

РАДІОНУКЛІДНЕ ЗАБРУДНЕННЯ РІЧОК ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ: АНАЛІЗ БІОАКУМУЛЯЦІЇ В ГІДРОБІОНТАХ

Р. Г. Махінько

аспірант

Поліський національний університет (м. Житомир, Україна)

e-mail: vse-svit@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8401-8226>**О. Ф. Дунаєвська**

доктор біологічних наук, професор

Поліський національний університет (м. Житомир, Україна)

e-mail: oksana_fd@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-8211>

Метою дослідження було проведення комплексної радіоекологічної оцінки водних екосистем Житомирського Полісся у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС з детальним визначенням рівнів радіонуклідного забруднення донних відкладів, води і промислових видів риб, а також аналізом закономірностей біоаккумуляції радіоцезію та радіостронцію в гідробіонтах. Дослідження проведено в січні 2025 року на водних об'єктах басейну річки Тетерів у межах Житомирської області з використанням сучасних радіохімічних та гамма-спектрометричних методів аналізу. Відібрано та проаналізовано зразки донних відкладів із глибини 0,5–1,0 м, берегових осадових поверхневого шару (0–5 см) та води з р. Тетерів у межах м. Житомир, а також зразки м'язової тканини та комплексу “голова + внутрішні органи” чотирьох промислових видів риб (товстолоб білий, короп звичайний, карась сріблястий, щука звичайна) із р. Здвиж Брусилівського району. Визначення питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr та природного ^{40}K проводилося в акредитованій вимірювальній лабораторії Поліського національного університету з похибкою вимірювань, що не перевищувала 15–20% за довірчої ймовірності 0,95. Встановлено значну диференціацію концентрацій радіонуклідів між різними компонентами водної екосистеми. Найвищі концентрації ^{137}Cs спостерігалися в донних відкладах (25,81 Бк/кг) і берегових осадах (20,26 Бк/кг), що у 71,7 рази перевищує показники води (0,36 Бк/кг). Концентрації ^{90}Sr характеризуються протилежною закономірністю з максимальними значеннями в берегових осадах (8,60 Бк/кг) внаслідок вищої мобільності цього радіонукліда. Серед досліджених видів риб найвищий вміст ^{137}Cs зафіксовано в короп'ячих видів: коропа (3,16–5,45 Бк/кг), товстолоба (2,51–4,76 Бк/кг); найнижчий — у щуки (1,53–3,17 Бк/кг) та карася (0,95–2,05 Бк/кг). Концентрації ^{90}Sr у тканинах риб коливалися від 12,90 Бк/кг у щуки до 26,30 Бк/кг у товстолоба, що у 2–4 рази перевищує фонові значення для регіону. Виявлена видова специфічність біоаккумуляції радіонуклідів пов'язана з особливостями способу живлення, екології та фізіології досліджених видів. Концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr у м'язовій тканині риб не перевищують чинних гігієнічних нормативів для продуктів харчування, однак підвищені рівні у внутрішніх органах вимагають їх обов'язкового вилучення під час переробки. Концентрації природного радіонукліда ^{40}K у донних відкладах і тканинах риб відповідають літературним значенням для регіону. Результати підтверджують необхідність продовження систематичного радіоекологічного моніторингу водних біоресурсів регіону та розроблення науково обґрунтованих заходів щодо мінімізації радіоекологічних ризиків для забезпечення безпечного використання водних екосистем Житомирського Полісся.

Ключові слова: радіонукліди, водні екосистеми, Чорнобильська аварія, радіоекологічний моніторинг.

ВСТУП

Аварія на Чорнобильській атомній електростанції в 1986 році призвела до масштабного радіоактивного забруднення території України та сусідніх країн. Особливо постраждав регіон Українського Полісся, включно з Житомирською областю, де сформувалися зони з підвищеним рівнем радіоактивного забруднення [1; 2]. Водні екосистеми виявилися найбільш чутливими до

радіонуклідного забруднення через інтенсивну міграцію радіонуклідів у водному середовищі та їхню біоаккумуляцію в гідробіонтах [3; 4].

У віддалений період після аварії (понад 35 років) актуальним залишається питання довгострокових змін радіоактивного забруднення водних екосистем та оцінки радіоекологічних ризиків для водних біоресурсів. Це особливо важливо для регіону Житомирського Полісся,

де розташовані численні водні об'єкти, що використовуються для рибогосподарських цілей і рекреації [5].

Сучасні дослідження показують, що концентрації основних дозоутворюючих радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у водних екосистемах Північної України залишаються підвищеними порівняно з доаварійним періодом [6; 7].

Подібні тенденції спостерігались і в країнах Азії після Фукусімської аварії, де наголошується на тривалості присутності радіонуклідів у продуктах харчування [8].

Процеси біоаккумуляції цих радіонуклідів у тканинах риб характеризуються видовою специфічністю та залежністю від екологічних особливостей водних об'єктів [4].

Метою дослідження є аналіз довгострокових змін радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся шляхом оцінки рівнів біоаккумуляції ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{40}K у донних відкладах, воді та тканинах гідробіонтів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема радіоекологічного стану водних екосистем після Чорнобильської аварії досліджується протягом останніх десятиліть багатьма вітчизняними та зарубіжними науковцями.

Р. Bezhenar і співавт. у своєму дослідженні моделювали міграцію ^{137}Cs та ^{90}Sr у водоймі-охолоджувачі ЧАЕС до та після зниження рівня води, показавши складність процесів перерозподілу радіонуклідів у водних екосистемах [9].

А. І. Дворецький і співавт. проводили комплексні радіоекологічні дослідження водних екосистем Придніпров'я, встановивши закономірності накопичення радіонуклідів у різних компонентах водних екосистем [3]. Особливу увагу приділено дослідженню біоаккумуляції радіонуклідів у промислових видах риб Дніпровських водосховищ [10].

О. Є. Каглян та ін. досліджували динаміку питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs у представників іхтіофауни зони відчуження ЧАЕС, виявивши значні міжвидові відмінності в накопиченні радіонуклідів. Автори встановили, що концентрації радіонуклідів у тканинах риб залежать від трофічного рівня, віку та екологічних особливостей видів [4].

Н. Sato та співавт. оцінювали зміни концентрацій радіонуклідів і рівнів підземних вод до та після спуску води з водойми-охолоджувача ЧАЕС, підтвердивши важливість гідрологічних чинників у процесах міграції радіонуклідів. Дослідження показало, що зміни гідрологічного режиму суттєво впливають на

перерозподіл радіоактивного забруднення у водних екосистемах [11].

В. В. Скиба проводив радіоекологічний моніторинг накопичення ^{90}Sr та ^{137}Cs в організмах риб деяких водойм Лісостепу України, встановивши регіональні особливості радіонуклідного забруднення [6].

О. М. Волкова та співавт. досліджували техногенні радіонукліди в гідробіонтах водних об'єктів Північної України, підтвердивши необхідність продовження моніторингових досліджень [7].

Р. Г. Махінько у своїх дослідженнях розглядав довгострокові наслідки Чорнобильської катастрофи для водних екосистем і комплексні заходи з відновлення водойм Житомирського Полісся. Автор підкреслив важливість системного підходу до радіоекологічної реабілітації водних об'єктів регіону [5; 12].

О. Ф. Дунаєвська та ін. наголошують на значенні радіоекологічного моніторингу як інструменту екологічної безпеки в умовах сучасних загроз, особливо на важливості вивчення процесів накопичення радіонуклідів у лісових і болотних екосистемах Українського Полісся, охоплюючи роль мохового покриву як бар'єру для міграції ^{137}Cs [13].

Досвід систематичних досліджень, викладений у цій праці, підтверджує необхідність застосування автоматизованих систем радіоекологічного моніторингу для оперативного реагування на зміну радіаційної ситуації, що є актуальним і для водних екосистем регіону.

Аналіз літератури показує, що, незважаючи на численні дослідження, питання довгострокової динаміки радіонуклідного забруднення водних екосистем Житомирського Полісся потребує подальшого вивчення, особливо в контексті сучасного стану біоаккумуляції радіонуклідів у промислових видах риб.

У контексті зонування територій радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії важливими є результати дослідження В. О. Кашпарова та співавт., які деталізують просторову структуру забруднення [14].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено у 2025 році на водних об'єктах басейну річки Тетерів у межах Житомирської області (рис. 1). Відбір зразків здійснювався згідно з чинними методичними рекомендаціями щодо радіоекологічного моніторингу водних об'єктів [15–18]. Радіаційна безпека під час польових досліджень забезпечувалася відповідно до норм НРБУ-97 [19].

Із річки Тетерів у межах м. Житомир відібрано зразки донних відкладів із глиби-



Рис. 1. Місце відбору проб

Джерело: розроблено авторами.

ни 0,5–1,0 м, берегових осадов та води. Відбір зразків донних відкладів проводився за допомогою дночерпака, берегових осадов — методом змішаної проби з поверхневого шару (0–5 см), води — у стерильні ємності об'ємом 1 л.

Зразки промислових видів риб відібрано з річки Здвиж Брусилівського району Житомирської області в січні 2025 року (рис. 1).

У процесі дослідження було вилучено чотири види риб, типових для іхтіофауни річкових екосистем Українського Полісся: товстолоб білий (*Hypophthalmichthys molitrix* Valenciennes, 1844), короп звичайний (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), карась сріблястий (*Carassius gibelio* Bloch, 1782) та щука звичайна (*Esox lucius* Linnaeus, 1758).

Для кожного зразка риби проводилося розділення на дві анатомічні фракції: м'язову тканину (істивна частина) та комплекс “голова + внутрішні органи” для окремого радіологічного аналізу. Усього було проаналізовано по три зразки кожного виду риб у кожній фракції, що становило загалом 24 проби (4 види $\times$ 2 анатомічні частини $\times$ 3 зразки). Для аналізу м'язової тканини відбиралися середні частини філе без луски та шкіри масою 200–300 г кожен зразок.

Підготовка зразків абіотичних компонентів екосистеми до аналізу охоплювала висушування за температури 105°C до постійної маси, подрібнення та гомогенізацію. Зразки риб досліджувалися у нативному стані без попередньої термічної обробки для збереження автентичного розподілу радіонуклідів.

Визначення питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{40}K проводилося в акреди-

тованій вимірювальній лабораторії навчально-наукового центру екології та охорони навколишнього середовища Поліського національного університету (свідцтво про відповідність системи вимірювань вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 № 0073 від 15.06.2022).

Активність ^{137}Cs та ^{40}K визначалася гамма-спектрометричним методом із використанням спектрометра МКС-АТ1315 виробництва АТОМТЕХ. Реєстрація гамма-випромінювання здійснювалася сцинтиляційним блоком із кристалом NaI(Tl) розміром 63×63 мм. Процедура вимірювань охоплювала два основні етапи: попереднє вимірювання фоновому спектру протягом 3 годин із його збереженням у пам'яті приладу та аналіз досліджуваних зразків, поміщених у спеціальні ємності типу Марінеллі об'ємом 1 л, які заповнювалися повністю для дотримання стандартної геометрії вимірювання. Обробка спектрів проводилася в режимі реального часу за допомогою програмного забезпечення SPTR.

Визначення ^{90}Sr проводилося радіохімічним методом із виділенням іттрію-90 згідно зі стандартними методиками радіохімічного аналізу. Контроль потужності експозиційної дози гамма-випромінювання здійснювався спектрометром-дозиметром МКГ-АТ1321, обладнаним сцинтиляційним детектором NaI (25×40 мм) і лічильником Гейгера-Мюллера, в безперервному режимі.

Похибка вимірювань не перевищувала 15% для ^{137}Cs і ^{40}K та 20% — для ^{90}Sr за довірчої ймовірності 0,95. Мінімальна детектована активність становила 0,1 Бк/кг для ^{137}Cs і ^{40}K та 0,5 Бк/кг — для ^{90}Sr .

Статистична обробка результатів проводилася з використанням методів дескриптивної статистики. Розраховувалися середні арифметичні значення, стандартні відхилення та коефіцієнти варіації для кожного показника. Усі дослідження виконувались у межах науково-дослідної роботи “Радіоекологічна оцінка водних біоресурсів у віддалений період після аварії на Чорнобильській атомній електростанції”, зареєстрованої в МОН України (№ 0124U000593).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати визначення питомої активності радіонуклідів у компонентах водної екосистеми річки Тетерів показали значну диференціацію концентрацій між різними середовищами (табл. 1).

Найвищі концентрації ^{137}Cs зафіксовано в донних відкладах (25,81 Бк/кг), що на 27,4% перевищує показники берегових осади і в 71,7 раза більше, ніж у воді (рис. 2).

Це пояснюється здатністю ^{137}Cs до сорбції на глинистих мінералах донних відкладів і

його низькою міграційною здатністю у водному середовищі [9; 11].

Концентрації ^{90}Sr характеризуються протилежною закономірністю: найвищі значення спостерігаються в берегових осадах (8,60 Бк/кг), тоді як у донних відкладах активність цього радіонукліда мінімальна (0,003 Бк/кг). Така відмінність пов'язана з вищою мобільністю ^{90}Sr у водному середовищі та його схильністю до латерального перенесення [4].

Природний радіонуклід ^{40}K показав очікувано високі концентрації в донних відкладах (380,29 Бк/кг) і берегових осадах (286,5 Бк/кг), що відповідає літературним даним щодо його поширення у ґрунтах і донних відкладах регіону [15].

Результати аналізу радіонуклідного забруднення промислових видів риб із річки Здвиж представлено в табл. 2.

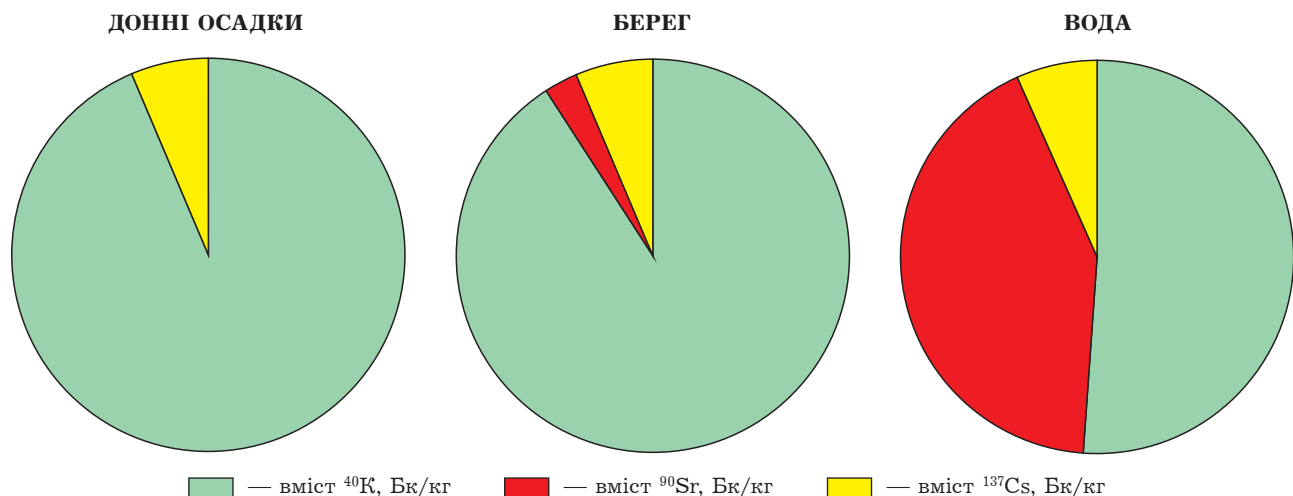
Аналіз розподілу ^{137}Cs у тканинах риб показав найвищі концентрації в короп'ячих видів (короп, товстолоб), що пов'язано з їхнім бентофагним способом живлення та тривалим перебуванням у придонних шарах води [4; 10]. У короп'ячих концентрації ^{137}Cs у комплексі

Таблиця 1

Питомі активності радіонуклідів у компонентах водного середовища

Зразок	^{137}Cs , Бк/кг	^{90}Sr , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг
Донні осади	25.81 ± 3.87	0.003 ± 0.001	380.29 ± 57.04
Берегові осади	20.26 ± 3.04	8.600 ± 1.720	286.50 ± 42.98
Вода	0.36 ± 0.05	2.300 ± 0.460	2.77 ± 0.42

Джерело: сформовано авторами за результатами власних вимірювань.

Рис. 2. — вміст ^{40}K , Бк/кг вміст ^{137}Cs , ^{90}Sr і ^{40}K у водному середовищі

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2

Діапазони концентрацій радіонуклідів у тканинах риб

Вид риби	Тканини	^{137}Cs , Бк/кг	^{90}Sr , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг
Товстолоб	Голова + нутрощі	4.05–5.47	21.04–31.56	50.80–68.74
Товстолоб	М'язова тканина	2.13–2.89	18.00–27.00	72.93–98.67
Короп	Голова + нутрощі	4.63–6.27	20.08–30.12	45.65–61.76
Короп	М'язова тканина	2.69–3.63	14.00–21.00	53.47–72.33
Карась	Голова + нутрощі	1.74–2.36	19.44–29.16	83.72–113.28
Карась	М'язова тканина	0.81–1.09	15.76–23.64	99.45–134.55
Щука	Голова + нутрощі	1.30–1.76	10.64–15.96	96.05–129.95
Щука	М'язова тканина	2.69–3.65	10.32–15.48	132.60–179.40

Джерело: сформовано авторами за результатами власних вимірювань.

“голова + нутрощі (внутрішні органи)” перевищують показники м'язової тканини в 1,5–2,2 рази, що узгоджується з даними попередніх досліджень про переважну акумуляцію радіоцезію у внутрішніх органах риби [16].

Карась демонстрував найнижчі концентрації ^{137}Cs серед коропа (0,95–2,05 Бк/кг), що може бути пов'язано з його еколого-фізіологічними особливостями та здатністю до детоксикації радіонуклідів.

Щука як хижий вид показала проміжні значення ^{137}Cs (1,53–3,17 Бк/кг), причому концентрації в м'язовій тканині виявились вищими, ніж у комплексі “голова + внутрішні органи”, що нетипово для більшості видів риби і потребує додаткового дослідження.

Концентрації ^{90}Sr у всіх досліджених видів риби значно перевищували фонові значення для регіону [6]. Найвищі показники зафіксовано в товстолоба (22,50–26,30 Бк/кг) та коропа (12,90–13,30 Бк/кг). Це пояснюється особливостями кальцієвого обміну в різних видів риби і селективністю накопичення ^{90}Sr у кістковій тканині [4].

Активність природного ^{40}K коливалася від 53,70 до 156,00 Бк/кг, що відповідає літературним даним для прісноводних риби регіону [6]. Найвищі концентрації ^{40}K зафіксовано в м'язовій тканині щуки (156,00 Бк/кг) та карася (117,00 Бк/кг).

Дослідження ^{40}K підтверджують його стабільну наявність у водному середовищі як природного радіонукліда, з вищими рівнями в м'язовій тканині, що відповідає фізіологічним потребам риби у калії.

Концентрації природного радіонукліда ^{40}K у донних відкладах, воді та тканинах риби не перевищують звичних для Житомирського Полісся фонових значень, що узгоджується з літературними даними.

Результати аналізу донних і берегових відкладів свідчать про стабільні рівні забруднення ^{137}Cs , що відображає довготривалу фіксацію радіонуклідів у ґрунтових шарах. Виявлені концентрації ^{90}Sr у воді є нижчими за санітарні нормативи, однак його вміст у внутрішніх органах риби потребує постійного моніторингу через потенційний ризик для споживачів. Висока біоаккумуляція ^{90}Sr порівняно з ^{137}Cs може бути пов'язана з кальцієподібними властивостями Sr і його накопиченням у кісткових тканинах.

За національним звітом щодо виконання Конвенції про безпеку поводження з радіоактивними відходами, особливу увагу рекомендовано приділяти таким джерелам забруднення у водному середовищі [20].

Порівняння отриманих результатів із гігієнічними нормативами [17; 18] показало, що концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr у м'язовій тканині риби не перевищують допустимих рівнів для продуктів харчування. Однак вміст ^{90}Sr у внутрішніх органах у низці випадків наближається до граничних значень, що потребує вилучення цих частин під час переробки.

ВИСНОВКИ

Радіонуклідне забруднення водних екосистем Житомирського Полісся у віддалений період після Чорнобильської аварії характеризується нерівномірним розподілом ^{137}Cs та ^{90}Sr між різними компонентами екосистем.

Найвищі концентрації ^{137}Cs зафіксовано в донних відкладах р. Тетерів (25,81 Бк/кг), що свідчить про його тривале депонування в донних осадах. Концентрації ^{90}Sr найвищі в берегових осадах (8,60 Бк/кг) унаслідок його вищої мобільності у водному середовищі.

Біоаккумуляція радіонуклідів у промислових видах риби характеризується видовою

специфічністю: короп'ячі демонструють найвищі концентрації ^{137}Cs (до 5,45 Бк/кг) та ^{90}Sr (до 26,30 Бк/кг), тоді як у щуки ці показники нижчі.

Концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr у м'язовій тканині досліджених видів риб не перевищують гігієнічних нормативів, однак підвищені рівні у внутрішніх органах вимагають обов'язкового вилучення внутрішніх органів із технологічного ланцюга під час переробки.

Результати підтверджують необхідність продовження радіоекологічного моніторингу водних біоресурсів регіону та розроблення за-

ходів щодо мінімізації радіоекологічних ризиків для забезпечення безпечного використання водних екосистем Житомирського Полісся. Про це неодноразово наголошувалось у звітах ДАЗВ [21].

Це узгоджується з висновками UNSCEAR щодо довгострокових ризиків впливу іонізуючого випромінювання на екосистеми [22].

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні географії моніторингових досліджень і вивченні сезонної динаміки радіонуклідного забруднення водних біоресурсів регіону.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання: Закон України від 14.01.1988 № 15/98-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. 1998. № 22, ст. 115. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 01.04.2025).
2. Положення про державну систему моніторингу довкілля: Постанова КМУ від 30.03.1998 № 391-98-п. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text> (дата звернення: 01.04.2025).
3. Дворецький А. І., Сапронова В. А., Байдак Л. І., Маренков О. М. Радіоекологія водних екосистем Придніпров'я. *Вісник ЖНАЕУ*. 2016. № 1 (55). С. 283–290. URL: https://www.researchgate.net/publication/329912973_Radioekologia_vodojm_Pridniprova_Radioecology_of_the_Pridneprovie_water_ecosystems (дата звернення: 01.04.2025).
4. Каглян О. Є., Гудков Д. І., Кіреєв С. І. та ін. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика*. 2021. Т. 22, № 1. С. 62–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.01.062>
5. Махінько Р. Г. Комплексні заходи по відновленню водойм Житомирського Полісся після Чорнобильської катастрофи. *Екологічні науки*. 2024. № 3 (54). С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7>
6. Скиба В. В. Радіоекологічний моніторинг накопичення ^{90}Sr та ^{137}Cs в організмах риб деяких водойм Лісостепу України. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2023. № 2. С. 145–154. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9289-2023-182-2-145-154>
7. Volkova O. M., Belyaev V. V., Prishlyak S. P. et al. Technogenic radionuclides in hydrobionts of the Northern Ukraine water bodies. *Hydrobiological Journal*. 2024. № 60 (2). P. 86–106. DOI: <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v60.i2.70>
8. Kong S., Yang B., Tuo F., Lu T. Advance on monitoring of radioactivity in food in China and Japan after Fukushima nuclear accident. *Radiation Medicine and Protection*. 2022. Vol. 3, iss. 1. P. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmp.2022.01.006>
9. Bezhenar R., Zheleznyak M., Kanivets V. et al. Modelling of the fate of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Chornobyl nuclear power plant cooling pond before and after the water level drawdown. *Water*. 2023. Vol. 15, iss. 8. 1504. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15081504>
10. Маренков О. М., Дворецький А. І., Білоконь Г. С. Радіонуклідне забруднення промислових видів риб Дніпровського водосховища. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.* 2010. № 2 (43). С. 338–341. URL: <https://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/30773/1/Marenkov.pdf> (дата звернення: 05.04.2025).
11. Sato H., Gusev M., Veremenko D. et al. Evaluating changes in radionuclide concentrations and groundwater levels before and after the cooling pond drawdown in the Chernobyl nuclear power plant vicinity. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 872. 161997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161997>
12. Makhinko R. Long-term consequences of the Chornobyl disaster for aquatic ecosystems: A retrospective analysis and prognosis. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2024. Vol. 15, no. 2. P. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.58>
13. Дунаєвська О. Ф., Зимарова А. А., Ішук О. В. та ін. Особливості та результати проведення радіоекологічного моніторингу для забезпечення екологічної безпеки в сучасних умовах. *Екологічні науки*. 2024. № 5 (56). С. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.40>
14. Кашпаров В. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Берковський В. Б. Зонування територій радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії. *Ядерна фізика та енергетика*. 2022. № 3. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.03.182>
15. Державні гігієнічні нормативи “Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді”: затверджено Наказом МОЗ України від 03.05.2006 № 256. *Офіційний вісник України*. 2006. № 29. С. 142, ст. 2114.
16. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи: Закон України від 27.02.1991 № 791а-ХІІ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791%D0%B0-12> (дата звернення: 05.04.2025).
17. Про затвердження Державних гігієнічних нормативів “Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді”: Наказ від 03 травня 2006 р. № 256. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0845-06#Text> (дата звернення: 05.04.2025).

18. Стратегія інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року: схвалено Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2022 р. № 323-р. *Урядовий кур'єр*. 2022. № 107.
19. Про введення в дію Державних гігієнічних нормативів “Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)”: Постанова МОЗ України від 01.12.97 № 62. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> (дата звернення: 04.04.2025).
20. On compliance with the obligations under the joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: National report. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2005. 69 p. URL: https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/Annual%20Reports/National%20Reports%20JC/JC_2005.pdf (дата звернення: 04.04.2025).
21. Про стан водних екосистем у зоні відчуження Чорнобиля: архівні матеріали. Київ: Державне агентство України з управління зоною відчуження. 2023. URL: <https://dazv.gov.ua/> (дата звернення: 01.04.2025).
22. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 report. Vol. 2. New York: United Nations Publications, 2022. URL: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210010047/read> (дата звернення: 01.04.2025).

RADIONUCLIDE CONTAMINATION OF RIVERS IN ZHYTOMYR POLISSIA: ANALYSIS OF BIOACCUMULATION IN HYDROBIONTS

Makhinko R.

Postgraduate student

Polissia National University (Zhytomyr, Ukraine)

e-mail: vse-svit@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8401-8226>

Dunaievskaya O.

Doctor of Biological Sciences, Professor

Polissia National University (Zhytomyr, Ukraine)

e-mail: oksana_fd@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-8211>

The objective of this study was to conduct a comprehensive radioecological assessment of aquatic ecosystems in Zhytomyr Polissia during the remote period following the Chornobyl Nuclear Power Plant accident, with detailed determination of radionuclide contamination levels in bottom sediments, water, and commercial fish species, as well as analysis of bioaccumulation patterns of radiocesium and radiostrontium in hydrobionts. The research was conducted in January 2025 on water bodies within the Teteriv River basin in Zhytomyr Oblast using modern radiochemical and gamma-spectrometric analytical methods. Samples of bottom sediments from depths of 0.5-1.0 m, surface layer coastal sediments (0-5 cm), and water from the Teteriv River within Zhytomyr city were collected and analyzed, along with samples of muscle tissue and the “head + internal organs” complex from four commercial fish species (silver carp, common carp, Prussian carp, northern pike) from the Zdvyzh River in Brusyliv district. Determination of specific activity of radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , and natural ^{40}K was performed in the accredited measurement laboratory of Polissia National University with measurement error not exceeding 15-20% at a confidence probability of 0.95. Significant differentiation of radionuclide concentrations between different components of the aquatic ecosystem was established. The highest concentrations of ^{137}Cs are observed in bottom sediments (25.81 Bq/kg) and coastal sediments (20.26 Bq/kg), which is 71.7 times higher than water indicators (0.36 Bq/kg). Concentrations of ^{90}Sr are characterized by the opposite pattern with maximum values in coastal sediments (8.60 Bq/kg) due to the higher mobility of this radionuclide. Among the studied fish species, the highest ^{137}Cs content was recorded in cyprinid species: carp (3.16-5.45 Bq/kg), silver carp (2.51-4.76 Bq/kg), and the lowest in pike (1.53-3.17 Bq/kg) and Prussian carp (0.95-2.05 Bq/kg). Concentrations of ^{90}Sr in fish tissues ranged from 12.90 Bq/kg in pike to 26.30 Bq/kg in silver carp, which is 2-4 times higher than background values for the region. The identified species-specific bioaccumulation of radionuclides is related to the peculiarities of feeding behavior, ecology, and physiology of the studied species. Concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr in fish muscle tissue do not exceed current hygienic standards for food products; however, elevated levels in internal organs require their mandatory removal during processing. Concentrations of the natural radionuclide ^{40}K in bottom sediments and fish tissues correspond to literature values for the region. The results demonstrate the necessity of continuing systematic radioecological monitoring of aquatic bioresources in the region and developing scientifically based measures to minimize radioecological risks to ensure safe utilization of aquatic ecosystems in Zhytomyr Polissia.

Keywords: radionuclides, aquatic ecosystems, Chornobyl accident, radioecological monitoring.

REFERENCES

1. Law of Ukraine No. 15/98-VR “On human protection against the impact of ionizing radiation”. (1998, January 14). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Text>
2. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 391-98-p “Regulation on the State Environmental Monitoring

- System". (1998, March 30). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text>
3. Dvoretzkyi, A. I., Sapronova, V. A., Baidak, L. I., & Marenkov, O. M. (2016). Radioecology of the Pridniprovia water ecosystems. *Visnyk ZhNAU*, 1(55), 283–290. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/329912973_Radioekologia_vodojm_Pridniprov'a_Radioecology_of_the_Pridniprovia_water_ecosystems
 4. Kaglyan, A. Ye., Gudkov, D. I., Kireev, S. I., Klenus, V. G., Belyaev, V. V., Yurchuk, L. P., ... Hupalo, O. O. (2021). Dynamics of specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in representatives of ichthyofauna of Chornobyl exclusion zone. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 22(1), 62–73. doi: 10.15407/jnpae2021.01.062
 5. Makhinko, R. H. (2024). Comprehensive measures for the restoration of water bodies in Zhytomyr Polissia after the Chornobyl disaster. *Ecological Sciences*, 3(54), 57–63. doi: 10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7
 6. Skyba, V. V. (2023). Radioecological monitoring of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs accumulation in fish organisms of some forest-steppe reservoirs of Ukraine. *Technology of Production and Processing of Livestock Products*, 2, 145–154. doi: 10.33245/2310-9289-2023-182-2-145-154
 7. Volkova, O. M., Belyaev, V. V., Prishlyak, S. P., Gudkov, D. I., Kaglyan, O. Ye., & Skyba, V. V. (2024). Technogenic radionuclides in hydrobionts of the Northern Ukraine water bodies. *Hydrobiological Journal*, 60(2), 86–106. doi: 10.1615/HydrobJ.v60.i2.70
 8. Kong, S., Yang, B., Tuo, F., & Lu, T. (2022). Advance on monitoring of radioactivity in food in China and Japan after Fukushima nuclear accident. *Radiation Medicine and Protection*, 3(1), 37–42. doi: 10.1016/j.radmp.2022.01.006
 9. Bezhenar, R., Zheleznyak, M., Kanivets, V., Protsak, V., Gudkov, D., Kaglyan, A., ... Nasvit, O. (2023). Modelling of the fate of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the Chornobyl nuclear power plant cooling pond before and after the water level drawdown. *Water*, 15(8), 1504. doi: 10.3390/w15081504
 10. Marenkov, O. M., Dvoretzkyi, A. I., & Bilokon, H. S. (2010). Radionuclides contamination of industrial types of fishes of Dnieper reservoir. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, 2(43), 338–341. Retrieved from <http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/30773/1/Marenkov.pdf>
 11. Sato, H., Gusyev, M., Veremenko, D., Laptev, G., Shibasaki, N., Onda, Y., ... Nanba, K. (2023). Evaluating changes in radionuclide concentrations and groundwater levels before and after the cooling pond drawdown in the Chernobyl nuclear power plant vicinity. *Science of The Total Environment*, 872, 161997. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161997
 12. Makhinko, R. (2024). Long-term consequences of the Chornobyl disaster for aquatic ecosystems: A retrospective analysis and prognosis. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 15(2), 58–67. doi: 10.69628/esbur/2.2024.58
 13. Dunaievska, O. F., Zymarioieva, A. A., Ishchuk, O. V., Sokulskyi, I. M., & Pitsil, A. O. (2024). Environmental problems of agriculture under martial law conditions. *Ecological Sciences*, 1(52), 22–27. doi: 10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.40
 14. Kashparov, V. O., Holiaka, D. M., Levchuk, S. Ye., & Berkovskyi, V. B. (2022). Zoning of radioactive contamination territories after the Chornobyl accident. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 3. doi: 10.15407/jnpae2022.03.182
 15. Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 256 "On the approval of the State hygienic regulations 'Permissible levels of radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in food products and drinking water'". (2006, May). *Official Bulletin of Ukraine*, 29, 142, Art. 2114.
 16. Law of Ukraine No. 791a-XII "On the legal regime of the territory exposed to radioactive contamination as a result of the Chornobyl disaster". (1991, February). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791a-12>
 17. Order of Ministry of Health of Ukraine No. 256 "On the approval of the state hygienic regulations 'Permissible levels of radionuclides Cs-137 and Sr-90 in food and drinking water'" (2006, May). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0845-06#Text>
 18. Strategy of the integrated automated radiation monitoring system for the period until 2024". (2022, April). *Uriadovi Kurier*, 107.
 19. Resolution of the Ministry of Health of Ukraine No. 62 "On the enforcement of the State Hygienic Standards "Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97)". (1997, December). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>
 20. State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine. (2005). On compliance with the obligations under the joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: National report. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine. Retrieved from https://snrii.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/Annual%20Reports/National%20Reports%20JC/JC_2005.pdf
 21. State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management. (2023). Archival materials on the state of aquatic ecosystems in the Chornobyl exclusion zone. Kyiv: State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management. Retrieved from <https://dazv.gov.ua/>
 22. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2022). Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2020/2021 report (Vol. 2). New York, NY: United Nations Publications. Retrieved from <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210010047/read>

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

МАХІНЬКО Роман Григорович — аспірант, Поліський національний університет (Старий бульвар, 7, Житомир, Житомирська область, Україна, 10002; e-mail: vse-svit@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8401-8226>).

ДУНАЄВСЬКА Оксана Феліксівна — доктор біологічних наук, професор, Поліський національний університет (Старий бульвар, 7, Житомир, Житомирська область, Україна, 10002; e-mail: oksana_fd@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-8211>).