

ЕКОЛОГІЯ

УДК 504.064.3

Моделювання динаміки накопичення радіонуклідів у прісноводних видах риб у поставарійний період після аварії на Чорнобильській АЕС**Волкова О.М.** , **Скиба В.В.** , **Розпутній О.І.** ,
Перцьовий І.І. , **Герасименко В.Ю.** , **Бабань В.П.** *Білоцерківський національний аграрний університет*

E-mail: Волкова О.М. volkovaen@gmail.com; Розпутній О.І. bezpeku@ukr.net; Перцьовий І.І. pertsowy@ukr.net; Герасименко В.Ю. vgu160183@gmail.com; Бабань В.П. viktoriya_baban@ukr.net;



Волкова О.М., Скиба В.В., Розпутній О.І., Перцьовий І.І., Герасименко В.Ю., Бабань В.П. Моделювання динаміки накопичення радіонуклідів у прісноводних видах риб у поставарійний період після аварії на Чорнобильській АЕС. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2025. № 1. С. 103–114.

Volkova O., Skyba V., Rozputnyi O., Pertskovyi I., Herasymenko V., Baban V. Modeling the Dynamics of Radionuclide Accumulation in Freshwater Fish Species in the Post-Accident Period Following the Chornobyl NPP Disaster. «Animal Husbandry Products Production and Processing», 2025. № 1. PP. 103–114.

Рукопис отримано: 01.04.2025 р.

Прийнято: 15.04.2025 р.

Затверджено до друку: 22.05.2025 р.

doi: 10.33245/2310-9289-2025-194-1-103-114

У статті висвітлено результати дослідження динаміки накопичення радіонуклідів у прісноводних видів риб у поставарійний період після аварії на Чорнобильській АЕС. Дослідження базується на використанні математичного моделювання процесів біоаккумуляції радіонуклідів у водних екосистемах, що зазнали значного радіоактивного забруднення. Визначено ключові закономірності надходження, розподілу та перерозподілу штучних радіонуклідів, зокрема ^{137}Cs і ^{90}Sr у трофічних ланцюгах водних біоценозів.

Проаналізовано основні фактори, що впливають на рівень накопичення радіонуклідів у гідробіонтах, серед яких видова специфіка, особливості метаболізму, вікова диференціація риб, умови живлення, а також гідрохімічні та гідрологічні характеристики водойм. Особливу увагу приділено визначенню динамічних змін концентрацій ^{137}Cs та ^{90}Sr у рибній продукції залежно від часу після аварії, з урахуванням процесів радіоактивного розпаду, розбавлення радіонуклідів у водному середовищі та міграційних особливостей риб.

Результати дослідження мають важливе значення для оцінювання довгострокових екологічних ризиків, пов'язаних зі збереженням підвищеного рівня радіоактивного забруднення у водних екосистемах Чорнобильської зони відчуження та прилеглих територій. Запропоновані підходи до математичного моделювання можуть бути використані для прогнозування наслідків радіоактивного забруднення водойм та розроблення стратегії екологічного моніторингу й відновлення забруднених водних ресурсів.

Ключові слова: радіонукліди, прісноводні риби, математичне моделювання, біоаккумуляція, радіоекологія, водні екосистеми, екологічний моніторинг, екологічна безпека.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Аварія на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) у 1986 році спричинила масштабне радіонуклідне забруднення довкілля, що охопило як наземні, так і водні екосистеми. Водойми північних областей України, зокрема басейн річки Прип'ять, Київське та інші Дніпровські водосховища зазнали особливо значного впливу. Радіоактивні речовини, такі як цезій та стронцій, мігрували у водне середовище, інтенсивно включаючись у трофічні ланцюги. Це зумовило необхідність проведення комплексного екологічного аудиту для оцінювання, рівня забруднення та виявлення довгострокових наслідків для іхтіофауни та інших гідробіонтів.

Протягом перших 10–15 років після аварії здійснювалися широкомасштабні дослідження водойм зони відчуження та Дніпровських водосховищ, що включали оцінювання динаміки накопичення радіонуклідів у представників іхтіофауни [4, 8, 14, 15, 16]. Було проведено значний обсяг роботи з аналізу закономірностей біоаккумуляції радіонуклідів, особливостей їх міграції та впливу на водні біоценози [1, 2, 3, 5, 8, 13, 16].

Однак, починаючи з середини 1990-х років, систематичний комплексний радіоекологічний моніторинг Дніпровських водосховищ було значно скорочено або майже припинено. Наявні сучасні дослідження закономірностей формування радіонуклідного забруднення водних організмів здебільшого зосереджені лише на території зони відчуження. Окремі наукові публікації останніх 10–15 років містять дані про рівні накопичення радіонуклідів чорнобильського походження у гідробіонтах Київського та Дніпровського водосховищ. Однак більшість водойм України, зокрема розташованих у зонах обов'язкового та гарантованого добровільного відселення, залишаються недостатньо вивченими, а їх радіоекологічний стан досліджується лише епізодично [6, 9, 10, 15, 19].

З огляду на це однією з ключових екологічних проблем залишається визначення багаторічної динаміки вмісту штучних радіонуклідів у водних організмах. Особливої уваги потребують вищі водні рослини та представники іхтіофауни з різними типами живлення, оскільки вони є біоіндикаторами стану водного середовища. Дослідження цих параметрів дозволить не лише ретроспективно оцінити рівень радіонуклідного забруднення водойм, де моніторинг проводився нерегулярно, а й спрогнозувати подальшу динаміку поширення радіонуклідів у випадку нових аварійних ситуацій.

Мета дослідження. Встановити багаторічні закономірності накопичення штучних радіонуклідів у представників іхтіофауни з різними типами живлення та оцінити сучасний екологічний стан водних екосистем для забезпечення екологічної безпеки.

У цьому контексті важливою науковою задачею є продовження системного радіоекологічного моніторингу водойм, особливо тих, де перші дослідження проводилися лише під час гострої фази аварії. Крім того, необхідно розширити контроль над акваторіями гідро-екосистем, у яких у минулому реєстрували підвищені рівні радіонуклідів у гідробіонтах. Комплексні дослідження дадуть змогу поглибити розуміння закономірностей накопичення радіонуклідів у біоті, покращити оцінювання екологічних наслідків Чорнобильської катастрофи та сприяти розробленню ефективних природоохоронних технологій для забезпечення екологічної безпеки водних екосистем.

Матеріал і методи дослідження. Моніторинг радіоактивного забруднення водних біоресурсів базувався на використанні сучасних методів радіометричного аналізу, включаючи спектрометрію гамма-випромінювання. Для оцінювання змін питомої активності ^{137}Cs у рибах застосовано статистичні моделі та розраховано періоди напівзменшення концентрації радіонукліду у біоті.

Для аналізу вибрано основні трофічні групи риб – мирні (планктофаги та бентофаги) і хижі види. До групи мирних риб включено верховодку (*Alburnus alburnus*), синця (*Ballerus ballerus*), йоржа (*Gymnocephalus cernuus*), карася сріблястого (*Carassius gibelio*), линя (*Tinca tinca*), ляща (*Abramis brama*), плітку (*Rutilus rutilus*) та плоскирку (*Blicca bjoerkna*). У складі хижих риб досліджували окуня річкового (*Perca fluviatilis*), судака (*Sander lucioperca*), щуку (*Esox lucius*), білизну (*Aspius aspius*), сома (*Silurus glanis*) та головня (*Squalius cephalus*).

Для моделювання процесів обміну радіонуклідів між організмом і середовищем у водній радіоекології використовують камерні моделі, що описують організм як систему взаємопов'язаних камер, які знаходяться у динамічній взаємодії з водним середовищем. Однокамерні моделі є базовими і дають змогу описати загальні закономірності надходження та виведення радіонуклідів [3, 8].

Загальноприйнятий підхід до математичного опису радіоекологічних процесів у водному середовищі базується на використанні нелінійних моделей, які враховують трофічні та конкурентні взаємодії між різними видами. Висока точність моделей вимагає збільшення

кількості камер, що ускладнює розрахунки через зростання числа необхідних вхідних параметрів, зокрема швидкостей переходу радіонуклідів між камерами [13, 17].

Для оцінювання швидкості зменшення активності організмів у природних умовах доцільно використовувати величину періоду екологічного напівзменшення, яка враховує як процеси біологічного виведення, так і надходження радіонукліда. У лабораторних експериментах частіше застосовується період біологічного напіввиведення, який описує лише процеси виведення елементу з організму [2, 16, 17].

Результати дослідження та обговорення. З метою оцінювання довготривалих наслідків радіоактивного забруднення водних екосистем та визначення ключових параметрів моделей динаміки накопичення ^{137}Cs в організмах гідробіонтів було проведено комплексне дослідження іхтіофауни Київського водосховища. У межах дослідження охоплено представників різних трофічних рівнів, що дало змогу встановити закономірності трофічного перенесення радіонукліду та оцінити його біоаккумуляційний потенціал.

Моніторинг радіоактивного забруднення водних біоресурсів базувався на використанні сучасних методів радіометричного аналізу, включаючи спектрометрію гамма-випромінювання. Для оцінювання змін питомої активності ^{137}Cs у рибах застосовано статистичні моделі та розраховано періоди напівзменшення концентрації радіонукліду у біоті.

Наукові джерела містять значний масив даних щодо рівнів радіоактивного забруднення іхтіофауни Київського водосховища, що охоплюють період із 1986 по 2014 рр. [3, 5, 8, 17]. Узагальнення цих матеріалів у поєднанні з новими емпіричними даними дало змогу встановити основні тенденції у довготривалій динаміці вмісту ^{137}Cs у популяціях риб Київського водосховища після Чорнобильської катастрофи.

Розрахунки показали, що в період 1986–2021 рр. темпи зниження питомої активності ^{137}Cs у мирних рибах відповідали періоду напівзменшення $6,4 \pm 0,9$ року за коефіцієнту детермінації $R^2 = 0,68$. Однак детальніший аналіз продемонстрував суттєві коливання цього показника за різних часових проміжків. Результати подальших розрахунків наведено на рисунку 1.

Аналізуючи дані рисунку 1, стає очевидним, що у перші п'ять років після аварії (1986–1991 рр.) спостерігалось швидке зниження рівня ^{137}Cs , що відповідало періоду напівзменшення $1,9 \pm 0,6$ року ($R^2 = 0,71$). У наступне десятиліття (1991–2001 рр.) швидкість виведення радіонукліду з іхтіофауни уповільнилася, і період напівзменшення становив $4,6 \pm 0,7$ року ($R^2 = 0,84$). У подальший період (2001–2020 рр.) процеси очищення біоти від радіонукліду ще більше сповільнилися, що призвело до зростання періоду, напівзменшення до 16 ± 3 років ($R^2 = 0,74$).

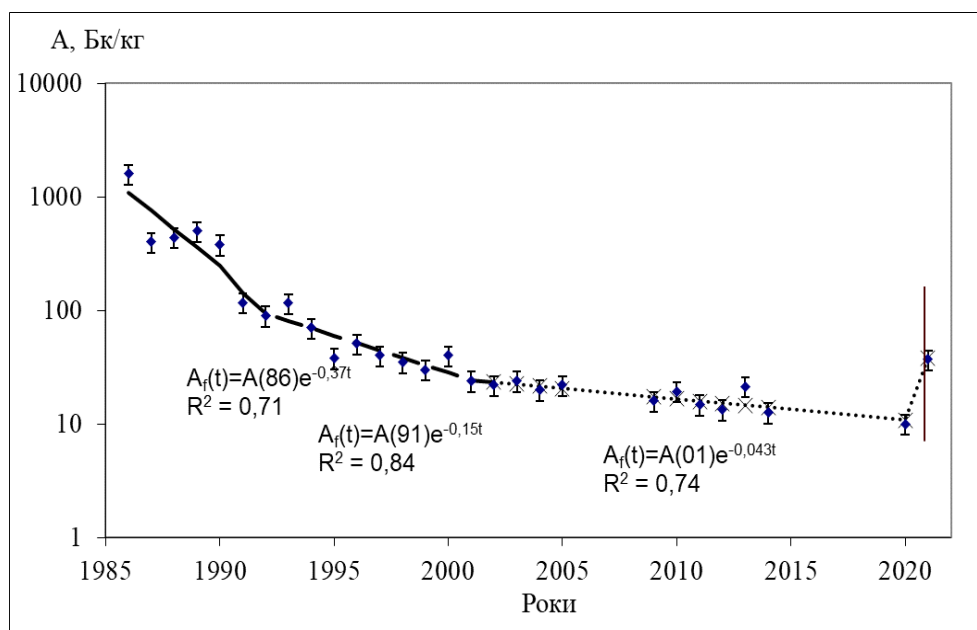


Рис. 1. Динаміка вмісту ^{137}Cs у мирних видах риб Київського водосховища (1986–2014 рр. за даними [Волкова, 1990; 2008, Рябов, 2004]).

Зниження рівня ^{137}Cs у водних біоресурсах є важливим критерієм екологічної безпеки та ефективності природоохоронних заходів, спрямованих на реабілітацію радіаційно забруднених екосистем. Отримані результати мають суттєве значення для оцінювання екологічного ризику, оскільки накопичення радіонуклідів у трофічних ланцюгах може призводити до вторинного забруднення водних організмів та потенційно загрожувати здоров'ю населення через споживання риби.

Визначення періоду екологічного напівзменшення питомої активності ^{137}Cs у рибях Київського водосховища уможливило оцінювання довготривалих перспектив природного самоочищення водою та обґрунтування необхідності подальших природоохоронних заходів. Результати цього дослідження можуть бути використані для екологічного аудиту та розроблення стратегії моніторингу радіоактивного забруднення водних екосистем.

Аналіз динаміки вмісту ^{137}Cs в іхтіофауні Київського водосховища протягом 35 років після Чорнобильської катастрофи продемонстрував поступове уповільнення процесів виведення радіонукліду з біоти. Найбільш інтенсивне зниження рівня радіоактивності відбулося у перші п'ять років після аварії, тоді як у подальші десятиліття темпи природного очищення сповільнилися.

Отримані результати свідчать про суттєві зміни в динаміці радіоактивного забруднення іхтіофауни Київського водосховища, що зумовлено низкою природних та антропогенних чинників та підкреслює необхідність продовження екологічного моніторингу, застосування ефективних природоохоронних технологій для забезпечення екологічної безпеки водних екосистем.

Серед основних факторів, які впливають на цей процес, можна виокремити природний радіоактивний розпад цезію-137, що відбувається відповідно до фізичних законів із періодом напіврозпаду до 30 років, зміни у трофічних взаємозв'язках гідробіонтів, зокрема перерозподіл біомаси різних груп риб, що впливає на інтенсивність біоаккумуляції радіонуклідів, фізико-хімічні процеси у водному середовищі як-от адсорбція та десорбція радіоізотопів на завислих частках, вплив органічних і неорганічних домішок а також вторинне забруднення внаслідок ремобілізації донних відкладень, яке може бути пов'язане з гідрологічними змінами, ерозійними процесами та техногенними факторами.

Аналіз даних 2021 року виявив несподіване зростання питомої активності цезію-137 у представників мирних риб Київського водосховища, що спричинило суттєве уповільнення темпів його виведення. Це явище може бути пояснено локальними змінами екологічного балансу водосховища або підвищеним вмістом радіоактивних частинок у донних осадах, які потрапили до трофічних ланцюгів. Статистичний аналіз показав, що в період 2001–2021 років величина швидкості зменшення питомої активності цезію-137 у мирних рибях статистично не відрізняється від нуля, що унеможливило коректне визначення періоду напівзменшення, оскільки він є обернено пропорційним до швидкості виведення радіонукліду. Додатковим підтвердженням цього явища є схожі тенденції щодо вмісту цезію-137 у вищих водних рослинах Київського водосховища у 2021 році, що може свідчити про посилення механізмів повторного забруднення за рахунок біогеохімічних процесів.

Параметри математичної моделі для хижих видів риб визначалися, починаючи з 1988 року. Дворічна затримка порівняно з моментом аварії на Чорнобильській АЕС пояснюється накопиченням цезію-137 у нижчих ланках трофічного ланцюга та подальшою передачею його хижим видам через харчові зв'язки. Згідно з попередніми дослідженнями, у травні 1986 року питома активність цезію-137 у хижих рибях Київського водосховища мала тенденцію до зростання та досягла максимальних значень лише у 1988 році. У період 1988–2021 років загальна швидкість зменшення питомої активності цезію-137 у хижих рибях відповідала періоду напівзменшення $5,3 \pm 0,3$ року, що супроводжувалося високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,94$. Проте, як і у випадку з мирними рибами, динаміка забруднення демонструвала значні міжперіодні коливання (рис.2).

Так, у 1988–1993 роках спостерігалось інтенсивне зменшення питомої активності, що відповідало періоду напівзменшення $3,4 \pm 0,6$ року при $R^2 = 0,89$, у 1993–2002 роках цей період становив $4,3 \pm 1,0$ року при $R^2 = 0,71$, а в 2002–2021 роках – $8,0 \pm 0,6$ року при $R^2 = 0,92$. Ці результати свідчать про зростання тривалості циркуляції радіонуклідів у водних екосистемах, що потребує додаткового моніторингу та екологічного аудиту для прогнозування довготривалих наслідків радіоактивного забруднення іхтіофауни.

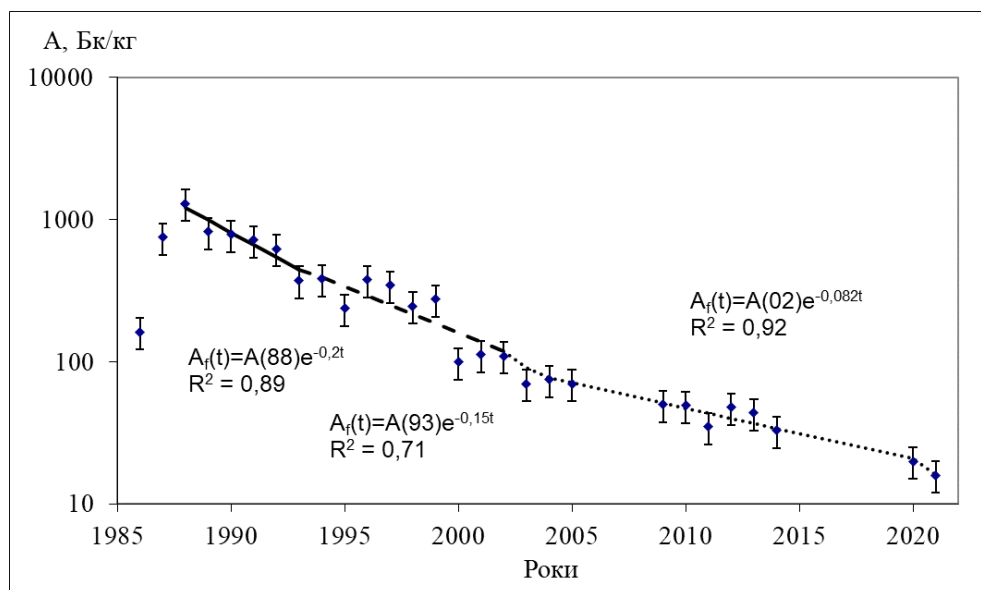


Рис. 2. Динаміка вмісту ^{137}Cs у хижих видів риби Київського водосховища.

Отримані дані підтверджують, що процеси виведення цезію-137 з водних екосистем Київського водосховища є складними та залежать не лише від фізичних характеристик самого радіонукліду, а й від гідробіологічних, трофічних і гідрохімічних змін. З метою забезпечення екологічної безпеки та мінімізації ризиків вторинного забруднення необхідно розширити моніторинг радіоактивного забруднення водних екосистем, зокрема за рахунок залучення сучасних методів спектрометрії та дистанційного аналізу, проводити екологічний аудит стану донних відкладень, які можуть бути джерелом ремобілізації цезію-137 у водну товщу, застосовувати природоохоронні технології для зниження рівня радіоактивного навантаження, наприклад біоремедіацію із залученням водних макрофітів та сорбентних матеріалів, а також розробити програму екологічного управління, що враховуватиме довготривалі радіоекологічні ризики для іхтіофауни та людини. Загалом результати дослідження є важливими для оцінювання впливу радіоактивного забруднення на водні екосистеми та можуть слугувати основою для прийняття природоохоронних рішень щодо управління водними біоресурсами та підтримання екологічної стабільності Київського водосховища.

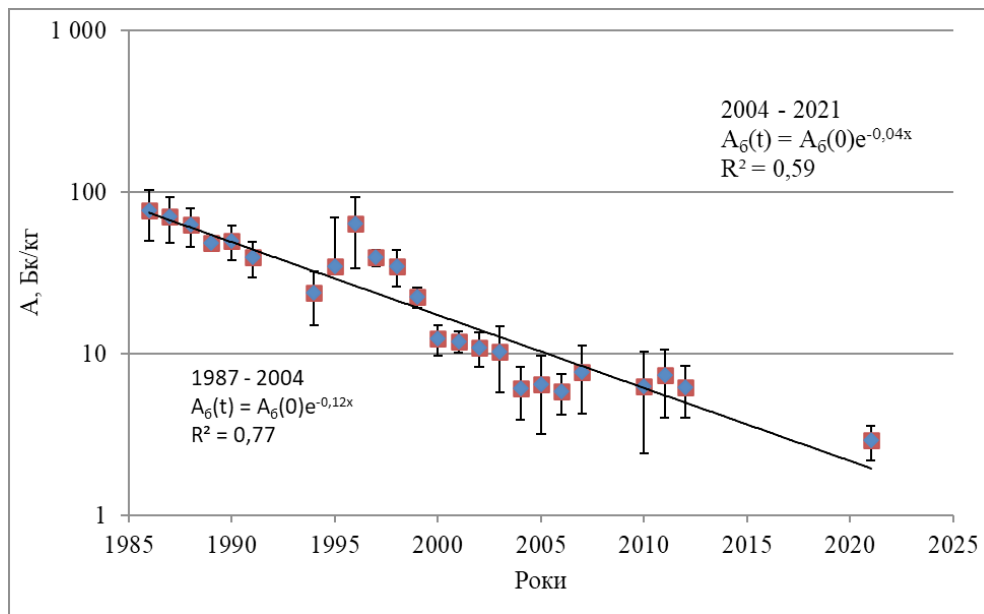
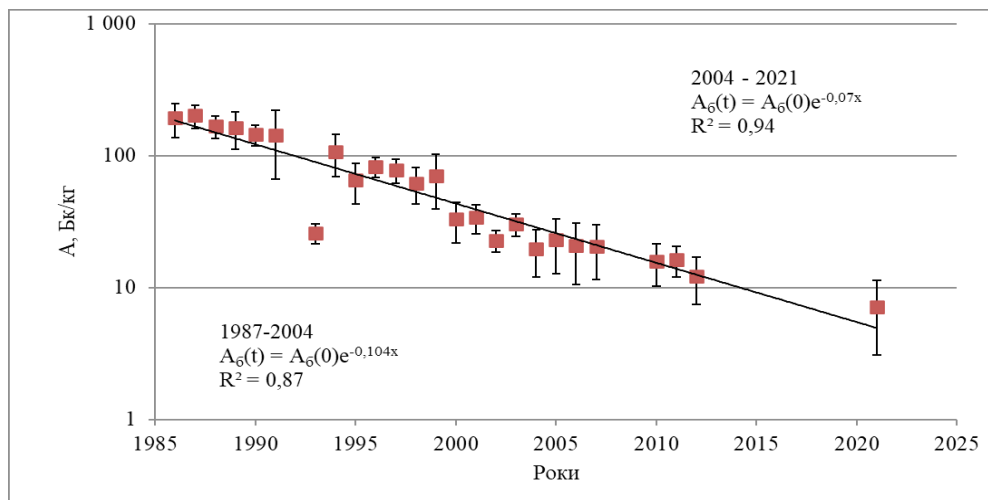
За 35 років після аварії на Чорнобильській АЕС динаміка зменшення питомої активності цезію-137 у мирних і хижих рибах Київського водосховища не виявила статистично

значущих відмінностей. Як для мирних, так і для хижих риби спостерігалися три періоди, що характеризуються різними темпами елімінації радіонукліда з організму [2].

Для дослідження закономірностей накопичення та виведення радіонуклідів у промислових видах іхтіофауни Канівського водосховища було проведено аналіз багаторічних спостережень та даних моніторингу. Використано результати попередніх досліджень щодо динаміки радіоактивного забруднення рибних популяцій [3], а також власні дані, отримані впродовж 2011–2021 років.

За період 1987–2021 років швидкість зменшення питомої активності цезію-137 у мирних і хижих рибах Канівського водосховища залишалася відносно стабільною та відповідала періоду напівзменшення $6,7 \pm 0,5$ року з високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,87$. Аналіз довготривалої динаміки дав змогу виокремити два основні періоди з різними швидкостями зниження рівня радіоактивного забруднення (рис. 3, 4) [6, 17].

У 1987–2004 роках спостерігалася інтенсивне зменшення вмісту цезію-137 у мирних рибах – з 70 ± 22 до $6,1 \pm 2,2$ Бк/кг, а у хижих – з 202 ± 41 до $19,8 \pm 7,6$ Бк/кг. Це свідчить про зниження радіоактивного навантаження приблизно в 10–11 разів. Відповідно, періоди напівзменшення радіонукліда становили $5,7 \pm 0,8$ року ($R^2 = 0,77$) для мирних риби та $5,6 \pm 0,8$ року ($R^2 = 0,75$) для хижих.

Рис. 3. Динаміка вмісту ^{137}Cs у «мирних» видів риб Канівського водосховища.Рис. 4. Динаміка вмісту ^{137}Cs у хижих видів риб Канівського водосховища.

Проте у 2004–2021 роках темпи зменшення радіоактивного забруднення істотно сповільнилися: рівні вмісту цезію-137 у мирних рибах знизилися до $2,9 \pm 0,7$ Бк/кг, а у хижих – до $7,3 \pm 4,1$ Бк/кг, що відповідає подальшому зменшенню радіоактивного забруднення лише в 2–3 рази. У цей період розраховані значення напівзменшення значно зросли: 16 ± 6 років ($R^2 = 0,59$) для мирних риб та $10,3 \pm 1,1$ року ($R^2 = 0,94$) для хижих. Ці дані вказують на можливий вплив вторинного радіонуклідного забруднення внаслідок ремобі-

лізації донних відкладень, змін у трофічних ланцюгах та особливостей раціону риб.

Для оцінювання динаміки накопичення та виведення радіонуклідів у рибах Повчанського водосховища також були використані результати попередніх досліджень, що охоплюють період 1995–2014 років [3], а також дані власних досліджень, отримані у 2021 році. Виявлені закономірності вказують на необхідність розширення екологічного моніторингу водойм, зокрема оцінювання потенційного впливу забруднених донних відкладень

та біогеохімічних процесів на повторне надходження радіонуклідів у водну товщу.

Отримані результати мають важливе значення для оцінювання довготривалих наслідків радіоактивного забруднення іхтіофауни. Вони підкреслюють необхідність проведення регулярного екологічного аудиту та впровадження природоохоронних технологій, спрямованих на зменшення впливу радіоактивного навантаження на водні екосистеми. Подальші дослідження повинні враховувати сучасні методи радіоекологічного моніторингу та спектрометрії, що дадуть змогу точніше прогнозувати динаміку міграції радіонуклідів у водоймах та їхній вплив на біорізноманіття.

За результатами проведених розрахунків, швидкість зменшення питомої активності цезію-137 у мирних та хижих рибах Повчанського водосховища за період 1995–2021 років виявилася статистично незначущою, що вказує на відсутність вираженої тенденції до елімінації радіонукліда з їхніх організмів (рис. 5, 6).

Це може свідчити про стабільне надходження радіонуклідів у трофічні ланцюги водойми, ймовірно, внаслідок процесів ремобілізації радіоактивних часток з донних відкладень або перерозподілу цезію-137 між біотичними і абіотичними компонентами екосистеми.

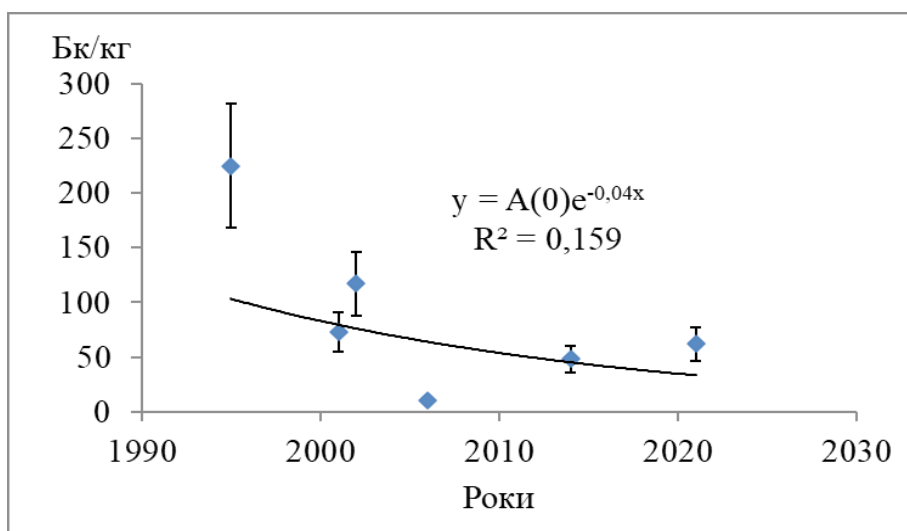


Рис. 5. Динаміка вмісту ^{137}Cs у мирних видах риб Повчанського водосховища.

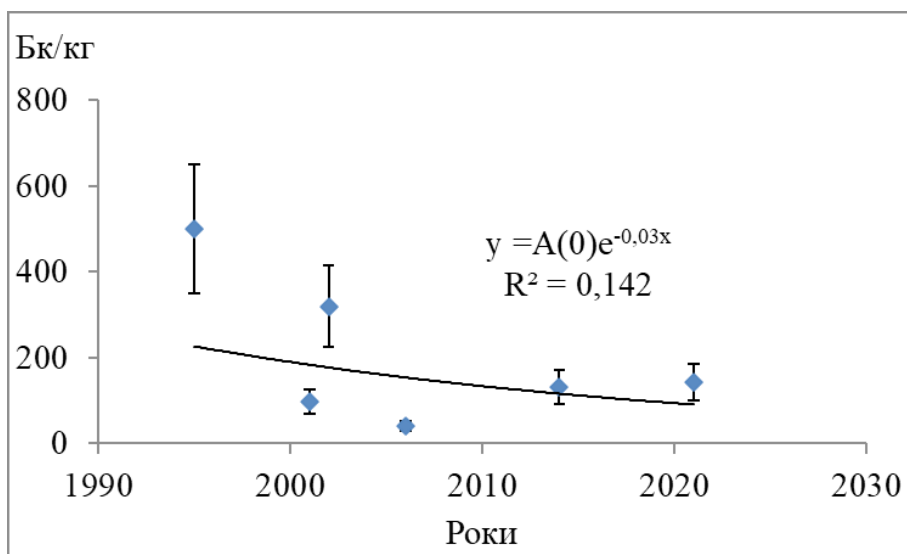


Рис. 6. Динаміка вмісту ^{137}Cs у хижих видах риб Повчанського водосховища.

Водночас, за даними попередніх досліджень [3], у період 1995–2006 років у рибах Повчанського водосховища спостерігалася інтенсивніша динаміка зменшення рівнів радіоактивного забруднення: розрахований період напівзменшення питомої активності цезію-137 становив приблизно три роки як для мирних, так і хижих видів. Це свідчить про наявність у той час активних процесів виведення радіонукліда з біологічних систем, можливо, внаслідок природного розпаду, процесів біологічної депурації та зниження його надходження з водного середовища.

Виявлені розбіжності між різними періодами підкреслюють необхідність подальшого екологічного моніторингу водойми, включно з оцінюванням сучасних механізмів розподілу та міграції радіонуклідів у гідроекосистемах. Це має важливе значення для забезпечення екологічної безпеки та розробленням природоохоронних технологій, спрямованих на мінімізацію вторинного радіоактивного забруднення.

Таким чином встановлено, що у рибах Повчанського водосховища, як і в представників іхтіофауни Київського та Канівського водосховищ, спостерігається тенденція до збільшення періодів напівзменшення питомої активності цезію-137. Це може бути пов'язано зі зниженням ефективності процесів елімінації радіонукліда з біологічних систем, що, своєю чергою, обумовлено змінами в умовах функціонування гідроекосистем, включно з трофічними взаємозв'язками, фізико-хімічними характеристиками води та рівнем вторинного забруднення.

Аналіз багаторічної динаміки накопичення цезію-137 у рибах озера Біле базується на даних літературних джерел за період 1998–2014 років [8, 12] та результатах власних досліджень, проведених у 2021 році.

Протягом 1998–2021 років швидкість зменшення питомої активності цезію-137 у мирних рибах озера Біле відповідала періоду напівзменшення $9,4 \pm 1,5$ року ($R^2=0,93$) (рис. 7), тоді як у хижих рибах цей показник становив $19,0 \pm 4,0$ року ($R^2=0,89$) (рис. 8).

Отримані дані свідчать, що процес біологічного очищення від радіонуклідів в організмах мирних риб відбувався приблизно вдвічі швидше, ніж у хижих. Це може бути пов'язано з особливостями їх живлення та швидкістю обміну речовин: мирні риби споживають переважно рослинну та детритну їжу, тоді як хижі накопичують радіонукліди через ланцюги біомагніфікації.

Виявлені закономірності наголошують на необхідності продовження екологічного моніторингу водних екосистем із використанням сучасних методів екологічного аудиту та природоохоронних технологій, що дасть змогу оцінити довгострокові наслідки радіоактивного забруднення і розробити ефективні заходи для забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів.

На основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що за останні десятиліття, аналогічно до вищих водних рослин, спостерігається уповільнення темпів зменшення питомої активності цезію-137 в організмах представників іхтіофауни досліджуваних водойм.

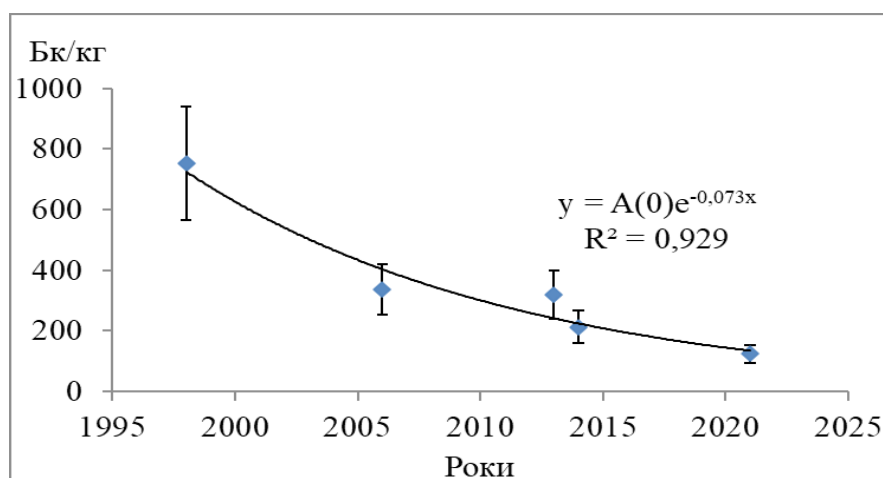


Рис. 7. Динаміка вмісту ^{137}Cs у мирних видах риб оз. Біле.

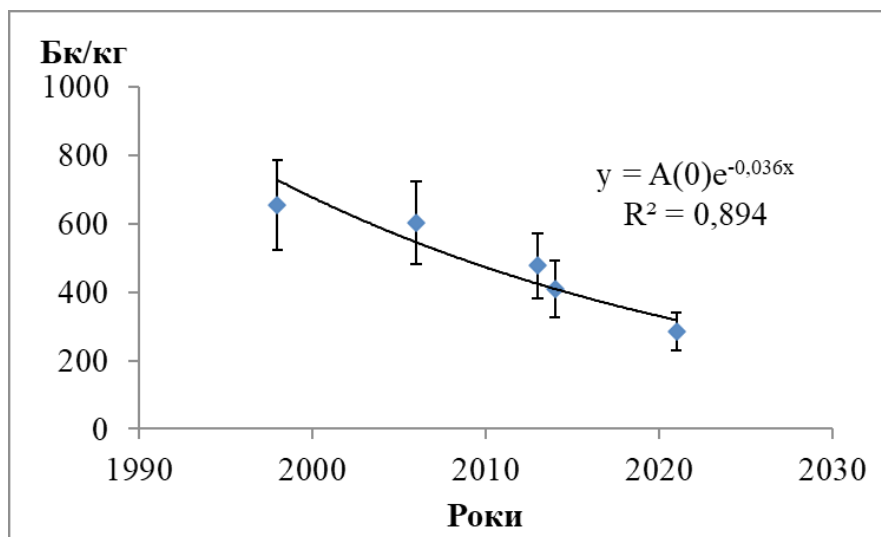


Рис. 8. Динаміка вмісту ^{137}Cs у хижих видів риби оз. Біле.

Зокрема, період напівзменшення питомої активності ^{137}Cs у мирних рибах Київського та Канівського водосховищ становив 16 років, тоді як у хижих рибах цей період коливався від 8 до 10 років. Протягом періоду з 2001 до 2021 року виявлено, що вміст ^{137}Cs у рибах Повчанського водосховища не зазнав суттєвого зменшення, що свідчить про стабільність рівня забруднення у цій екосистемі.

Швидкість зменшення вмісту ^{137}Cs у мирних і хижих рибах озера Білого відповідала періодам напівзменшення, які становили 9,4 та 19 років відповідно, що може свідчити про різні механізми накопичення та виведення радіонуклідів у різних групах риби, що потребує подальшого моніторингу та аналізу в контексті екологічного аудиту водних екосистем (табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри моделі динаміки ^{137}Cs у рибах, $T_{1/2}$ – період напівзменшення

Водойма	Групи риби	Період досліджень, роки	Параметри моделі	
			$T_{1/2}$, роки	R^2
Київське водосховище	Мирні	1986–2021	$6,4 \pm 0,9$	0,68
	Мирні	1986–1991	$1,9 \pm 0,6$	0,71
	Мирні	1991–2001	$4,6 \pm 0,7$	0,84
	Мирні	2001–2021	16 ± 3	0,74
	Хижі	1988–2021	$5,3 \pm 0,3$	0,94
	Хижі	1988–1993	$3,4 \pm 0,6$	0,89
	Хижі	1993–2002	$4,3 \pm 1,0$	0,71
Канівське водосховище	Хижі	2002–2021	$8,0 \pm 0,6$	0,92
	Мирні	1987–2021	$6,7 \pm 0,5$	0,87
	Мирні	1987–2004	$5,7 \pm 0,8$	0,77
	Мирні	2001–2021	16 ± 6	0,59
	Хижі	1987–2021	$6,7 \pm 0,5$	0,87
	Хижі	1987–2004	$5,6 \pm 0,8$	0,75
Повчанське водосховище	Хижі	2001–2021	$10,3 \pm 1,1$	0,94
	Мирні	1995–2006	~ 3	-
	Мирні	1995–2021	16 ± 18	0,16
	Хижі	1995–2006	~ 3	-
Озеро Біле	Хижі	1995–2021	20 ± 24	0,14
	Мирні	1998–2021	$9,4 \pm 1,5$	0,93
	Хижі	1998–2021	$19,0 \pm 4,0$	0,89

Ці результати підкреслюють важливість врахування процесів радіоактивного забруднення за оцінювання екологічної безпеки водних об'єктів. Для забезпечення належного контролю за станом навколишнього середовища важливо впроваджувати ефективні природоохоронні технології та використовувати спеціалізоване обладнання для моніторингу рівня радіації у водоймах, що дозволить забезпечити сталий розвиток екосистем і мінімізувати екологічні ризики.

Слід зазначити, що періоди напівзменшення радіонуклідів у мирних рибах Київського та Канівського водосховищ виявилися довшими порівняно з хижими рибами, що може свідчити про відмінності в метаболізмі та механізмах накопичення радіоактивних речовин у різних групах риби. Водночас для озера Білого було зафіксовано зворотну тенденцію, де хижі риби демонстрували довший період напівзменшення, що потребує подальших досліджень з огляду на специфіку екологічних умов цього водного об'єкта.

Висновки. Дослідження підтверджує, що після аварії на Чорнобильській АЕС накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr у прісноводних рибах відбувалося нерівномірно, залежно від біологічних особливостей видів та типу водойми. Установлено, що різні види риби мають різні рівні накопичення радіонуклідів, що зумовлено їхньою екологією, раціоном живлення та положенням у трофічному ланцюгу.

Вміст радіонуклідів у промислових видах риби залежить від радіоекологічного стану водойм, що включає рівень забруднення донних відкладень, біохімічні параметри води та біотичні взаємодії між гідробіонтами. Спостерігається поступове зниження рівня накопичення радіонуклідів у рибах через радіоактивний розпад ^{137}Cs , природні процеси самоочищення водойм та міграцію радіонуклідів у менш доступні для біоаккумуляції фракції донних відкладень. Визначено, що рівень радіоактивного забруднення деяких видів риби може перевищувати допустимі норми харчової безпеки, що потребує контролю та обмеження вилову в окремих водоймах. Результати дослідження вказують на необхідність довготривалого моніторингу радіоактивного забруднення водойм, вдосконалення моделей прогнозування та розробки екологічних заходів для мінімізації впливу радіонуклідів на водні екосистеми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: Національна доповідь України. К.: КІМ, 2011. 356 с.
2. Реконструкція поглиненої дози опромінення риби оз. Глибокого впродовж ранньої фази аварії на Чорнобильській АЕС / В.В. Беляєв та ін. Гідробіологічний журнал. 2021. № 57 (2). С. 96–106.
3. Беляєв В.В., Волкова О.М., Пришляк С.П. Моделювання динаміки формування радіоактивності водних рослин. Ядерна енергетика та довкілля. 2015. № 1 (5). С. 44–49.
4. Волкова О.М. Техногенні радіонукліди у гідробіонтах водойм різного типу: дис. ... д-ра біол. наук: 03.00.17. К., 2008. 348 с.
5. Техногенні радіонукліди у гідробіонтах водойм півночі України / О.М. Волкова та ін. Гідробіологічний журнал. 2023. Т. 59 (6). С. 100–119.
6. Димань Т.М., Гриневич Н.Є., Мазур Т.Г. Безпека харчових гідробіонтів. «Альма-матер». Київ: ВЦ «Академія», 2022. 256 с.
7. Питома активність ^{137}Cs у риби України. Сучасний стан / О.Л. Зарубін та ін. Ядерна фізика та енергетика. 2013. Т. 14. № 2. С. 177–182.
8. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження / О.Є. Каглян та ін. Ядерна фізика та енергетика. 2021. Вип. 22 (1). Р. 62–73.
9. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження / О.Є. Каглян та ін. Радіобіологія та радіоекологія. 2021. Т. 22. Вип. 1. С. 62–73.
10. Динаміка виведення ^{137}Cs з організму срібного карася (*Carassius gibelio*) при різних температурах води / Е.В. Кашпарова та ін. Ядерна фізика та енергетика. 2019. № 20. С. 411–419.
11. Пришляк С.П. Радіонуклідне забруднення вищих водних рослин та роль гелопітів у міграції ^{137}Cs у прісноводних водоймах: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00.17. К.: 2019. 23 с.
12. Радіоактивне і хімічне забруднення Дніпра і його водосховищ після аварії на Чорнобильській АЕС / В.Д. Романко та ін. К.: Наукова думка. 1992. 194 с.
13. Скиба В.В. Радіоекологічний моніторинг накопичення ^{90}Sr та ^{137}Cs в організмах риби деяких водойм лісостепу України. Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва. 2023. № 2. С. 145–154.
14. Динаміка вмісту ^{137}Cs у риби Київського та Канівського водосховищ / В.В. Скиба та ін. Збалансоване природокористування. 2024. № 3. С. 89–97.
15. Belyayev V.V., Volkova Ye.N. Mechanisms of forming of seasonal variations of ^{90}Sr and ^{137}Cs content in the freshwater fishes. Hydrobiol. J. 2013. Vol. 49. No 5. P. 81–89.
16. Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987 / V. Kashparov et al. Earth System Science Data (ESSD). 2020. Vol. 12. P. 1861–1875.

17. Behavior of Radionuclides in the Environment II / A. Konoplev et al. Chernobyl. Springer Singapore. 2020. 443 p.

18. Konoplev A., Laptev G., Igarashi Y., Namba K. Vertical distributions of Chernobyl-derived ^{137}Cs and ^{241}Am in bottom sediments of water bodies in exclusion zone represent long-term dynamics of water contamination. ENVIRA 5th International Conference on Environmental Radioactivity: BOOK OF ABSTRACTS ID 95, Prague Czech Republic, 2019. 73 p.

19. A critical review of pollution active biomonitoring using sentinel fish: challenges and opportunities / S. Bancel et al. Environmental Pollution. 2024.

REFERENCES

1. 25 років Чорнобильської катастрофи [25 years of the Chernobyl disaster]. Bezpeka majbutn'ogo: Nacional'na dopovid' Ukraïny [Security of the future: National report of Ukraine]. Kyiv: KIM, 2011, 356 p. (in Ukrainian).

2. Belyaev, V.V., Volkova, O.M., Gudkov, D.I., Pryshlyak, S.P., Skyba, V.V. (2021). Rekonstrukcija poglynenoi' dozy oprominennja ryb oz. Glybokogo vprodovzh rann'oi' fazy avarii' na Chornobyl's'kij AES [Reconstruction of the absorbed radiation dose of fish in Lake Glyboky during the early phase of the Chernobyl accident]. Gidrobiologichnyj zhurnal [Hydrobiological Journal], no. 57 (2), pp. 96–106. (in Ukrainian).

3. Belyaev, V.V., Volkova, O.M., Pryshlyak, S.P. (2015). Modeljuvannja dynamiky formuvannja radioaktyvnosti vodnyh roslyn [Modeling the dynamics of the formation of radioactivity in aquatic plants]. Jaderna energetyka ta dovykylja [Nuclear Energy and Environment]. no. 1 (5), pp. 44–49. (in Ukrainian).

4. Volkova, O.M. (2008). Tehnogeni radionuklidy u gidrobiontah vodojm riznogo typu: dys. d-ra biol. nauk: 03.00.17. [Technogenic radionuclides in hydrobionts of water bodies of various types: Dissertation of Doctor of Biological Sciences: 03.00.17.]. K., 348 p. (in Ukrainian).

5. Volkova, O.M., Belyaev, V.V., Pryshlyak, S.P., Gudkov, D.I., Kaglyan, O.E., Skyba, V.V. (2023). Tehnogeni radionuklidy u gidrobiontah vodojm pivnochi Ukraïny [Technogenic radionuclides in hydrobionts of water bodies of northern Ukraine]. Gidrobiologichnyj zhurnal [Hydrobiological Journal], Vol. 59 (6), pp. 100–119. (in Ukrainian).

6. Dyman, T.M., Grynevych, N.Ye., Mazur, T.G. (2022). Safety of food hydrobionts. "Alma Mater", Kyiv: Academic Center, Academy, 256 p.

7. Zarubin, O.L., Zarubina, N.E., Gudkov, D.I. (2013). Pytoma aktyvnist' ^{137}Cs u ryb Ukraïny [Specific activity of ^{137}Cs in fish of Ukraine]. Suchasnyj stan [Current status]. Jaderna fizyka ta energetyka [Nuclear Physics and Energy]. Vol. 14, no. 2, pp. 177–182. (in Ukrainian).

8. Kaglyan, O.E., Gudkov, D.I., Kireev, S.I., Klenus, V.G., Belyaev, V.V., Yurchuk, L.P., Drozdov, V.V., Gupalo, O.O. (2021). Dynamika pytomoi' aktyvnosti ^{90}Sr i ^{137}Cs u predstavnykiv ihtiofauny vodojm Chornobyl's'koi' zony vidchuzhennja

[Dynamics of specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs in representatives of the ichthyofauna of the Chernobyl Exclusion Zone]. Jaderna fizyka ta energetyka [Nuclear Physics and Energy]. Issue 22 (1), pp. 62–73. (in Ukrainian).

9. Kaglyan, O.E. (2021). Dynamika pytomoi' aktyvnosti ^{90}Sr i ^{137}Cs u predstavnykiv ihtiofauny vodojm Chornobyl's'koi' zony vidchuzhennja [Dynamics of specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs in representatives of the ichthyofauna of the Chernobyl Exclusion Zone]. Radiobiologija ta radioekologija [Radiobiology and Radioecology]. Vol. 22, Issue 1. pp. 62–73. (in Ukrainian).

10. Kashparova, E.V., Teien, G.Kh., Levchuk, S.E. (2019). Dynamika vyvedennja ^{137}Ss z organizmu sribnogo karasja (*Sarassius gibelio*) pry riznij temperaturi vody [Dynamics of ^{137}Cs excretion from the body of silver carp (*Carassius gibelio*) at different water temperatures]. Jaderna fizyka ta energetyka [Nuclear Physics and Energy]. no. 20, pp. 411–419. (in Ukrainian).

11. Pryshlyak, S.P. (2019). Radionuklidne zabrudnennja vyshhyh vodjanyh roslyn ta rol' gelofitiv u migracii' ^{137}Cs u prysnovodnyh vodojmah: avtoref. dys. kand. biol. nauk: spec. 03.00.17. [Radionuclide contamination of higher aquatic plants and the role of helophytes in the migration of ^{137}Cs in freshwater bodies: author's abstract. dissertation. candidate of biological sciences: special. 03.00.17.]. K.: 23 p. (in Ukrainian).

12. Romaneko, V.D., Kuzmenko, M.I., Yevtushenko, N.Yu. 1992. Radioaktyvne i himichne zabrudnennja Dnipra i jogo vodoshovyshh pislja avarii' na Chornobyl's'kij AES [Radioactive and chemical contamination of the Dnieper and its reservoirs after the Chernobyl accident]. K.: Naukova Dumka, 194 p. (in Ukrainian).

13. Skyba, V.V. (2023). Radioekologichnyj monitoring nakopychennja ^{90}Sr ta ^{137}Cs v organizmah ryb dejakyh vodojm lisostepu Ukraïny [Radioecological monitoring of the accumulation of ^{90}Sr and ^{137}Cs in fish organisms of some water bodies of the forest-steppe of Ukraine]. Tehnologija vyrobnyctva i pererobky produkciï tvarynnyctva [Technology of production and processing of livestock products]. no. 2, pp. 145–154. (in Ukrainian).

14. Skyba, V.V., Volkova, O.M., Belyaev, V.V., Pryshlyak, S.P., Prysyazhnyuk, N.M., Nagornyyuk O.M. (2024). Dynamika vmistu ^{137}Cs u ryb Kyi'vs'kogo ta Kaniv's'kogo vodoshovyshh [Dynamics of the content of ^{137}Cs in fish of the Kyiv and Kaniv reservoirs]. Zbalansovane pryrodokorystuvannja [Balanced nature management]. no. 3, pp. 89–97.

15. Belyaev, V.V., Volkova, Ye.N. (2013). Mechanisms of forming of seasonal variations of ^{90}Sr and ^{137}Cs content in the freshwater fishes. Hydrobiol. J., Vol. 49, no. 5, pp. 81–89.

16. Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Protasak, V., Beresford, N. A., Chaplow, J. S. (2020). Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987. Earth System Science Data (ESSD). Vol. 12, pp. 1861–1875.

17. Konoplev, A. (2020). Behavior of Radionuclides in the Environment II. Chernobyl. Springer Singapore, 443 p.

18. Konoplev, A., Laptev, G., Igarashi, Y., Namba, K. (2019). Vertical distributions of Chernobyl-derived ^{137}Cs and ^{241}Am in bottom sediments of water bodies in exclusion zone represent long-term dynamics of water contamination. ENVIRA 5th International Conference on Environmental Radioactivity: BOOK OF ABSTRACTS ID 95, Prague Czech Republic, 73 p.

19. Bancel, S., Cachot, J., Bon, C., Rochard, É., Geffard, O. (2024). A critical review of pollution active biomonitoring using sentinel fish: challenges and opportunities. Environmental Pollution.

Modeling the Dynamics of Radionuclide Accumulation in Freshwater Fish Species in the Post-Accident Period Following the Chornobyl NPP Disaster

Volkova O., Skyba V., Rozputnyi O., Pertskovyi I., Herasymenko V., Baban V.

This article presents the results of a study on the dynamics of radionuclide accumulation in freshwater fish species in the post-accident period following the Chornobyl Nuclear Power Plant (NPP) disaster. The research is based on the application of mathematical modeling to simulate bioaccumulation processes in aquatic ecosystems that have undergone significant

radioactive contamination. Key patterns of radionuclide influx, distribution, and redistribution, particularly of artificial radionuclides such as ^{137}Cs and ^{90}Sr , within the trophic chains of aquatic biocenoses have been identified.

The study analyzes the main factors influencing the level of radionuclide accumulation in hydrobionts, including species-specific characteristics, metabolic features, age differentiation of fish, feeding conditions, and the hydrochemical and hydrological properties of water bodies. Special attention is given to the dynamic changes in ^{137}Cs and ^{90}Sr concentrations in fish biomass over time, taking into account radioactive decay, dilution of radionuclides in the aquatic environment, and the migratory behavior of fish.

The findings of this study are crucial for assessing long-term ecological risks associated with persistent radioactive contamination in the aquatic ecosystems of the Chornobyl Exclusion Zone and adjacent areas. The proposed mathematical modeling approaches can be applied to predict the consequences of radioactive contamination in water bodies and to develop strategies for ecological monitoring and the restoration of polluted aquatic resources.

Key words: radionuclides, freshwater fish, mathematical modeling, bioaccumulation, radioecology, aquatic ecosystems, ecological monitoring, environmental safety.



Copyright: Волкова О.М. та ін. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Волкова О.М.

<https://orcid.org/0000-0002-5868-4842>

Скиба В.В.

<https://orcid.org/0000-0002-3605-1147>

Розпутний О.І.

<https://orcid.org/0000-0003-2005-990X>

Перцовий І.І.

<https://orcid.org/0000-0001-5042-3771>

Герасименко В.Ю.

<https://orcid.org/0000-0002-5678-9624>

Бабань В.П.

<https://orcid.org/0000-0003-3590-8214>