

УДК 574.5:[504.5:628.4.047

DOI <https://doi.org/10.33989/2025.11.1.336850>

Р. Г. Махінько

Поліський національний університет

Старий бульвар, 7, Житомир, Житомирська область, 10002

vse-svit@ukr.net

ORCID: 0009-0002-8401-8226

АДІОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДОЙМ: БІОІНДИКАЦІЯ І АДАПТАЦІЯ ВОДНИХ ОРГАНІЗМІВ У ВІДДАЛЕНИЙ ПЕРІОД ПІСЛЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ КАТАСТРОФИ

Стаття присвячена оцінці довготривалого радіоекологічного впливу на водні екосистеми у зоні впливу Чорнобильської катастрофи через майже 40 років після аварії. Дослідження охоплює водойми з різним рівнем радіонуклідного забруднення, включаючи річкові та озерні ділянки Полісся, а також контрольні зони за межами прямого радіаційного впливу. Вивчено просторовий розподіл довгоживучих радіонуклідів (^{137}Cs , ^{90}Sr) у воді, донних відкладах і водних організмах, що дозволило встановити характер їх біоаккумуляції, мобільності та екотоксикологічного навантаження на біоту.

*Застосовано сучасні методи біоіндикації із використанням модельних організмів — *Daphnia magna* та риб родини Cyprinidae. Аналізували життєздатність безхребетних і активність антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази та каталази) у тканинах риб як індикатори оксидативного стресу. На забруднених локаціях життєздатність *Daphnia magna* знижувалася до 40–55% порівняно з контрольними умовами. Активність ферментів у риб зростала на 50–70%, що свідчить про реалізацію адаптивних механізмів захисту.*

У локаціях з максимальним рівнем забруднення зафіксовано зниження ферментативної активності на тлі високої концентрації радіонуклідів, що вказує на виснаження компенсаторних ресурсів та потенційне порушення гомеостазу. Встановлено достовірні кореляції між рівнем ^{137}Cs у воді та активністю ферментів у риб ($r = 0.91$, $p < 0.01$), а також між концентрацією радіонуклідів і життєздатністю дафній ($r = -0.87$, $p < 0.05$).

Отримані результати можуть бути використані для створення систем довгострокового біоіндикаційного моніторингу, екологічної реабілітації забруднених водойм і прогнозування ризиків для біорізноманіття у радіаційно трансформованих регіонах.

Ключові слова: радіоекологія, ^{137}Cs , ^{90}Sr , біоіндикація, адаптація, ферменти, моніторинг.

Вступ. Аварія на Чорнобильській атомній електростанції у 1986 році залишається однією з найбільших техногенних катастроф ХХ століття, наслідки якої суттєво вплинули на структуру, функціонування та стійкість екосистем Східної Європи. Особливо вразливими до радіонуклідного забруднення виявилися водні екосистеми, що функціонують як депо для радіоактивних елементів внаслідок атмосферного випадіння, поверхневого змиву, ерозійних процесів і біохімічної мобільності ізотопів у гідросфері.

Серед довготривалих забруднювачів ключову роль відіграють ізотопи цезію-137 (^{137}Cs) та стронцію-90 (^{90}Sr), які характеризуються високою біологічною доступністю, здатністю до біоаккумуляції та пролонгованим періодом напіврозпаду. Їхнє тривале присутнє циркулювання в системі «вода – донні відклади – біота» формує хронічне радіаційне навантаження

на гідробіонтів різного трофічного рівня та загрожує як біорізноманіттю, так і екологічній рівновазі водойм.

Оцінка екологічного стану таких водойм вимагає не лише інструментального контролю радіонуклідів, але й використання чутливих біологічних індикаторів, які відображають сублетальні ефекти забруднення на рівні організму. Біоіндикаційний підхід із використанням дафній (*Daphnia magna*) та риб родини коропові (Cyprinidae) є одним із найбільш інформативних методів моніторингу водного середовища. Ці організми демонструють спектр фізіологічних реакцій на радіаційне навантаження, зокрема зміну життєздатності, порушення метаболізму та функціонування антиоксидантної системи захисту.

Результати попередніх досліджень (Kashparov et al., 2018; Mousseau, 2021) свідчать про існування адаптаційних механізмів у водних організмів до умов тривалого хронічного радіоактивного стресу. Водночас при перевищенні певного дозового порогу відбувається виснаження компенсаторних ресурсів, що супроводжується порушенням гомеостазу, окисним стресом та потенційною загибеллю організмів. Саме тому вивчення тонких біохімічних маркерів адаптації має ключове значення для прогнозування стійкості біоценозів у радіаційно трансформованих екосистемах.

Метою дослідження є комплексна біоіндикаційна оцінка екологічного стану водойм Житомирського Полісся у віддалений період після Чорнобильської катастрофи та визначення адаптаційної відповіді водних організмів на хронічне радіонуклідне навантаження.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження виконували у межах науково-дослідної теми «Радіоекологічна оцінка водних біоресурсів у віддалений період після аварії на Чорнобильській атомній електростанції», зареєстрованої в МОН України (№ 0124U000593). Польовий етап здійснювався навесні та восени 2024 року на п'яти вибраних локаціях Житомирського Полісся (табл. 1), які характеризуються різними рівнями радіоактивного забруднення. Вибір ділянок забезпечував просторову варіативність та репрезентативність радіаційного навантаження.

Таблиця 1

Локації різних типів водойм із різним рівнем радіоактивного забруднення

Локація	Географічне положення	Рівень забруднення
Локація 1	Річка Прип'ять біля села Чистоголівка	Високий, близькість до зони відчуження
Локація 2	Канал охолодження Чорнобильської АЕС	Максимальний, безпосередня близькість до джерела
Локація 3	Річка Уж у селі Іванків	Середній, периферійна зона впливу
Локація 4	Озеро Глибоке	Замкнене водоймище з накопиченням радіонуклідів
Локація 5	Річка Дніпро (контроль, біля Київського водосховища)	Низький, умовно чиста зона

Проби води відбирали відповідно до ДСТУ ISO 5667-11:2005, використовуючи стерильні контейнери об'ємом не менше 2 л. Зразки зберігали при температурі +5°C до моменту аналізу.

Проби донних відкладів збирали з глибини 0–10 см за допомогою ручного ґрунтозабірника. Після очищення від сторонніх домішок проби транспортували у маркованих ємностях у прохолодному стані.

Біологічні об'єкти — безхребетні *Daphnia magna*, які застосовували у тестуванні цілими організмами, риб родини Cyprinidae, у яких досліджували печінку та м'язову тканину.

Всі біологічні зразки транспортували живими. Перед аналізом проводили гомогенізацію тканин.

Усі радіологічні вимірювання проводили у вимірювальній лабораторії Поліського національного університету, акредитованій відповідно до ДСТУ ISO 10012:2005 (аудит 2022 р.).

Визначення питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr здійснювали на гамма-бетаспектрометрі МКС-АТ1315 (АТОМТЕХ), з використанням посуду Марінеллі та програмного забезпечення SPTR. Для детекції γ -випромінювання застосовували кристал NaI (63×63 мм), для β -випромінювання – полістирольний детектор (128×9 мм).

Потужність експозиційної дози γ -випромінювання визначали за допомогою дозиметра МКГ-АТ1321, оснащеного сцинтиляційним детектором (NaI, 25×40 мм) та лічильником Гейгера-Мюллера.

Біохімічний аналіз, оцінку антиоксидантного статусу здійснювали шляхом визначення активності - Супероксиддисмутази (СОД) — за методом Marklund & Marklund (1974) та Каталази — за методом Aebi (1984).

Ферменти екстрагували зі зразків риб'ячої тканини (печінка, м'язи) та з гомогенізованих організмів дафній. Визначення проводили спектрофотометрично.

У пробах води вимірювали температуру, рН, розчинений кисень, концентрації іонів Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ за допомогою портативних мультисенсорів та спектрофотометрів.

Обробку даних здійснювали у R (версія 4.2.0), обчислювали середні значення, стандартне відхилення (SD), проводили ANOVA для міжгрупових порівнянь, визначали кореляції Пірсона (r).

Встановлено:

- сильну позитивну кореляцію між концентрацією ^{137}Cs у воді та активністю СОД у риб ($r = 0.91$, $p < 0.01$);

- негативну кореляцію між концентрацією радіонуклідів та життєздатністю *Daphnia magna* ($r = -0.87$, $p < 0.05$).

Результати та їх обговорення. Результати дослідження продемонстрували суттєву просторову варіацію концентрацій радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді, донних відкладах та тканинах водних організмів залежно від локалізації ділянки (табл. 2).

Таблиця 2

Концентрація ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді та донних відкладах

Локація	Вода, ^{137}Cs , (Бк/л)	Вода, ^{90}Sr , (Бк/л)	Донні відклади ^{137}Cs , (Бк/кг)	Донні відклади, ^{90}Sr , (Бк/кг)
Локація 1 (Прип'ять)	95 ± 10	60 ± 8	450 ± 50	380 ± 40
Локація 2 (канал АЕС)	125 ± 15	80 ± 10	650 ± 70	520 ± 60
Локація 3 (р. Уж)	55 ± 6	35 ± 5	280 ± 30	190 ± 25
Локація 4 (оз. Глибоке)	40 ± 5	25 ± 4	230 ± 25	160 ± 20
Локація 5 (р. Дніпро)	8 ± 2	5 ± 1	50 ± 5	40 ± 5

Найвищий рівень радіоактивного забруднення було зафіксовано у водоймах, розташованих ближче до епіцентру катастрофи (рис. 1).

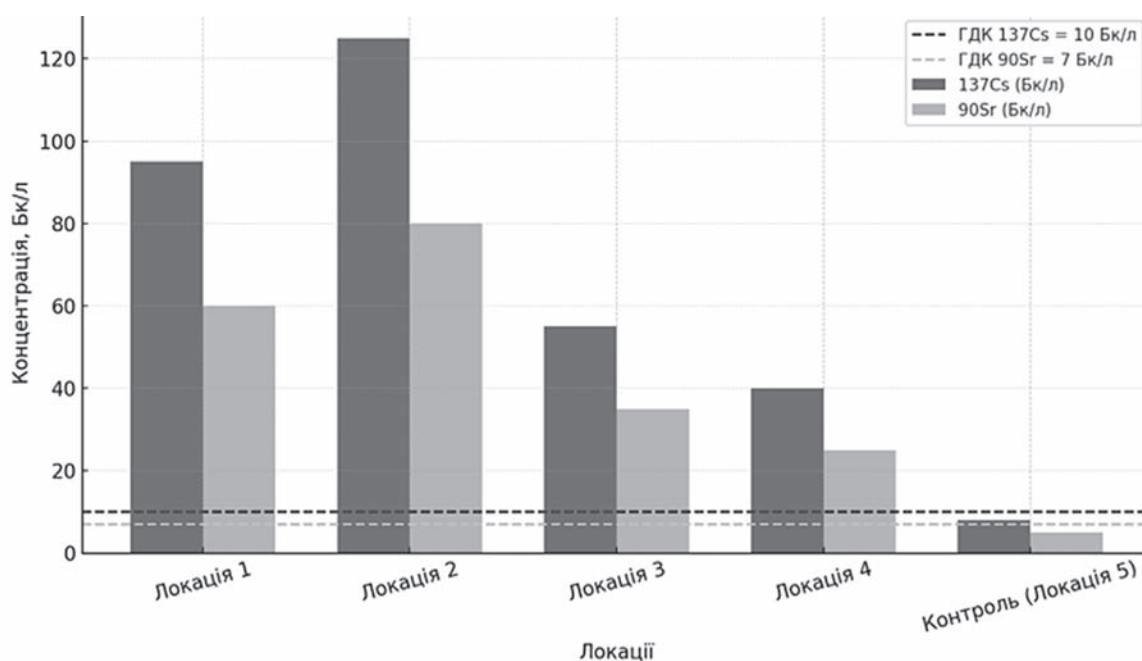


Рис. 1. Концентрація ^{137}Cs і ^{90}Sr у різних локаціях.

У локації 2, що безпосередньо прилягає до Чорнобильської АЕС, де концентрація ^{137}Cs у воді перевищувала 125 Бк/л, а у донних відкладах – понад 650 Бк/кг. У контрольній Локації 5 (р. Дніпро) зафіксовано рівні, що не перевищують орієнтовні ГДК: для ^{137}Cs у воді – 10 Бк/л, для ^{90}Sr – 7 Бк/л. З огляду на відсутність чітко нормованих ГДК для донних відкладів, концентрації понад 300 Бк/кг ^{137}Cs вважаються екологічно небезпечними (Kashparov et al., 2018).

У тканинах риб родини Cyprinidae виявлено біоаккумуляцію ^{137}Cs до рівня 160 ± 20 Бк/кг, що перевищує допустимі показники для харчових продуктів. Радіонуклід ^{90}Sr , відомий своїм афінитетом до кісткової тканини, переважно накопичувався у скелетних структурах, що свідчить про тривале хронічне забруднення середовища.

Біоіндикація екологічного навантаження

Життєздатність *Daphnia magna*, визначена як біоіндикатор чутливості до радіаційного впливу, знижувалася пропорційно концентрації ^{137}Cs у воді (табл. 3).

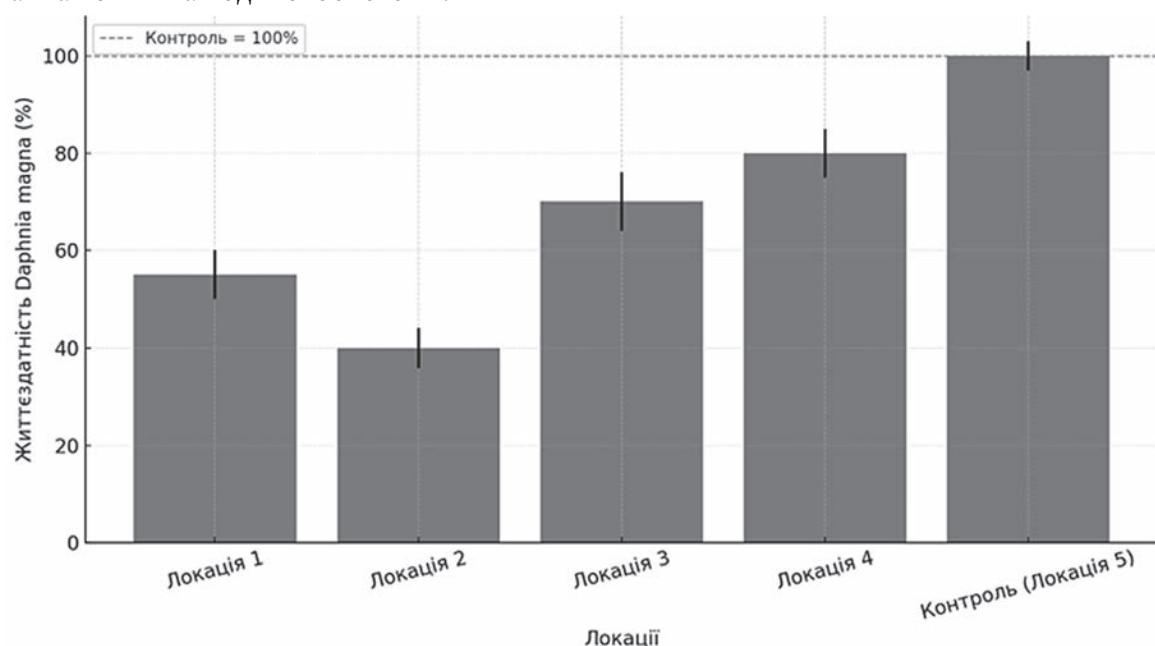
Таблиця 3

Життєздатність *Daphnia magna* при різних рівнях ^{137}Cs

Локація	^{137}Cs , вода (Бк/л)	Життєздатність (% від контролю)
Локація 1 (Прип'ять)	95	55 ± 5
Локація 2 (канал АЕС)	125	40 ± 4
Локація 3 (р. Уж)	55	70 ± 6
Локація 4 (оз. Глибоке)	40	80 ± 5
Локація 5 (р. Дніпро-контроль)	8	100 ± 3

У локаціях із концентрацією ^{137}Cs понад 50 Бк/л фіксувалося зниження життєздатності *Daphnia magna* на 40–60%. Це узгоджується з даними Sakauchi & Otaki (2023), які продемонстрували індукцію оксидативного стресу та порушення репродуктивної функції у безхребетних при хронічному впливі радіоактивного забруднення. Результати підтверджують ефективність *Daphnia magna* як чутливого біоіндикатора у моніторингу техногенного забруднення водойм (рис. 2).

Високі концентрації радіонуклідів у *Daphnia magna* свідчать про тривале радіоактивне навантаження на водні екосистеми.

Рис. 2. Життєздатність дафній у залежності від концентрації ^{137}Cs .

Таблиця 4

Активність антиоксидантних ферментів у тканинах риб

Локація	СОД (од./мг білка)	Каталаза (од./мг білка)
Локація 1 (Прип'ять)	7.5 ± 0.6	5.8 ± 0.5
Локація 2 (канал АЕС)	8.3 ± 0.7	6.5 ± 0.6
Локація 3 (р. Уж)	6.0 ± 0.5	4.2 ± 0.4
Локація 4 (оз. Глибоке)	5.3 ± 0.4	3.8 ± 0.3
Локація 5 (р. Дніпро-контроль)	4.0 ± 0.3	2.5 ± 0.2

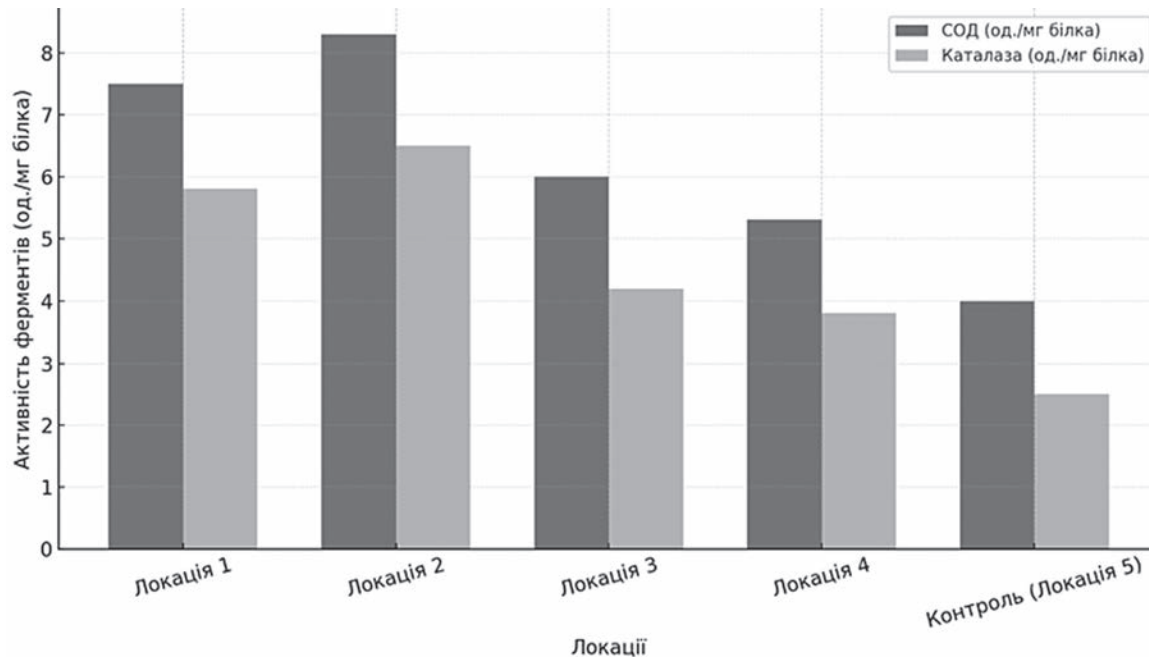


Рис. 3. Антиоксидантна активність у тканинах риб із різних локацій.

Адаптаційна відповідь водних організмів

Аналіз антиоксидантної відповіді у риб засвідчив значне підвищення активності ферментів першої лінії захисту – супероксиддисмутази (СОД) та каталази – у локаціях із підвищеним рівнем ^{137}Cs (табл. 4).

Графік демонструє позитивну кореляцію між рівнем ^{137}Cs і активністю ферментів, що відображає активність антиоксидантних ферментів (СОД і каталаза) у тканинах риб (рис. 3).

Найвищу активність СОД (8.3 од./мг білка) зареєстровано у риб із Локації 2 – понад 60% вище, ніж у контрольних зразках. Каталаза продемонструвала аналогічну тенденцію, що свідчить про активацію ферментативного захисту від оксидативного стресу.

Подібні зміни антиоксидантного профілю були описані у дослідженнях, де в умовах хронічного забруднення водойм зони відчуження ЧАЕС у риб фіксували стабільне підвищення активності СОД і каталази. Наші результати узгоджуються також з оглядом Mousseau (2021), який наголошував на універсальності антиоксидантної відповіді гідробіонтів при хронічному впливі іонізуючого випромінювання.

Водночас у Локації 2, яка зазнає максимального навантаження, спостерігалось зниження активності ферментів при високому накопиченні ^{90}Sr , що може свідчити про виснаження адаптаційних резервів організму. Цей ефект є важливим для розуміння меж екологічної пластичності водних організмів.

Отримані результати узгоджуються з даними Mousseau (2021), який зазначав, що хронічний вплив радіонуклідів викликає як адаптаційні реакції, так і довготривалі негативні наслідки для водних екосистем.

Екологічні наслідки

Отримані результати свідчать, що тривале радіонуклідне навантаження спричиняє трансформацію водних екосистем: зниження біорізноманіття, порушення фізіологічного стану гідробіонтів, зміни у трофічних зв'язках внаслідок біоаккумуляції та біомагніфікації.

База Інституту гідробіології НАН України (2024) також підтверджує зменшення чисельності та життєздатності гідробіонтів у зоні Полісся при підвищених концентраціях ^{137}Cs . Дані Kashparov et al. (2018) доповнюють цю картину, демонструючи стабільне накопичення радіонуклідів у тканинах водних організмів навіть через десятиліття після аварії.

Таким чином, результати нашого дослідження становлять наукову основу для створення ефективних систем екологічного моніторингу та формування стратегії реабілітації постраждалих акваторій. Подальші дослідження мають бути зосереджені на оцінці репродуктивного потенціалу популяцій, функціонуванні біоценозів та розробці біотехнологічних методів очищення радіоактивно забруднених водойм.

Висновки. Водойми, розташовані у зоні впливу Чорнобильської катастрофи, залишаються забрудненими радіонуклідами ^{137}Cs і ^{90}Sr навіть через десятиліття після аварії, що підтверджує необхідність постійного екологічного моніторингу.

Застосування біоіндикаторів — *Daphnia magna* та риб родини Cyprinidae — виявило достовірні зв'язки між концентрацією радіонуклідів і фізіологічними реакціями організмів. Зниження життєздатності дафній та зростання активності антиоксидантних ферментів у риб свідчать про вплив хронічного радіаційного навантаження та реалізацію адаптивної відповіді.

Водночас у найбільш забруднених локаціях зафіксовано ознаки виснаження компенсаторних механізмів, що вказує на обмеження адаптаційного потенціалу водних популяцій.

Отримані результати є основою для впровадження біоіндикаційної системи моніторингу, зокрема із використанням *Daphnia magna* як чутливого тест-організму, та для формування стратегій реабілітації радіаційно забруднених водойм.

Автор засвідчує відсутність конфлікту інтересів при виконанні цього дослідження та підготовці рукопису.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Гудков Д., Кузьменко М., Кіреєв С., Назаров О., Шевцова Н., Дзюбенко О., Каглян О. Радіоекологічні проблеми водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС. *Вісник Національної академії наук України*. 2008. № 4. С. 44–55. URL: <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/visnyk/article/view/4073>
- Махінько Р. Комплексні заходи по відновленню водойм Житомирського Полісся після Чорнобильської катастрофи. *Екологічні науки*. 2024. 3(54). С. 57–63. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7>
- Kashparov V., Levchuk S., Zhurba M., Protsak V., Khomutinin Yu., Beresford N. A., Chaplow J. S. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data*. 2018. Vol. 10(1). P. 339–353. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-10-339-2018>
- Mousseau T. A. The Biology of Chernobyl. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*. 2021. Vol. 52(1). P. 87–109. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024827>
- Sakauchi K., Otaki J. M. Soil microbes and plant-associated microbes in response to radioactive pollution may indirectly affect plants and insect herbivores: Evidence for indirect field effects from Chernobyl and Fukushima. *Microorganisms*. 2024. Vol. 12(2). P. 364. URL: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020364>

RADIOACTIVE CONTAMINATION OF WATER BODIES: BIOINDICATION AND ADAPTATION OF AQUATIC ORGANISMS IN THE REMOTE PERIOD AFTER THE CHERNOBYL DISASTER

Makhinko R. H.

Polissya National University

This study presents an assessment of the long-term radioecological impact on aquatic ecosystems in the zone affected by the Chernobyl disaster nearly 40 years after the accident. The research covers water bodies with varying levels of radionuclide contamination, including riverine and lacustrine sites within the Polissia region and control areas outside the direct zone of radioactive influence. The spatial distribution of long-lived radionuclides (^{137}Cs and ^{90}Sr) in water, bottom sediments, and aquatic organisms was investigated, enabling an evaluation of their bioaccumulation, mobility, and ecotoxicological pressure on biota.

Modern bioindication methods were applied using model organisms – *Daphnia magna* and fish of the Cyprinidae family. The vitality of invertebrates and the activity of antioxidant enzymes (superoxide dismutase and catalase) in fish tissues were analyzed as indicators of oxidative stress. In contaminated locations, *Daphnia magna* vitality decreased to 40–55% compared to control conditions. Enzyme activity in fish increased by 50–70%, indicating the activation of adaptive protective mechanisms.

In the most contaminated sites, a decline in enzymatic activity was recorded despite elevated radionuclide concentrations, suggesting depletion of compensatory capacities and potential disruption of homeostasis. Significant correlations were established between ^{137}Cs levels in water and enzyme activity in fish ($r = 0.91$, $p < 0.01$), as well as between radionuclide concentrations and *Daphnia* vitality ($r = -0.87$, $p < 0.05$).

The obtained results provide a foundation for developing long-term bioindication-based monitoring systems, ecological rehabilitation of contaminated water bodies, and risk assessment for biodiversity in radiation-transformed environments.

Keywords: radioecology, ^{137}Cs , ^{90}Sr , bioindication, adaptation, enzymes, monitoring.

REFERENCES

- Hudkov, D., Kuzmenko, M., Kirieiev, S., Nazarov, O., Shevtsova, N., Dziubenko, O., & Kahlian, O. (2008). Radioekologichni problemy vodnykh ekosystem zony vidchuzhennia Chornobyl'skoi AES [Radioecological problems of aquatic ecosystems of the Chernobyl NPP exclusion zone]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine], 4, 44-55. Retrieved from <https://nasu-periodicals.org.ua/index.php/visnyk/article/view/4073> [in Ukrainian].
- Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Protsak, V., Khomutinin, Yu., Beresford, N. A., & Chaplow, J. S. (2018). Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data*, 10(1), 339-353. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/essd-10-339-2018>
- Makhinko, R. (2024). Kompleksni zakhody po vidnovlenniu vodoim Zhytomyrskoho Polissia pislia Chornobyl'skoi katastrofy [Comprehensive measures for the restoration of water bodies of Zhytomyr Polissya after the Chernobyl disaster]. *Ekologichni nauky* [Ecological sciences], 3(54), 57-63. Retrieved from <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7> [in Ukrainian].
- Mousseau, T. A. (2021). The Biology of Chernobyl. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 52(1), 87-109. Retrieved from <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024827>
- Sakauchi, K., & Otaki, J. M. (2024). Soil microbes and plant-associated microbes in response to radioactive pollution may indirectly affect plants and insect herbivores: Evidence for indirect field effects from Chernobyl and Fukushima. *Microorganisms*, 12(2), 364. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020364>