

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ ТВАРИН

УДК 597.551.2:577.1/5:539.1

О.С. ПОТРОХОВ, д. б. н., ст. наук. співроб., завідувач відділу,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: apotrokhov@gmail.com
ORCID 0000-0002-8274-6898

Д.І. ГУДКОВ, д. б. н., проф., чл.-кор. НАН України, завідувач відділу,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: digudkov@gmail.com
ORCID 0000-0002-5304-7414

Ю.М. ХУДІЯШ, к. б. н., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: yurahud@ukr.net,
ORCID 0000-0002-8588-0371

В.В. БЕЛЯЄВ, к. б. н., ст. наук. співроб., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: belyaev-vv@ukr.net
ORCID 0000-0003-4465-7816

Л.В. ФЕДОРЕНКО, к. б. н., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: fedorenko.l@nas.gov.ua,
ORCID 0000-0002-7241-0282

ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ РИБ У ВОДОЙМАХ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ¹

*Досліджено окремі фізіологічні та біохімічні показники краснопірки (*Scardinius erythrophthalmus* Rudd.) та окуня (*Perca fluviatilis* L.) з водойм Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) у діапазоні потужності поглиненої дози радіаційного опромінення 5,1—18,7 мкГр/год. Встановлено, що риби ЧЗВ характеризувалися вищою вгодованістю та підвищеним індексом печінки порівняно з контролем (0,06 мкГр/год), що свідчить про активацію компенсаторних механізмів, спрямованих на зменшення не-*

¹Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2023.03/0156), Національної академії наук України, а також у співробітництві з Державним спеціалізованим підприємством «Екоцентр» ДАЗВ України.

Ц и т у в а н н я: Потрохов О.С., Гудков Д.І., Худіяш Ю.М., Беляєв В.В., Федоренко Л.В. Фізіолого-біохімічні показники риб у водоймах Чорнобильської зони відчуження. *Гідробіол. журн.* 2026. Т. 62, № 2. С. 91—104.

гативного впливу середовища. Підтвердженням цього є знижений вміст РНК і зменшене співвідношення РНК/ДНК у зябрах риб ЧЗВ, що відображає пригнічення біосинтетичних процесів у тканинах, насамперед синтезу білків. У печінці риб із водойм ЧЗВ виявлено підвищений вміст дієнових кон'югатів і малонового діальдегіду — продуктів перекисного окиснення ліпідів, зокрема поліненасичених жирних кислот, які є маркерами ушкодження клітинних мембран внаслідок дії вільних радикалів і свідчать про розвиток окислювального стресу, що може призводити до патологічних процесів в організмі.

Ключові слова: іонізуюче випромінювання, риби, потужність поглиненої дози, антиоксидантна активність, перекисне окиснення ліпідів, ДНК, РНК, малоновий діальдегід, дієнові кон'югати.

Серед численних антропогенних чинників, що мають значний негативний вплив на представників водних екосистем, зокрема на популяції риб, виділяють радіонуклідне забруднення і пов'язане з ним радіаційне опромінення живих організмів. Проблема впливу іонізуючого випромінювання на біоту набуває особливої гостроти у випадках виникнення позаштатних ситуацій на підприємствах ядерного паливного циклу, серед яких аварія на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) стала наймасштабнішою в історії атомної індустрії [4, 13, 17, 29]. Внаслідок атмосферного і водного переносу радіоактивних речовин величезні за площею водозбори і акваторії, зокрема Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ), зазнали інтенсивного радіонуклідного забруднення [4, 5, 10].

Тривалоіснуючі штучні радіонукліди, зокрема ^{90}Sr і ^{137}Cs , завдяки яким формується доза опромінення біоти у ЧЗВ на сучасному етапі, будучи хімічними аналогами важливих біогенних елементів, при надходженні до водойм здатні накопичуватись у тканинах риб до радіаційно-небезпечних рівнів [11, 18, 23, 24, 33, 34]. Різні види риб в межах однієї водойми отримують, як правило, різну загальну потужність поглиненої дози (ППД) іонізуючого випромінювання, яка складається із зовнішньої та внутрішньої дози. Величина зовнішнього опромінення риб залежить від рівнів радіонуклідного забруднення екологічних зон водойми, в яких перебуває той чи інший вид (від води, донних відкладів, рослин тощо) [22, 31], а доза внутрішнього — переважно від ефективності засвоювання радіонуклідів з води та об'єктів живлення [14, 25, 30, 46].

Проблема вивчення механізмів адаптації живих організмів до хронічної дії малих доз іонізуючого випромінювання не втрачає своєї актуальності. Загальновідомо, що серед різних груп гідробіонтів саме представники іхтіофауни є найбільш чутливими до впливу радіаційного чинника, за дії якого організм риб зазнає певних змін, як на фізіологічному, так і на біохімічному рівні [14, 15, 26, 39, 41, 42]. Так внаслідок опромінення відбувається накопичення в клітинах і тканинах продуктів радіолізу води, речовин хіноїдної природи і кінцевих продуктів окиснення ліпідів (альдегіди, кетони та ін.). Наявність цих сполук, яким притаманна висока біологічна активність, може призводити до значного впливу на метаболізм в цілому [35]. Прикладом цього є порушення структурності нуклеїнових кислот та ферментативної активності, що є наслідком безпосе-

реднього впливу радіотоксикантів і метаболітів, що утворюються внаслідок радіаційного опромінення.

Одним з критеріїв оцінки наслідків опромінення може бути вміст проміжних продуктів перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) — гідроперекисів ліпідів, дієнових кон'югатів або кінцевого продукту — малонового діальдегіду, оскільки зміни їхньої концентрації є тест-показником для оцінки радіаційного навантаження на риб. В нормі у тварин існує рівновага прооксидантних і антиоксидантних процесів. Внаслідок цього перекисне окиснення протікає на визначеному стаціонарному рівні [36]. Утворення надлишкової кількості перекисних продуктів, що має місце при розвитку патології, призводить до порушення структурної та функціональної організації клітинних мембран, зміни їхньої проникності та іонного балансу в клітинах, роз'єднання окисного фосфорилування, окиснення тільних груп білків і дезактивації ферментів. Активація ПОЛ може розглядатися як компонент неспецифічної реакції організму на екстремальні впливи, тобто як одна з ланок стрес-реакції [45]. Активність протікання ПОЛ і антиоксидантна активність (АОА), а також співвідношення цих різноспрямованих процесів можуть бути інтегральними показниками стану організму.

Також одним із способів визначення адаптаційних можливостей риб до тривалого радіонуклідного забруднення є аналіз вмісту нуклеїнових кислот, як показника інтенсивності проходження метаболічних процесів. Оскільки відомо, що кількість ДНК на клітину в тканинах риб стабільна, то зміна її вмісту відображає темпи росту риб, а кількість РНК характеризує активність біосинтетичних процесів, тобто активність їхнього метаболізму [3, 8, 9].

Метою роботи були попередні фізіолого-біохімічні дослідження деяких, найбільш типових для водойм Полісся, представників іхтіофауни для з'ясування адаптаційних процесів, які відбуваються в організмі риб в умовах тривалого радіаційного навантаження порівняно невисокими дозами іонізуючого випромінювання у водоймах ЧЗВ.

Матеріал і методика досліджень

Дослідження фізіолого-біохімічного стану риб проводили на тканинах зябер і печінки. Іхтіологічний матеріал відбирали у серпні 2024 р. з різних водних об'єктів ЧЗВ — Янівського затону (відокремленого після аварії на ЧАЕС від р. Прип'яті наливною дамбою), а також із залишкових озер колишньої акваторії водойми-охолоджувача (ВО) ЧАЕС, які утворилися після зниження рівня води — північно-західної та північно-східної частин (ПЗЧ та ПСЧ). Контрольною водоймою було обрано Середнє Білоцерківське водосховище (р. Рось), яке характеризується задовільним гідрохімічним режимом.

Біологічними об'єктами досліджень були риби, які відрізнялись екологічною нішею та спектром живлення. Серед «мирних» видів досліджували краснопірку звичайну (*Scardinius erythrophthalmus* Rudd.), яка тримається переважно у середніх шарах водної товщі та є всеїдною — живи-

ться водними рослинами, зокрема нитчастими водоростями, ікромю молюсків та інших видів риб, різноманітними безхребетними. Інший досліджуваний вид — окунь звичайний (*Perca fluviatilis* L.), який є хижаком та тримається переважно у середніх і придонних шарах водної товщі.

Використані в роботі величини ППД іонізуючого випромінювання для досліджуваних видів риб були розраховані із залученням програмного забезпечення ERICA Assessment Tool 1.0 і 2.0 [21] і наведені у мкГр/год, згідно публікацій [30, 31, 32]. Діапазони усереднених величин ППД у різних водоймах ЧЗВ становили для краснопірки 5,1—16,5, для окуня — 7,8—18,7 мкГр/год. Для риб контрольної водойми ППД зареєстровано на рівні 0,06 мкГр/год.

Морфологічні показники риб, зокрема індекси різних органів, досліджували загальноприйнятими методами [16], визначаючи відношення маси органів до маси тіла риби. Вгодованість за Фультоном розраховували згідно [7].

Вміст РНК і ДНК та їх співвідношення аналізували у зябрових пелюстках, як найбільш функціональній тканині риб, безпосередньо контактуючій з оточуючим середовищем. Вміст ДНК встановлювали за допомогою дифеніламіну, а саме — кольорової реакції на вуглеводний компонент нуклеотиду [19]. Кількість РНК визначали орсиновим методом [40].

Рівень перекисного окиснення ліпідів визначали за стандартною методикою, заснованою на реагуванні малонового діальдегіду (МДА) з тіобарбітуровою кислотою з утворенням кольорового триметинового комплексу [12]. АОА встановлювали за методом деструкції дезоксирибози [20]. Вміст дієнових кон'югатів визначали згідно [12].

Статистичну обробку даних здійснювали з використанням програм Statistica 10 та Excel пакету Microsoft Office. Достовірність між досліджуваними групами оцінювали за допомогою *t*-критерію Стьюдента за рівня ймовірності $p < 0,05$.

Результати досліджень та їх обговорення

Отримані результати досліджень свідчать про певні відмінності між фізіологічними показниками риб з радіаційно-забруднених і контрольних водойм. Так, індекс печінки у краснопірки з водойм ЧЗВ був вищим на 15,5—71,1 %, ніж у риб у контролі. При цьому вгодованість краснопірки у досліджених водоймах майже не відрізнялась (табл. 1).

У окуня, на відміну від краснопірки, фізіологічні показники були вищими від контролю в обох випадках. Так, індекс печінки і вгодованість риб з водойм із підвищеними рівнями ППД були вищими відповідно на 22,9—217,6 % та 15,4—54,3 % порівняно до контролю.

Підвищений індекс печінки у риб з водойм ЧЗВ, вочевидь, пов'язаний з посиленням компенсаторних процесів задля зниження негативно-го впливу середовища. Проте не слід відкидати припущення, що збільшення цих фізіологічних показників у риб з водойм, забруднених радіонуклідами, може свідчити про зниження активності перебігу мета-

Таблиця 1

Фізіологічні показники риб з водойм ЧЗВ ($M \pm m$, $n = 5-6$)

Показники	ПСЧ ВО		ПЗЧ ВО		Янівський затон		Контроль	
	<i>M</i>	<i>m</i>	<i>M</i>	<i>m</i>	<i>M</i>	<i>m</i>	<i>M</i>	<i>m</i>
Краснопірка								
Індекс печінки, %	0,52	0,08	0,55	0,07	0,77*	0,07	0,45	0,04
Вгодваність, %	2,21	0,18	2,25	0,04	2,47	0,29	2,33	0,21
Окунь								
Індекс печінки, %	1,27*	0,27	0,91	0,19	2,35*	0,20	0,74	0,10
Вгодваність, %	2,17*	0,12	1,87	0,14	2,50*	0,72	1,62	0,11

Примітка. * $p < 0,05$.

болічних процесів, як один із засобів адаптації до тривалого негативного впливу.

Для підтвердження цих припущень були проведені дослідження низки біохімічних показників. Зокрема, одним із способів визначення адаптаційних можливостей риб до несприятливих екологічних чинників та активності перебігу процесів метаболізму є встановлення вмісту нуклеїнових кислот у тканинах риб.

Результати досліджень показали, що вміст ДНК в зябрових тканинах риб з водойм, забруднених радіонуклідами, істотно відрізнявся від показників контрольних особин. Так, у краснопірки і окуня з водойм ЧЗВ кількість ДНК у тканинах була в середньому вищою, відповідно на 69,8 і 47,5 %, порівняно до контролю (рис. 1).

Інтенсивність поділу клітин у тканинах риб, що зазнали підвищених рівнів опромінення, зростає порівняно з контрольною групою.

Кількість ДНК на клітину є стабільною величиною, тому зростання її вмісту у зябрах риб свідчить про те, що клітини зябрового апарату є меншими за розміром порівняно до контролю. Таким чином, зміна вмісту ДНК у тканинах відображає темпи росту риб. Однак збільшений вміст ДНК в тканинах риб із забруднених радіонуклідами водойм пов'язаний з дещо іншими причинами. Показники вмісту РНК в тканинах зябер краснопірки і окуня з водойм ЧЗВ, на відміну від ДНК, були, навпаки, відповідно на 23,1 і 47,2 %, меншими ніж у контролі (рис. 2).

Відомо, що всі білки в організмі тварин перебувають у стані постійного оновлення, синтезуючись з амінокислот, які надходять з їжею. Цей процес забезпечує підтримку життєдіяльності, зростання та відновлення клітин, що робить білки динамічною системою, а не статичними структурами. При цьому, розмір амінокислотного пулу залежить від балансу між синтезом і деградацією білків. Одним з показників інтенсивності білкового обміну є кількість РНК у тканинах, що характеризує активність процесів біосинтезу у риб, а саме активність їхнього анаболізму. Відповідно,

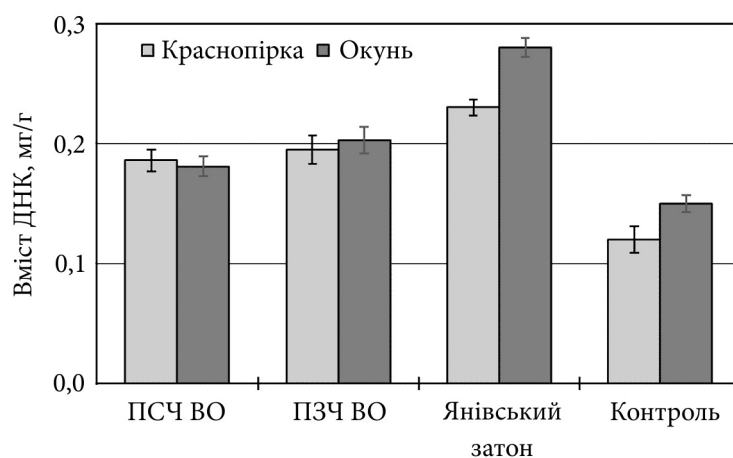


Рис. 1. Вміст ДНК у зябрах риб з водойм ЧЗВ. Тут і на рис. 2—6: $M \pm m$, $n = 5-6$

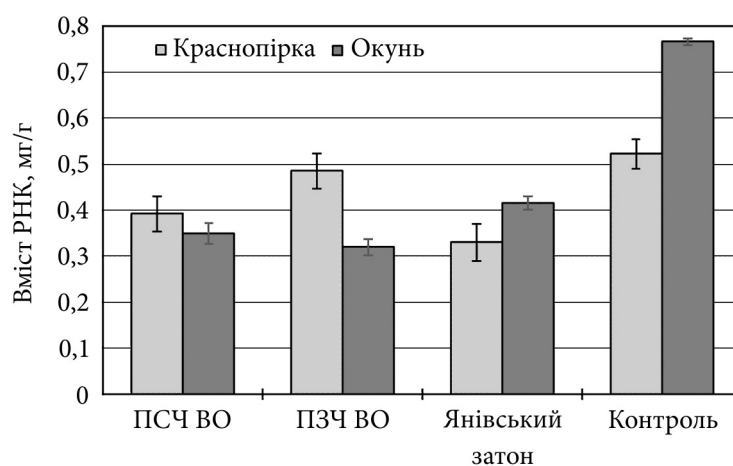


Рис. 2. Вміст РНК у зябрах риб з водойм ЧЗВ

зростання активності цих процесів впливає на загальні розміри клітин внаслідок накопичення сполук білкової природи та продуктів їх метаболізму. Під час цих процесів може зростати частка води в клітині, як один із засобів стабілізації внутрішнього стану клітини [28], що також буде впливати на їх розмір. Отже, у тканинах риб з дослідних груп спостерігається зниження рівня метаболізму порівняно з контрольною групою.

Підтвердженням такого припущення є розраховані співвідношення РНК/ДНК в зябрових пелюстках окуня і краснопірки. Цей коефіцієнт відображає дію неспецифічного стресу на організм і пов'язаний зі змінами екологічних чинників навколишнього середовища. Загалом співвідношення РНК/ДНК надає можливість встановити потенціал біосинте-

тичних процесів у клітині, оскільки вміст ДНК на клітину залишається відносно постійним, а кількість РНК залежить від рівня метаболізму в організмі. Отже, цей коефіцієнт відображає рівень білкового обміну, а саме потенціал синтезу білка у клітині.

За результатами наших досліджень було встановлено, що співвідношення РНК/ДНК в тканинах риб контрольної водойми було вищим в середньому на 53,8 і 67,2 %, ніж у риб, які зазнають підвищених рівнів ППД (рис. 3). Це є підтвердженням того, що біосинтетичні процеси в організмі краснопірки і окуня з контрольних водойм проходять значно інтенсивніше, ніж у риб із водойм, які зазнали радіонуклідного забруднення.

З огляду на отримані результати досліджень постає питання: чому тривалий вплив підвищених рівнів опромінення у риб призводить до зниження інтенсивності метаболічних процесів? Загальновідомо, що зміна параметрів зовнішнього середовища чи безпосередня дія токсикантів викликають зростання активності метаболізму в цілому та є одним із головних засобів протидії негативним чинникам [38, 43]. Також відомо, що іонізуюче випромінювання викликає зростання кількості активних форм кисню та призводить до підвищення вмісту продуктів перекисного окиснення ліпідів. Одними з таких продуктів є дієнові кон'югати і малоновий діальдегід. Ці сполуки утворюються в результаті окисного стресу, зокрема перекисного окиснення ліпідів, і є важливим біохімічним маркером пошкодження клітинних мембран та накопичення вільних радикалів в організмі [27, 37]. У разі надмірного накопичення продуктів перекисного окиснення ліпідів в організмі розвивається синдром ліпідної пероксидації, який включає такі патологічні компоненти як пошкодження мембранних ліпідів, ліпопротеїдів, а також у відповідь на ці прояви зміни активності ферментів антиоксидантної системи [1].

За результатами досліджень було встановлено, що вміст дієнових кон'югатів у печінці риб із забруднених радіонуклідами водойм збільшу-

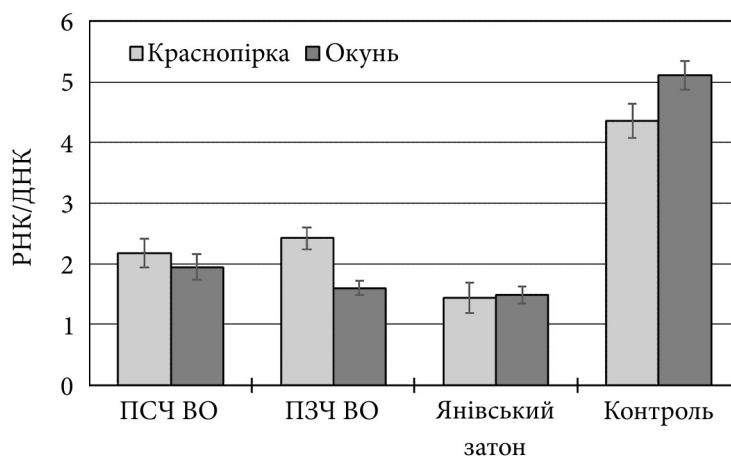


Рис. 3. Співвідношення РНК/ДНК у зябрах риб з водойм ЧЗВ

вався в середньому в 1,9 раза як у краснопірки, так і в окуня порівняно до контролю (рис. 4).

Така сама закономірність спостерігається щодо зміни вмісту МДА в тканинах печінки риб з водою ЧЗВ порівняно до контролю. Так, у дослідних риб вміст цього продукту ПОЛ значно перевищував контрольні величини, особливо для окуня (рис. 5).

Ймовірно, високі рівні дієнових кон'югатів і МДА впливають на активність ферментів, що відповідають за біосинтез, а це призводить до зниження інтенсивності синтезу білкових речовин в організмі риб.

Зазвичай такі процеси мали б призвести до істотних порушень перебігу метаболізму в цілому, а в подальшому — до можливої загибелі організму. Проте слід зауважити, що зміни інтенсивності проходження метаболічних процесів можуть бути однією з ключових ланок адаптації риб до тривалого підвищеного рівня радіаційного опромінення.

Відомо, що будь-яке порушення балансу внутрішнього середовища організму, тобто його гомеостазу, має ознаки розвитку стресу [44]. Тривала дія стресу може мати негативні наслідки, якщо не задіюється низка неспецифічних фізіологічних і біохімічних реакцій для відновлення гомеостазу, які запобігають загальному виснаженню організму і його загибелі.

Отже, щоб запобігти виснаженню організму риб, діють дві конкуруючі системи. Одна з них мобілізує енергетичні ресурси для підтримання життєдіяльності, а інша обмежує відповідь організму, щоб не допустити надмірної витрати цих ресурсів.

В основному зміна швидкості біохімічних процесів в організмі регулюється активністю ферментів, а саме їхньою каталітичною активністю, що, як правило, залежить від кількості накопичення проміжних продуктів метаболізму без подальшого їхнього перетворення чи використання. Ці сполуки внаслідок своєї біологічної активності виступають в ролі інгібіторів ферментативних реакцій.

Можна припустити, що зростання вмісту дієнових кон'югатів та МДА у тканинах риб з водою ЧЗВ, з одного боку, не є критичним для нормального проходження процесів метаболізму, оскільки риби протягом тривалого часу продовжують існувати в умовах підвищеного радіаційного навантаження. З іншого боку, зростання присутності цих метаболітів у тканинах можливо супроводжується зниженням каталітичної активності ферментів, які запобігають ймовірності розвитку енергетичного колапсу загального метаболізму.

Доказом таких припущень є зміна антиоксидантної активності в тканинах печінки риб. Причому необхідно мати на увазі, що антиоксидантна активність у тканинах знаходиться у зворотній залежності з вмістом МДА у субстратному середовищі, де відбуваються ферментативні реакції. Так, у тканинах печінки краснопірки та окуня з досліджених водою ЧЗВ активність антиоксидантної системи в середньому збільшувалась відповідно на 31 та 7 % порівняно до контролю (рис. 6). Цей механізм дозволяє нейтралізувати вільні радикали, які ініціюють процес ПОЛ, тим са-

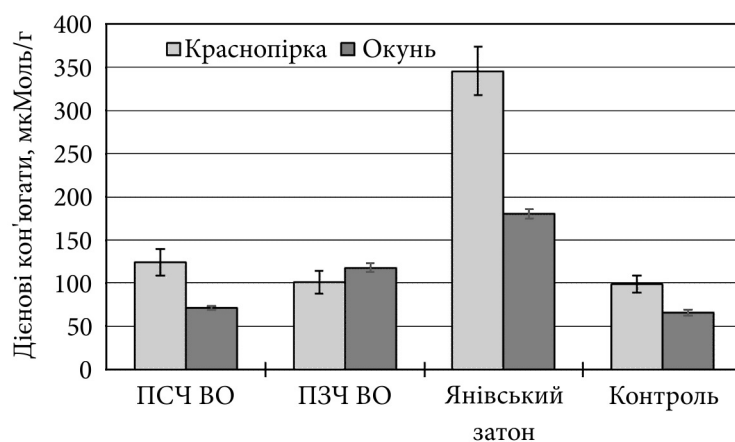


Рис. 4. Вміст дієнових кон'югатів у печінці риб з водойм ЧЗВ

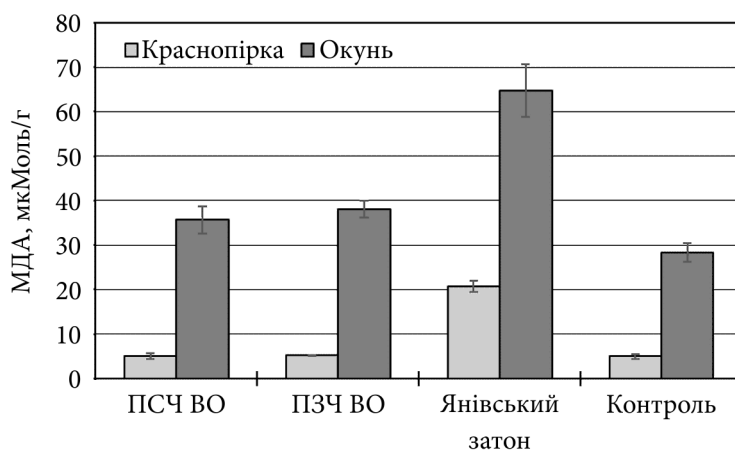


Рис. 5. Вміст МДА в печінці риб з водойм ЧЗВ

мим запобігаючи утворенню надлишкового МДА та захищаючи клітини від пошкодження.

Відомо, що антиоксидантна система захисту організму контролює і гальмує всі етапи вільнорадикальних реакцій, починаючи від їх ініціації і закінчуючи утворенням гідроперекисів та МДА. Вона протидіє шкідливому ефекту вільних радикалів, які безперервно утворюються в організмі, і представлена неферментними і ферментними компонентами [6]. Разом з тим, наявна антиоксидантна активність була недостатньою для зниження вмісту продуктів ПОЛ в тканинах риб, хоча надмірне утворення продуктів пероксидації ліпідів не призвело до значного погіршення фізіологічного стану риб [2].

Отже, за негативної дії іонізуючого випромінювання активність антиоксидантної системи залежить від загального накопичення пулу про-

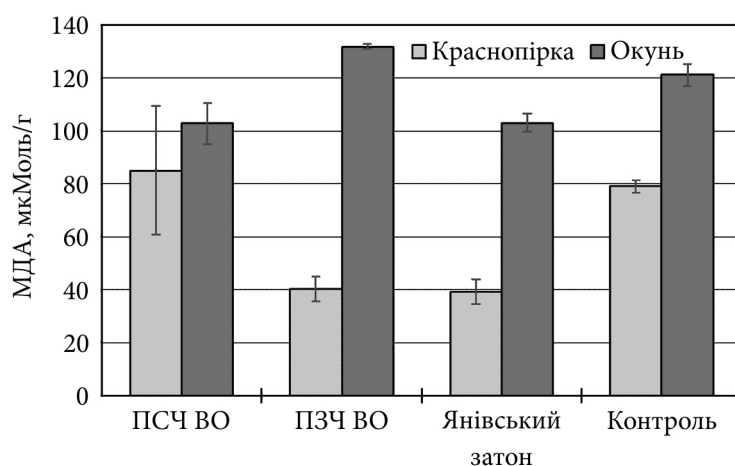


Рис. 6. Антиоксидантна активність в печінці риб з водою ЧЗВ

дуктів метаболізму ПОЛ. Значне його зростання в тканинах призводить до зниження каталітичної реакції ферментів антиоксидантної системи, а також до пригнічення інших процесів біосинтезу.

Висновки

У віддалений після аварії на Чорнобильській АЕС період та вперше для водних екосистем ЧЗВ проведено попередні дослідження окремих фізіолого-біохімічних показників риб, що перебувають у діапазоні поточної потужності поглиненої дози іонізуючого випромінювання 5,1—18,7 мкГр/год.

Встановлено, що риби ЧЗВ характеризувалися вищою вгдованістю та збільшеним індексом печінки порівняно з контролем (0,06 мкГр/год), що може свідчити про зниження метаболічної активності, зокрема зменшення використання енергетичних субстратів, а також про активацію компенсаторних механізмів, спрямованих на зниження негативного впливу середовища на організм.

Підтвердженням такого припущення слугує знижений вміст РНК і зменшення співвідношення РНК/ДНК у зябрових тканинах риб із водою ЧЗВ порівняно з контролем, що відображає пригнічення біосинтетичних процесів у тканинах, насамперед синтезу білків.

Причиною таких порушень є зростання в тканинах риб загального пулу дієнових кон'югатів і малонового діальдегіду — сполук, що утворюються під час ПОЛ, зокрема поліненасичених жирних кислот, і є індикаторами пошкодження клітинних мембран внаслідок дії вільних радикалів, а також однією з ознак окисного стресу, який може призводити до патологічних процесів в організмі.

Зареєстровані наслідки тривалого впливу іонізуючого випромінювання у дослідженому діапазоні ППД для представників іхтіофауни не є критичними щодо підтримання загального метаболізму, оскільки попу-

ляції риб (зокрема, краснопірки та окуня) впродовж тривалого часу зберігають життєздатність і спроможність до відтворення. Виявлені зміни у фізіолого-біохімічному стані можна розглядати як прояви адаптаційних механізмів до негативних умов середовища. Зниження каталітичної активності ферментів і, відповідно, загальної інтенсивності метаболізму сприяє зменшенню енергетичних витрат, що запобігає виснаженню та загибелі організму.

Список використаної літератури

1. Барабой В.А., Сутковой Д.А. Окислительно-антиоксидантный гомеостаз в норме и при патологии. Киев: Чернобыльинтеринформ. 1997. Ч. I. 202 с.
2. Гринюк І.І., Прилуцька С.В., Гребіник С.М. та ін. Показники активності антиоксидантної системи у нормальних і трансформованих клітинах. *Досягнення біології та медицини*. 2011. № 2(18). С. 31—35
3. Зиньковский О.Г., Потрохов А.С. Нуклеазная активность некоторых тканей рыб в зависимости от токсикологической ситуации окружающей среды. *Вестник экологии*. 1996. № 1—2. С. 176—181.
4. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Авдюшин С.И. и др. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской АЭС. *Метеорология и гидрология*. 1987. № 2. С. 5—18.
5. Кузьменко М.І., Романенко В.Д., Деревець В.В. та ін. Радіонукліди у водних екосистемах України. Вплив радіонуклідного забруднення на гідробіоти зони відчуження. Київ: Чернобыльинтеринформ, 2001. 318 с.
6. Любович О.Є., Кліщ І.М. Особливості змін антиоксидантної системи в динаміці іммобілізаційного стресу на тлі гіпотиреозу. *Вісн. наук. досліджень*. 2018. № 4. С. 175—179.
7. Методика морфо-физиологических и биохимических исследований рыб. Москва: ВНИРО, 1972. 118 с.
8. Потрохов А.С., Волкова Е.Н., Беляев В.В., Зиньковский О.Г. Влияние перорального введения ¹³⁷Cs на ростовые и физиолого-биохимические показатели двухлеток карпа. *Зб. наук. праць Інституту ядерних досліджень*. 2003. Т. 2, № 10. С. 109—116,
9. Потрохов А.С., Зиньковский О.Г. Изменение ряда показателей обмена нуклеиновых кислот в тканях некоторых видов рыб в зависимости от уровня антропогенной нагрузки, среды их обитания (на примере Каховского водохранилища). *Проблемы рационального использования биоресурсов водохранилищ*, Материалы Международ. науч. конф. 6—8 сент. 1995 г., Киев. Киев, 1995. С. 56—59
10. Романенко В.Д., Кузьменко М.И., Евтушенко Н.Ю. и др. Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС. Киев: Наук. думка, 1992. 194 с.
11. Рябов И.Н. Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. Москва: Тов-во науч. изд. КМК, 2004. 416 с.
12. Стальная И.Д. Метод определения диеновой конъюгации ненасыщенных высших жирных кислот. *Современные методы в биохимии*. Москва: Медицина, 1977. С. 66—68.
13. Чернобыльская катастрофа / Под ред. В.Г. Барьяхтара. Киев: Наук. думка, 1995. 560 с.
14. Шеханова И.А. Радиоэкология рыб. Москва: Высш. шк., 1983. 208 с.
15. Шлейфер Г.С., Шеханова И.А. Влияние ионизирующей радиации на иммуно-физиологическое состояние рыб. Проблемы и задачи радиоэкологии животных. Москва: Наука, 1980. С. 35—43.
16. Яржомбек А.А., Ламанский В.В., Щербина Т.В. Справочник по физиологии рыб. Москва: Агропромиздат, 1986. 192 с.

17. 25 years of the Chernobyl disaster. Security of the Future: National Report of Ukraine. Kiev: KIM, 2011. 356 p.
18. Belyaev V.V., Volkova O.M., Gudkov D.I. et al. Radiation dose reconstruction for higher aquatic plants and fish in Glyboke Lake during the early phase of the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioactivity*. 2023. Vol. 263. P. 107—169.
19. Burton K. Determination of DNA concentration with diphenylamine. *Methods in Enzymology*. 1968. Vol. 12, N 2. P. 163—166.
20. Chobot V. Simultaneous Detection of Pro- and Antioxidative Effects in the Variants of the Deoxyribose Degradation Assay. *J Agric Food Chem*. 2010. Vol. 58, N 4. P. 2088—2094.
21. ERICA Assessment Tool. The integrated approach seeks to combine exposure/dose/effect assessment with risk characterization and managerial considerations. <http://www.ERICA-tool.com>.
22. Gudkov D.I., Derevets V.V., Zub L.N. et al. The distribution of the radionuclides in the main components of lake ecosystems within the Chernobyl NPP exclusion zone. *Radiats. Biol. Radioecol*. 2005. Vol. 45, N 3. P. 271—280.
23. Gudkov D.I., Kaglyan A.E., Kireev, S.I. et al. The main radionuclides and dose formation in fish of the Chernobyl NPP exclusion zone. *Radiats. Biol. Radioecol*. 2008. Vol. 48, N 1. P. 48—58.
24. Gudkov D.I., Kaglyan A.Ye., Nazarov A.B., Klenus V.G. Dynamics of the content and distribution of the main dose forming radionuclides in fishes of the exclusion zone of the Chernobyl NPS. *Hydrobiol. J*. 2008. Vol. 44, N 5. P. 87—104.
25. Gudkov D.I., Kuzmenko M.I., Kireev S.I. et al. Radionuclides in components of aquatic ecosystems of the Chernobyl accident restriction zone. 20 Years after the Chernobyl Accident: Past, Present and Future. Ed by E.B. Burlakova and V.I. Naidich. New York: Nova Science Publ., Inc., 2007. P. 265—285.
26. Gudkov D.I., Shevtsova N.L., Pomortseva N.L. et al. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *J. Environ. Radioactivity*. 2016. N 151. P. 438—448.
27. Gueraud F., Atalay M., Bresgen N. et al. Chemistry and biochemistry of lipid peroxidation products. *Free Radic*. 2010. Vol. 44, N 10. P. 1098—1124.
28. Hawkes J.W. The effects of xenobiotics on fish tissues: morphological studies. *Federation Proceedings*. 1980. Vol. 39, N 14. P. 3230—3236
29. IAEA, Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Radiological Assessment Reports Series No. 8. Vienna: IAEA, 2006. 166 p.
30. Kaglyan O.Ye., Gudkov D.I., Belyaev V.V. et al. Changes in radiation exposure rate of fish of the cooling pond of the Chernobyl NPS and Lake Azbuchyn after water level lowering. *Hydrobiol. J*. 2023. Vol. 59, N 2. P. 39—53.
31. Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Belyaev V.V. et al. The absorbed dose rate of external exposure to representatives of ichthyofauna of lakes in the Chernobyl Exclusion Zone. *Nucl. Phys. At. Energy*. 2024. Vol. 25, N 2. P. 141—148.
32. Kaglyan A.Y., Gudkov D.I., Kireev S.I. et al. Fish of the Chernobyl exclusion zone: Modern levels of radionuclide contamination and radiation doses. *Hydrobiol. J*. 2019. Vol. 55, N 5. P. 81—99.
33. Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Kireev S.I. et al. Dynamics of specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in representatives of ichthyofauna of Chernobyl exclusion zone. *Nucl. Phys. At. Energy*. 2021. Vol. 22, N 1. P. 62—73.
34. Kaglyan O.Y., Gudkov D.I., Klenus V.G. et al. Radionuclides in the indigenous fish species of the Chernobyl exclusion zone. *Nucl. Phys. At. Energy*. 2012. Vol. 13, N 3. P. 306—315.
35. Kiang Ju.G., Fukumoto R., Gorbunov N.V. Lipid peroxidation after ionizing irradiation leads to apoptosis and autophagy. Lipid peroxidation. A. Catala (Ed.). IntechOpen, 2012. <https://www.intechopen.com/chapters/38458>.
36. Lipid peroxidation. Catala A. (Ed.). IntechOpen, 2012. 548 p.

37. Marnett L.J. Lipid peroxidation-DNA damage by malondialdehyde. *Mutat. Res.* 1999. Vol. 424, N 2. P. 83—95.
38. Martseniuk V. M., Potrokhov O. S. Features of energy supply of perch and roach tissues under excessive anthropogenic load. *Hydrobiol. J.* 2024. Vol. 60, N 5. P. 58—68.
39. Mikryakov V.R., Gudkov D.I., Mikryakov D.V. et al. Comparative characteristics of leucocytes compositions in the crucian carp *Carassius carassius* (Cyprinidae) from the waterbodies of the Chernobyl exclusion zone and from the Rybinsk reservoir. *J. Ichthyol.* 2013. Vol. 53, N 9. P. 753—757.
40. Patterson Je., Mura C. Rapid colorimetric assays to qualitatively distinguish RNA and DNA in biomolecular samples. *J. Vis. Exp.* 2013. Vol. 72. 50225.
41. Pomortseva N.A., Gudkov D.I. Effect of additional acute irradiation on cytomorphological abnormalities of erythrocytes of the Prussian carp (*Carassius gibelio* Bloch) from water body contaminated with radionuclides *Problemy Radiatsiinoi Medytsyny ta Radiobiologii.* 2019. Vol. 24. P. 270—283.
42. Pomortseva N.A., Rodionova N.K., Gudkov D.I., Kaglyan O.Ye. Quantitative and qualitative composition of the peripheral blood of fish in the gradient of long-term radiation exposure. *Hydrobiol. J.* 2024. Vol. 60, N 1. P. 84—100.
43. Rudyk-Leuska N., Potrokhov O., Khyzhniak M., Kononenko R. Comparative characteristics of the physiological state of fish under different climatic conditions on the example of Kremenchuk and Kakhovka reservoirs. *AACL Bioflux.* 2023. Vol. 16, N 1. P. 371—380.
44. Schreck C.B., Tort L. The concept of stress in fish. *Fish Physiology.* 2016. Vol. 35. P. 1—34.
45. Sreejai R., Jaya D.S. Studies on the Changes in lipid peroxidation and antioxidants in fishes exposed to hydrogen sulfide. *Toxicol. Int.* 2010. Vol. 17 N 2. P. 71—77.
46. Zarubin O.L., Laktionov V.A., Moshna B.O. et al. Technogenic radionuclides in freshwater fishes of Ukraine after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Nucl. Phys. At. Energy.* 2011. Vol. 12, N 2. P. 192—197.

Надійшла 11.09.2025

O.S. Potrokhov, Dr. Sc. (Biol.), Senior Researcher, Head of Department,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: apotrokhov@gmail.com
ORCID 0000-0002-8274-6898

D.I. Gudkov, Dr. Sc. (Biol.), Prof., NAS Corresp. member, Head of Department,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: digudkov@gmail.com
ORCID 0000-0002-5304-7414

Yu.M. Hudiyash, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: yurahud@ukr.net,
ORCID 0000-0002-8588-0371

V.V. Belyaev, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: belyaev-vv@ukr.net
ORCID 0000-0003-4465-7816

L.V. Fedorenko, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: fedorenko.l@nas.gov.ua,
ORCID 0000-0002-7241-0282

PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INDICATORS OF FISH IN WATER RESERVOIRS OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

Some physiological and biochemical parameters of rudd (*Scardinius erythrophthalmus* Rudd.) and perch (*Perca fluviatilis* L.) from water bodies of the Chernobyl Exclusion Zone (CEZ) were studied in the range of absorbed dose rates of radiation exposure of 5.1–18.7 $\mu\text{Gy/h}$. It was found that fish of the CEZ were characterized by higher fattening and an increased liver index compared to the control (0.06 $\mu\text{Gy/h}$), which indicates the activation of compensatory mechanisms aimed at reducing the negative impact of the environment. This is confirmed by the reduced RNA content and reduced RNA/DNA ratio in the gills of the CEZ fish, which reflects the inhibition of biosynthetic processes in tissues, primarily protein synthesis. In the liver of fish from the CEZ reservoirs, an increased content of diene conjugates and malondialdehyde was detected - products of lipid peroxidation, in particular polyunsaturated fatty acids, which are markers of damage to cell membranes due to the action of free radicals and indicate the development of oxidative stress, which can lead to pathological processes in the organism.

Keywords: ionizing radiation, fish, absorbed dose rate, antioxidant activity, lipid peroxidation, DNA, RNA, malondialdehyde, diene conjugates.