мат. — М., 2007. — С. 432—433.
108. Kolkwitz R. Grundsätze für die biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora und Fauna. Aus. 1 / R. Kolkwitz, M. Marsson. — BerlinDahlem : Mitteilungen der königlichen Prüfanstalt Wasserversorgung Abwasserbeseitigung, 1902. — P. 33—72.
109. Олексив И. Т. Показатели качества природных вод с экологических позиций / Олексив И. Т. — Львов : Свит, 1994. — 234 с.

REFERENCES

1. Alabaster, Dzh., & Lloyd, R. (1984). *Kriterii kachestva vody dlya presnovodnykh ryb*. Moskva : Legkaya i pishchevaya promyshlennost'.
2. Vasenko, A. G. (1988). O roli biotestirovaniya i bioindikatsii v sisteme toksikologicheskogo kontrolya. *Pervaya Vsesoyuznaya konferentsiya po rybokhozyaystvennoy toksikologii: tezisy dokladov. Ch. I*. Riga, 55-56.
3. Moiseenko, T. I. (2009). *Vodnaya ekotoksikologiya. Teoreticheskie i prikladnye aspekty*. Moskva : Nauka.
4. Antonova, V. P., Bezumova, A. L., & Zavisha, A. G. et al. (2000). Prichiny neblagopoluchnogo sostoyaniya zapasov lososevidnykh ryb Pechorskogo basseyna v sovremennykh usloviyakh. *Sbornik nauchnykh trudov GosNIORKh*, 326, 31-40.
5. Chovanec, A., Hofer, R., & Schiemer, F. (2003). Fish as bioindicators. *Bioindicators & biomonitors. Principles, concepts and applications*. Oxford : Elsevier, 639-676.
6. Scardi, M., Tancioni, L., & Cataudella, S. (2006). Monitoring methods based on fish. *Biological monitoring of rivers*. Chichester : John Wiley & Sons, 135-153.
7. Kurzykina, L. G., & Artem'eva, N. V. (1985). Vliyanie poliamidnoy smoly «Kyumene» na ryb i vodnykh bespozvonochnykh. *Problemy vodnoy toksikologii*. Petrozavodsk, 54-57.
8. Lazorchak, J. M., Hill, B. H., & Brown, B. S. et al. (2003). USEPA biomonitoring and bioindicator concepts needed to evaluate the biological integrity of aquatic systems. *Bioindicators & biomonitors. Principles, concepts and applications*. Oxford : Elsevier, 831-874.



9. Van der Oost, R., Beyer, J., & Vermeulen, N. P. E. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 13, 57-149.
10. Dudkin, S. I. (2005). Biokhimicheskie metody bioindikatsii toksicheskogo vozdeystviya na gidrobionty. *Metody rybokhozyaystvennykh i prirodookhrannykh issledovaniy v Azovo-Chernomorskom bassejne*. Krasnodar, 292-315.
11. Demchenko, V. A., Antonovskiy, A. G., & Demchenko, N. A. et al. (2008). Bioindikatsiya kachestva vody i sostoyaniya gidroekosistem s ispol'zovaniem kharakteristik osobey, populyatsiy i soobshchestv ryb. *Suchasni problemy teoretychnoi ta praktychnoi ikhtiologii : I Mizhnarodna ikhtiologichna naukovopraktychna konferentsiia : tezy*. Kaniv, 52-56.
12. Schlenk, D., Handy, R., & Steinert, S. (2008). Biomarkers. *The toxicology of fishes*. Boca Raton ; London ; New York : CRC Press, 683-731.
13. Munkittrick, K. R., & McCarty, L. S. (1995). An integrated approach to aquatic ecosystem health: top-down, bottom-up or middle-out? *J. Aquat. Ecosyst. Health*, 4, 77-90.
14. Rudneva, I. I. (2006). Primenenie biomarkerov ryb dlya ekotoksikologicheskoy diagnostiki vodnoy sredi. *Rybne hospodarstvo Ukrainy*, 1(42), 20-24.
15. Stegeman, J. J., Brouwer, M., & DiGuilio, R. T. (1992). Molecular responses to environmental contamination: enzyme and protein systems as indicators of chemical exposure and effect. *Biomarkers: biochemical, physiological, and histological markers of anthropogenic stress*. Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 235-335.
16. Stegeman, J. J. (1994). Biochemistry and molecular biology of monooxygenases: current perspectives on forms, functions, and regulation of cytochrome P450 in aquatic species. *Aquatic Toxicology: Molecular, Biochemical, and Cellular Perspectives*. Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 87-206.
17. Stegeman, J. J., & Lech, J. J. (1991). Cytochrome P450 monooxygenase systems in aquatic species: carcinogen metabolism and biomarkers for carcinogen and pollutant exposure. *Environ. Health Perspect.*, 90, 101-109.
18. Stegeman, J. J. (1993). The cytochromes P450 in fish. *Molecular Biology Frontiers*. Amsterdam : Elsevier.
19. Bucheli, T. D., & Fent, K. (1995). Induction of cytochrome P450 as a biomarker for environmental contamination in aquatic ecosystems. *CRC Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 25, 201-268.
20. Cook, P. M., Zabel, E. W., & Peterson, R. E. (1997). The TCDD toxicity equivalence approach for characterizing risks for early life-stage mortality in trout. *Chemically induced alterations in functional development and reproduction of fishes*. Pensacola, FL : SETAC Press, 9-27.
21. Buhler, D. R., & Wang-Buhler, J. L. (1998). Rainbow trout cytochrome P450s: purification, molecular aspects, metabolic activity, induction, and role in environmental. *Comp. Biochem. Physiol.*, 121C, 107-137.
22. Sarasquete, C., & Segner, H. (2000). Cytochrome P4501A (CYP1A) in teleostean fishes. A review of immunohistochemical studies. *The Science of the Total Environment*, 247, 2-3, 313-332.
23. Hahn, M. E., Merson, R. R., & Karchner, S. I. (2005). Xenobiotic receptors in fish: structural and functional diversity and evolutionary insights. *Biochemistry and molecular biology of fishes. 6. Environmental Toxicology*. Amsterdam : Elsevier, 191-232.



24. Yurchenko, V. V., & Chuyko, G. M. (2010). Aktivnost' etoksirezorufin-O-dietilazy (EROD) ryb kak biomarker zagryazneniya vodnoy sredy stoykimi organicheskimi zagryaznyayushchimi veshchestvami. *Sovremennye problemy fiziologii i biokhimi vodnykh organizmov. T. 1 : Ekologicheskaya fiziologiya i biokhimiya vodnykh organizmov : sbornik nauchnykh statey*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 316-319.
25. Johansson-Sjöbeck, M. L., & Larsson, A. (1979). Effects of inorganic δ -amino levulinic acid dehydratase activity and haematological variables in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 8, 419-431.
26. Hyllner, J. S., Haux, C., & Andersson, T. et al. (1989). Cortisol induction of metallothionein in primary cultures of rainbow trout hepatocytes. *J. Cell Physiol.*, 139, 24-28.
27. Dallinger, R., Egg, M., & Köck, G. et al. (1997). The role of metallothionein in cadmium accumulation of Arctic char (*Salvelinus alpinus*) from high mountain lakes. *Aquat. Toxicol.*, 38, 47-66.
28. Iwama, G. K., Thomas, M. M., & Vijayan, M. M. et al. (1998). Stress protein expression in fish. *Rev. Fish Biol. Fish.*, 8, 35-56.
29. Iwama, G. K., Vijayan, M. M., & Forsyth, R. B. et al. (1999). Heat shock proteins and physiological stress in fish. *Am. Zoologist.*, 39, 901-909.
30. Janssens de Bisthoven, L. (1999). Biomonitoring with morphological deformities in aquatic organisms. *Biomonitoring of Polluted Water. Environmental Research Forum*, 9, 65-94.
31. Petukhov, S. A., Glubokov, A. I., & Gorkin, I. N. (1983). Rol' metalotioneina v kontsentriruvanii tyazhelykh metallov rybami. *Ekologicheskie aspekty khimicheskogo i radioaktivnogo zagryazneniya vodnoy sredy : sbornik nauchnykh trudov VNIRO. M. : Legkaya i pishchevaya promyshlennost'*, 36-40.
32. Roesijadi, G. (1992). Metallothionein in metal regulation and toxicology. *Aquat. Toxicol.*, 22, 81-114.
33. Sato, M., & Bremner, I. (1993). Oxygen free radicals and metallothionein. *Free Radic. Biol. Med.*, 14, 325-337.
34. Olsson, P. E. (1993). Metallothionein gene expression and regulation in fish. *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes*. Amsterdam : Elsevier, 259-278.
35. Olsson, P. E. (1996). Metallothioneins in fish: induction and use in environmental monitoring. *Toxicology of Aquatic Pollution: Physiological, Molecular and Cellular Approaches*. Cambridge, U.K. : Cambridge University Press, 187-203.
36. Olsson, P. E., Kling, P., & Petterson, C. et al. (1995). Interaction of cadmium and oestradiol 17 beta on metallothionein and vitellogenin synthesis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Biochem. J.*, 307, 197-203.
37. Farag, A. M., Stansbury, M. A., & Hogstrund, C. et al. (1995). The physiological impairment of free-ranging brown trout exposed to metals in the Clarke Fork River, Montana. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 52, 2038-2050.
38. Stoliar, O. B. (2004). Rol metalotioneininiv v detoksykatsii yoniv midi i tsynku, marhantsiu ta svyntsiu v orhanizmi prsnovodnykh ryb i moliuskiv. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Lviv.
39. Stoliar, O. B., Falfushynska, H. I., & Mykhailiv, R. L. et al. (2005). Porivnialnyi analiz funktsii metalotioneininiv prsnovodnykh tvaryn za dii na orhanizm vazhkykh metaliv. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka*, 3(26), 423-425.
40. Kling, P., & Olsson, P. E. (2005). Metallothionein: structure and regulation. *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes. 6. Environmental Toxicology*. Amsterdam : Elsevier, 289-302.



41. Falfushynska, H. I., Hnatyshyna, L. L., & Turta, O. O. (2013). Funktsii metalotioneiniv ta systemy antyoksydantnoho zakhystu za dii Co- ta Zn-vmisnykh nanokompozytiv na karasia sribliastoho (*Carassius auratus gibelio*). *Ukrainskyi biokhimichnyi zhurnal*, 85, 3, 52-61.
42. Kothary, R. K., & Candido, E. P. M. (1982). Induction of a novel set of polypeptides by heat shock or sodium arsenite in cultured cells of rainbow trout. *Can. J. Biochem.*, 60, 347-357.
43. Sanders, B. M. (1993). Stress proteins in aquatic organisms: an environmental perspective. *CRC Crit. Rev. Toxicol.*, 23, 49-75.
44. Williams, J. H., Farag, A. M., & Stasbury, M. A. et al. (1996). Accumulation of HSP70 in juvenile and adult rainbow trout gill exposed to metal-contaminated water and/or diet. *Environ. Toxicol. Chem.*, 15, 1324-1328.
45. Vijayan, M. M., Pereira, C., & Forsyth, R. B. et al. (1997). Handling stress does not affect the expression of hepatic heat shock protein 70 and conjugation enzymes in rainbow trout treated with beta-naphthoflavone. *Life Sci.*, 61, 117-127.
46. Iwama, G. K., Thomas, P. T., & Forsyth, R. B. et al. (1998). Heat shock protein expression in fish. *Rev. Fish Biol. Fish*, 8, 35-56.
47. Lunde, M., Gosvik, B. E., & Hamre, K. (1998). Induction of heme oxygenase in fish by heavy metals, phenylhydrazine and high lipid diets. *9th International Symposium on Pollutant Responses in Marine Organisms (PRIMO 9) : proceedings*. Bergen.
48. Cajavaville, M. P., Hauser, L., & Carvalho, G. et al. (2003). Genetic damage and the molecular/cellular response to pollution. *Effects of pollution on fish. Molecular effects and population responses*. Oxford : Blackwell Science, 14-82.
49. Oniskovets, M. Ya., & Snitinskiy, V. V. (2013). Vliyanie ionov svintsa na uroven' ekspresii belkov teplovogo shoka HSP70 i HSS70 v golovnom mozge *Cyprinus carpio* L. *Trudy BGU*, 8, 1, 167-169.
50. Kurelec, B. (1997). A new type of hazardous chemical: the chemosensitizers of multixenobiotic resistance. *Environ. Health Perspect.*, 105, 855-860.
51. Kurelec, B. (1992). The multixenobiotic resistance mechanism in aquatic organisms. *CRC Crit. Rev. Toxicol.*, 22, 23-43.
52. Sturm, A., Ziemann, C., & Hirsch-Ernst, K. I. et al. (2001). Expression and functional activity of P-glycoprotein in cultured hepatocytes from *Oncorhynchus mykiss*. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 281, R1119-1126.
53. Sturm, A., & Segner, H. (2005). P-glycoproteins and xenobiotic efflux transport in fish. *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes*, 6, 495-533.
54. Loncar, J., Popovic, M., & Zaja, R. et al. (2010). Gene expression analysis of the ABC efflux transporters in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comp. Biochem. Physiol., C*, 151, 209-215.
55. Valton, E., Amblard, C., & Wawrzyniak, I. et al. (2013). P-gp expression in brown trout erythrocytes: evidence of a detoxification mechanism in fish erythrocytes. *Scientific Reports*, 3.
56. Forlin, L., Blom, S., & Celander, M. et al. (1996). Effects on UDP glucuronosyl transferase, glutathione transferase, DT-diaphorase and glutathione reductase activities in rainbow trout liver after long-term exposure to PCB. *Mar. Environ. Res.*, 42, 213-216.
57. Forlin, L., Lemaire, P., & Livingstone, D. R. (1995). Comparative studies of hepatic xenobiotic metabolizing and antioxidant enzymes in different fish species. *Mar. Environ. Res.*, 39, 201-204.



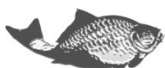
58. Borvinskaya, E. V., Smirnov, L. P., & Nemova, N. N. (2009). Glutation-S-transferazy ryb — potentsial'nye ekologobiokhimicheskie indikatory antropogennogo vozdeystviya na vodnuyu sredu (obzor). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 3, 8-19.
59. Collier, T. K., Johnson, L. L., & Myers, M. S. (1996). Incorporation of biomarkers into ecological risk assessments of contaminated nearshore marine habitats. *Mar. Environ. Res.*, 42, 274-275.
60. Ruddock, P. J., Bird, D. J., & McCalley, D. V. (2002). Bile metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in three species of fish from the severn estuary. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 51, 97-105.
61. Melancon, M. J., Alscher, R., & Benson, W. H. et al. (1992). Metabolic products as biomarkers. *Biomarkers: Biochemical, Physiological, and Histological Markers of Anthropogenic Stress*. Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 87-123.
62. Xu, H., Lesage, S., & Munkittrick, K. R. (1994). Suitability of carboxylated porphyrin profiles as a biochemical indicator in whitefish (*Coregonus clupeaformis*) exposed to bleached kraft pulp mill effluent. *Environ. Toxicol. Water Q.*, 9, 223-230.
63. Spear, P. A., Bilodeau, A. Y., & Branchard, A. (1992). Retinoids: from metabolism to environmental monitoring. *Chemosphere*, 25, 1733-1738.
64. Ndayibagira, A., Cloutier, M. J., & Anderson, P. D. et al. (1995). Effects of 3,3',4,4'-tetrachlorobiphenyl on the dynamics of vitamin A in brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and intestinal retinoid concentrations in lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 52, 512-520.
65. Alsop, D., Van der Kraak, G., & Brown, S. B. (2005). The biology and toxicology of retinoids in fish. *Biochemistry and Molecular Biology of Fishes*. 6. *Environmental Toxicology*. Amsterdam : Elsevier, 413-430.
66. Gillespie, R. B., & Guttman, S. I. (1993). Allozyme frequency analysis of aquatic populations as an indicator of contaminant-induced impacts. *Environmental Toxicology and Risk Assessment*. 2. Philadelphia, PA : American Society for Testing and Materials, 34-135.
67. Anderson, S., Sadinski, W., & Shugart, L. (1994). Genetic and molecular ecotoxicology: a research framework. *Environ. Health Perspect.*, 102, suppl. 12, 3-8.
68. Roy, N. K., Stabile, J., & Seeb, J. E. et al. (1999). High frequency of K-ras mutations in pink salmon embryos experimentally exposed to Exxon Valdez oil. *Environ. Toxicol. Chem.*, 18, 1521-1528.
69. Theodorakis, C. W., & Wirgin, I. I. (2002). Genetic responses as population-level biomarkers of stress in aquatic ecosystems. *Biological indicators of aquatic ecosystem stress*. Bethesda, MD : American Fisheries Society, 149-186.
70. Wirgin, I. I., & Theodorakis, C. W. (2002). Molecular biomarkers in aquatic organisms: DNA damage and RNA expression. *Biological indicators of aquatic ecosystem stress*. Bethesda, MD : American Fisheries Society, 43-110.
71. Schalburg, K. R. von, Rise, M. L., & Cooper, G. A. et al. (2005). Fish and chips: various methodologies demonstrate utility of a 16,006-gene salmonid microarray. *BMC Genomics*, 6, 126.
72. Hook, S. E., Skillman, A. D., & Small, J. A. et al. (2006). Gene expression patterns in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, exposed to a suite of model toxicants. *Aquat. Toxicol.*, 77, 372-385.



73. Liu, Q., Basu, N., & Goetz, G. et al. (2013). Differential gene expression associated with dietary methylmercury (MeHg) exposure in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and zebrafish (*Danio rerio*). *Ecotoxicology*, 22(4), 740-751.
74. Korcock, D. E., Houston, A. H., & Gray, J. D. (1988). Effects of sampling conditions on selected blood variables of rainbow trout, *Salmo gairdneri*, Richardson. *J. Fish Biol.*, 33, 319-330.
75. Iwama, G. K., McGeer, J. C., & Pawluk, M. P. (1989). The effects of five fish anaesthetics on acid-base balance, haematocrit, blood gases, cortisol, and adrenaline in rainbow trout. *Can. J. Zool.*, 76, 2065-2073.
76. Waring, C. P., Stagg, R. M., & Poxton, M. G. (1992). The effects of handling on flounder (*Platichthys flesus* L.) and Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *J. Fish Biol.*, 41, 131-144.
77. Houston, A. H. (1997). Review: are the classical hematological variables acceptable indicators of fish health. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 126, 879-894.
78. Sepúlveda, M. S., Gallagher, E. P., & Gross, T. S. (2004). Physiological changes in largemouth bass exposed to paper mill effluents under laboratory and field conditions. *Ecotoxicology*, 13, 291-301.
79. Salman N. A., Ullman J. L., Snekvik K. et al. (2012). Histopathological markers for copper toxicity in rainbow trout fry (*Oncorhynchus mykiss*). *Basrah J. Agric. Sci.*, 25, 2, 26-39.
80. Jobling, S., Sheahan, D., & Osborne, J. A. et al. (1996). Inhibition of testicular growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to estrogenic alkylphenolic chemicals. *Environ. Toxicol. Chem.*, 15, 194-202.
81. Rudneva, I. I., Vakhtina, T. B., & Zalevskaya, I. N. (2007). Izmenenie sostava syvorotochnykh preal'buminov ryb kak otvetnaya reaktsiya na khronicheskoe zagryaznenie morskoy sredy. *Problemy immunologii, patologii i okhrany zdorov'ya ryb i drugikh gidrobiontov-2 : Mezhdunarodnaya konferentsiya: materialy*. Borok ; Moskva, 230-233.
82. Ali, Louei Monfared, & Salati, Amir Parviz (2012). Histomorphometric and biochemical studies on the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after exposure to sublethal concentrations of phenol. *Toxicology and Industrial Health.*, 29, 9, 856-861.
83. Haux, C., Larsson, Å., & Lithner, G. et al. (1986). A field study of physiological effects on fish in lead-contaminated lakes. *Environ. Toxicol. Chem.*, 5, 283-288.
84. Jobling, S., Sheahan, D., & Osborne, J. A. et al. (1996). Inhibition of testicular growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to estrogenic alkylphenolic chemicals. *Environ. Toxicol. Chem.*, 15, 194-202.
85. Pottinger, T. G. Carrick, T. R., & Yeomans, W. E. (2002). The three-spined stickleback as an environmental sentinel: effects of stressors on whole-body physiological indices. *J. Fish Biol.*, 61, 207-229.
86. Palm, R. C., Powell, D. B., & Skillman, A. (2003). Immunocompetence of juvenile Chinook salmon against *Listonella anguillarum* following dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Toxicol. Chem.*, 22, 2986-2994.
87. Handy, R. D., McGeer, J. C., & Allen, H. E. et al. (2005). Toxic effects of dietborne metals: laboratory studies. *Toxic effects of dietborne metal exposure: laboratory studies*. Pensacola, FL : SETAC Press, 59-112.
88. Dethloff, G. M., Bailey, H. C., & Maier, K. J. (2001). Effects of dissolved copper on select hematological, biochemical, and immunological parameters of wild



- rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 40, 371-380.
89. Ptashynski, M. D., Pedlar, R. M., & Evans, R. E. et al. (2002). Toxicology of dietary nickel in lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*). *Aquat. Toxicol.*, 58, 229-247.
90. Berntssen, M. H. G., Hylland, K., & Julshamn, K. (2004). Maximum limits of organic and inorganic mercury in fish feed. *Aquacult. Nutr.*, 10, 83-97.
91. Adiele, R. C., Stevens, D., & Kamunde, C. (2010). Reciprocal enhancement of uptake and toxicity of cadmium and calcium in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) liver mitochondria. *Aquatic Toxicology*, 96, 4, 319-327.
92. Desforges, P. R., Gilmour, K. M., & Perry, S. F. (2001). The effects of exogenous extracellular carbonic anhydrase on CO₂ excretion in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): role of plasma buffering capacity. *J. Comp. Physiol.*, 171B, 465-473.
93. Handy, R. D., Jha, A. N., & Depledge, M. H. (2002). Biomarker approaches for ecotoxicological biomonitoring at different levels of biological organisation. *Handbook of Environmental Monitoring*, 9.1-9.32.
94. Hinton, D. E., & Laurén, D. J. (1990). Integrative histological approaches to detecting effects of environmental stressors on fishes. *Biological Indicators of Stress in Fish. VIII*. Bethesda, MD : American Fisheries Society, 51-66.
95. Hinton, D. E., Baumann, P. C., & Gardner, G. R. et al. (1992). Histopathologic biomarkers. *Biomarkers: biochemical, physiological, and histological markers of anthropogenic stress*. Boca Raton, FL : Lewis Publishers, 155-209.
96. Liebel, S., Tomotake, M. E. M., & Oliveira Ribeiro, C. A. (2013). Fish histopathology as biomarker to evaluate water quality. *Ecotoxicol. Environ. Contam.*, 8, 2, 9-15.
97. Reddy, P. B., & Rawat, S. S. (2013). Assessment of aquatic pollution using histopathology in fish as a protocol. *International Research Journal of Environment Sciences*, 2, 8, 79-82.
98. Ternovenko, V. A., & Nikiforov, E. L. (1987). Povedencheskie reaktsii ryb i ikh ispol'zovanie dlya obnaruzheniya zagryazniteley v vodnoy srede. *Metody ikhtiotoksikologicheskikh issledovaniy : Pervyy Vsesoyuznyy simpozium po metodam ikhtiotoksikologicheskikh issledovaniy: tezisy dokladov*. Leningrad, 125-126.
99. Cherkashin, S. A. (1987). Metod otsenki toksichnosti veshchestv, osnovanny na izbeganii gidrobiontami neblagopriyatnykh faktorov. *Metody ikhtiotoksikologicheskikh issledovaniy : Pervyy Vsesoyuznyy simpozium po metodam ikhtiotoksikologicheskikh issledovaniy: tezisy dokladov*. Leningrad, 133-135.
100. Little, E. E., & Finger S. E. (1990). Swimming behaviour as an indicator of sublethal toxicity in fish. *Environ. Toxicol. Chem.*, 9, 13-20.
101. Handy, R. D., & Depledge, M. H. (1999). Physiological responses: their measurement and use as environmental biomarkers in ecotoxicology. *Ecotoxicology*, 8, 329-349.
102. Handy, R. D., Sims, D. W., & Giles, A. (1999). Metabolic trade-off between locomotion and detoxification for maintenance of blood chemistry and growth parameters by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during chronic dietary exposure to copper. *Aquat. Toxicol.*, 47, 1, 23-41.
103. Campbell, H. A., Handy, R. D., & Sims, D. W. (2002). Increased metabolic cost of swimming and consequent alterations to circadian activity in rainbow trout



- (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to dietary copper. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 59, 768-777.
104. Campbell, H. A., Handy, R. D., & Sims, D. W. (2005). Shifts in a fish's resource holding power during a contact paired interaction: the influence of a copper contaminated diet in rainbow trout. *Physiol. Biochem. Zool.*, 78, 706-714.
105. Scott, G. R., & Sloman, K. A. (2004). The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity. *Aquatic Toxicology*, 68, 369-392.
106. Shakirova, F. M. (2007). Bioindikatsiya zagryazneniya Kuybyshevskogo vodokhranilishcha po morfologicheskim anomalijam ryb. *Ratsional'noe ispol'zovanie presnovodnykh ekosistem — perspektivnoe napravlenie realizatsii natsional'nogo proekta «Razvitie APK» : Mezhdunarodnaya nauchno-prakt. konf. : materialy*. Moskva, 370-372.
107. Shvyreva, N. S. (2007). Ikhtiotensozy kak effektivnyy indikator ekologicheskogo sostoyaniya vodoemov. *Ratsional'noe ispol'zovanie presnovodnykh ekosistem — perspektivnoe napravlenie realizatsii natsional'nogo proekta «Razvitie APK» : Mezhdunarodnaya nauchno-prakt. konf.: materialy*. Moskva, 432-433.
108. Kolkwitz, R., & Marsson, M. (1902). *Grundsätze für die biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora und Fauna. Aus. 1*. BerlinDahlem : Mitteilungen der königlichen Prüfanstalt Wasserversorgung Abwasserbeseitigung, 33-72.
109. Oleksiv, I. T. (1994). *Pokazateli kachestva prirodnikh vod s ekologicheskikh pozitsiy*. L'vov : Svit.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОСОСЕВЫХ РЫБ (*SALMONIDAE*) В БИОМОНИТОРИНГЕ КАЧЕСТВА ВОДНОЙ СРЕДЫ (ОБЗОР)

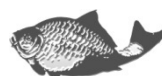
Д. А. Янович, yandeni@yandex.ru, Львовский национальный университет ветеринарной медицины и биотехнологий имени С.З. Гжицкого, г. Львов

И. И. Грициняк, hrytsyniak@if.org.ua, Институт рыбного хозяйства НААН, г. Киев

Т. М. Швець, irguaan@bigmir.net, Институт рыбного хозяйства НААН, г. Киев

Цель. Вследствие загрязнения рыбохозяйственных водоемов промышленными и сельскохозяйственными стоками, а также ксенобиотиками, поступающими из других источников, с учетом прогнозируемого увеличения объемов подобных выбросов в кратко- и долгосрочной перспективе, особую актуальность приобретают вопросы исследования влияния загрязняющих веществ различной природы и происхождения на гидробионтов, в частности рыб, а также прогнозирования возможных неблагоприятных последствий загрязнения водных экосистем. Целью проведенной работы является анализ и обобщение существующих литературных сведений по индикации в системе биомониторинга качества водной среды на основе показателей реакции лососевых рыб как высокочувствительных биологических маркеров объектов ихтиофауны к воздействию внешних факторов.

Результаты. В работе обобщены и систематизированы данные по использованию лососевых рыб в системе биомониторинговых исследований. Выделена и охарактеризована специфичность таких биоиндикационных показателей экологического состояния водной среды как биохимические, генетические, физиологические, морфологические, гистопатологические и популяционные маркеры, а также биоиндикационное значение поведенческих реакций рыб. Отмечены последствия экотоксикации гидроэкосистем в разрезе различных уровней биологической организации (клетка, особь, популяция, сообщество рыб). Описана возможность проведения биологического мониторинга, основываясь на индексах сапробности, выявленных для видов-индикаторов из семейства лососевых рыб.



Научная новизна. В статье приведена структура, определены преимущества и недостатки использования отдельных биомаркеров организма и популяций лососевых рыб для оценки экологического состояния водной среды.

Практическая значимость. Приведенные в статье данные могут быть использованы для совершенствования системы экологического мониторинга водной среды путем расширения индикаторных показателей биомаркерами организма и популяций высокочувствительных видов лососевых рыб.

Ключевые слова: биомониторинг, лососевые рыбы, водные экосистемы, биохимические маркеры, генетические биомаркеры, физиологические биомаркеры, морфологические биомаркеры, гистопатологические биомаркеры, популяционные биомаркеры.

APPLICATION OF SALMONIDS (*SALMONIDAE*) IN THE BIOMONITORING OF AQUATIC ENVIRONMENT (A REVIEW)

D. Yanovych, yandeni@yandex.ru, Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S.Z. Gzhytskyj, Lviv

I. Hrytsyniak, hrytsyniak@if.org.ua, Institute of Fisheries NAAS, Kyiv

T. Shvets, irguaan@bigmir.net, Institute of Fisheries NAAS, Kyiv

Purpose. Due to the pollution of fisheries water bodies by industrial and agricultural waste waters, as well as by xenobiotics coming from other sources, taking into account a predictable increase in the amounts of such effluents in the short and long terms, the problems related to the study of the effects of the pollutants of different nature and origin on aquatic organisms, especially fish, as well as a prediction of possible adverse consequences on aquatic ecosystems, becomes particularly important. The aim of our work was an analysis and synthesis of existing literature data concerning the indication in the biomonitoring of aquatic environments based on biological markers of salmonids as highly sensitive objects of fish fauna to external factors.

Findings. The review summarizes and systematizes the data concerning the use of salmonids in biomonitoring studies. Furthermore, we highlighted and characterized the specificity of bioindication parameters of the aquatic environment state, such as the biochemical, genetic, physiological, morphological, histopathological, behavioral and population markers and noted the effects of hydroecosystem ecotoxication on different levels of biological organization (cell, individual, population, fish community). We also described the possibility of biological monitoring based on saprobic indexes identified for indicator species belonging to salmonids.

Originality. In the article describes the structure, pros and cons of the use of specific biomarkers of individual salmonid fish and their populations for assessing the ecological status of aquatic environments.

Practical value. The data given in the article can be used to improve the system of the ecological monitoring of aquatic environments by extending the range of indicator indices with organism and population biomarkers of highly sensitive salmonid species.

Keywords: biomonitoring, salmonids, aquatic ecosystems, biochemical markers, genetic biomarkers, physiological biomarkers, morphological biomarkers, histopathological biomarkers, population biomarkers.

