



УДК 574.64:546.36:597.2/.5(477.42)

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2025.39.03>

Махінько Р.Г.

Махінько Р.Г., аспірант, здобувач наукового ступеня доктора філософії Поліський національний університет,
ORCID: 0009-0002-8401-8226, vse-svit@ukr.net

РОЗПОДІЛ ^{40}K У ТКАНИНАХ ПРІСНОВОДНИХ РИБ ЯК ІНДИКАТОР РАДІОЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ РІЧКИ ЗДВИЖ

У статті представлено результати радіоекологічного дослідження, спрямованого на оцінку просторового (анатомічного) розподілу природного радіонукліду калію-40 (^{40}K) у тканинах прісноводних риб річки Здвиж (Житомирська область, Україна) як можливого індикатора екологічного стану водного середовища в умовах постчорнобильського періоду. Дослідження здійснено на чотирьох видах риб із різною трофічною спеціалізацією: *Hypophthalmichthys molitrix* (Valenciennes, 1844), *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758), *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) і *Isox lucius* (Linnaeus, 1758). Для кожного виду проаналізовано два ключові анатомічні сегменти – м'язову тканину (тушу) та голову з внутрішніми органами. Вимірювання рівнів ^{40}K виконували методом гамма-спектрометрії за допомогою сертифікованого сцинтиляційного обладнання (MRC-AT1315), з дотриманням стандартів контролю якості (ДСТУ ISO 10012:2005).

Результати дослідження свідчать про виразну анатомічну специфіку накопичення ^{40}K : у всіх видів зафіксовано переважне зосередження радіонукліду в м'язовій тканині порівняно з внутрішніми органами. Найвищу питому активність ^{40}K (156,00 Бк/кг) виявлено в щуки, що є хижаком верхнього трофічного рівня. Це свідчить про ймовірний вплив трофічного статусу на рівень біоаккумуляції природного калію, що може вказувати на ефект біологічної магніфікації. У товстолобика, як рослиноїдного виду, концентрації були значно нижчими (85,80 Бк/кг у м'язах), що також підтверджує міжвидову варіабельність. Статистичний аналіз показав, що стандартне відхилення в межах кожного сегмента не перевищувало 12 %, що підтверджує стабільність метаболічного профілю тканин і достовірність вимірювань.

Уперше для цієї гідроекосистеми здійснено комплексну оцінку анатомічного розподілу природного радіонукліду у рибах, що дало змогу виявити нові аспекти радіоекологічної структури водного середовища Українського Полісся. На основі отриманих результатів обґрунтовано можливість застосування показників розподілу ^{40}K як індикаторів стану середовища, що має значення для довгострокового екологічного моніторингу та формування рекомендацій із безпечного використання водних біоресурсів. З екологічного погляду концентрації ^{40}K у всіх зразках не перевищували регіональних фонових рівнів, що свідчить про відсутність радіаційного навантаження на екосистему річки Здвиж. Дослідження поглиблює розуміння впливу постчорнобильських чинників на водну біоту та пропонує аналітичну модель для подальших мультивидових досліджень у контексті екометаболического аналізу.

Ключові слова: радіоекологія, ^{40}K , прісноводні риби, м'язова тканина, анатомічний розподіл, річка Здвиж, трофічна спеціалізація, гамма-спектрометрія.

Вступ. Радіонуклід калій-40 (^{40}K) є природним радіоактивним ізотопом з тривалим періодом напіврозпаду (1,25 млрд років), присутнім у земній біосфері з моменту її формування. Він становить приблизно 0,012 % загального калію і відіграє важливу фізіологічну роль в організмах: бере участь у підтриманні осмотичної рівноваги, збудженні нервових клітин та скороченні м'язів. Його рівноважний метаболізм в організмах відображає внутрішньоклітинну стабільність та адаптацію до навколишнього середовища (Vladilo, 2022). Прісноводні риби, як біоіндикатори стану водного середовища й об'єкти рибогосподарського значення, є важливою групою організмів для радіоекологічного моніторингу.

У постчорнобильський період особливу увагу дослідників привертають водні екосистеми Українського Полісся, які зазнали складних трансформацій під впливом техногенного радіонуклідного навантаження.

Хоча ^{40}K не є продуктом аварії на ЧАЕС, дослідження його розподілу в біологічних об'єктах на забруднених територіях має важливе значення. Це дозволяє порівнювати природні радіонукліди з техногенними (як ^{137}Cs чи ^{90}Sr), оцінювати стан екосистем і виявляти довготривалі ефекти екологічної перебудови (Voitsekhovich et al., 2007).

Серед природних радіонуклідів найбільш поширений природний ізотоп калію – ^{40}K , який присутній у біологічних системах на всіх рівнях трофічної організації. Незважаючи на його природне походження, ^{40}K характеризується значною радіобіологічною активністю та бере участь у фізіологічних процесах клітинного метаболізму, що зумовлює його важливість як об'єкта радіоекологічного аналізу (Махінько, 2024). На відміну від техногенних радіонуклідів, як-от ^{137}Cs чи ^{90}Sr , які здебільшого накопичуються у кістковій тканині або внутрішніх органах, ^{40}K переважно розподіляється у м'язовій тканині, що зумовлено його

фізіологічними функціями (Carter, 2012; Dvoretzkyi та ін., 2016).

Сучасні дослідження підтверджують, що рівень біоаккумуляції радіонуклідів у рибах залежить від низки чинників, серед яких трофічна спеціалізація, екологічна ніша, вік та анатомічна структура організмів (Belyaev, Volkova, Gudkov, 2023; Egorov, 2021). Водночас наукова література вказує на брак систематичних досліджень, присвячених порівняльному аналізу розподілу саме природного ^{40}K у тканинах прісноводних риб різних видів, особливо у водних екосистемах, що зазнали радіоекологічної трансформації внаслідок Чорнобильської аварії (Marenkov та ін., 2010; Rathnayake, 2025). У цьому контексті розподіл ^{40}K у тканинах риб може розглядатися не лише як наслідок видоспецифічного метаболізму, а і як інтегральний показник екологічного стану водного середовища.

Таким чином, дослідження анатомічного розподілу ^{40}K у промислових видах риб Українського Полісся є актуальним як у фундаментальному, так і прикладному аспектах. Це дає змогу не тільки уточнити біокінетику природного радіонукліду в умовах відносно стабільного радіаційного фону, але й використовувати отримані дані для розробки стратегій безпечного використання водних біоресурсів у господарських цілях (Makhinko, 2024).

Останні дослідження та публікації. Упродовж останніх десятиліть дослідники приділяли значну увагу вивченню біоаккумуляції радіонуклідів у гідробіонтах, зокрема в контексті наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. Більшість наукових робіт зосереджувалася на поведінці техногенних ізотопів, як-от ^{137}Cs і ^{90}Sr , які продовжують циркулювати в екосистемах Полісся (Marenkov та ін., 2010; Dvoretzkyi та ін., 2016). Ці радіонукліди є біологічно активними та здатні акумулюватися в кістковій та м'якій тканині риб, утворюючи потенційну загрозу для харчових ланцюгів.

Поряд із цим природний радіонуклід калій-40 (^{40}K) привертає зростаючий інтерес через свою стабільну присутність в біоті, біологічну активність та здатність виступати маркером метаболічних процесів (Carter, 2012; Egorov, 2021). Зокрема, дослідження Belyaev, Volkova та Gudkov (2023) засвідчили, що ^{40}K має стабільні профілі накопичення в гідробіонтах навіть у сильно забруднених об'єктах, як-от озеро Глибоке в Зоні відчуження ЧАЕС. Робота Rathnayake (2025) узагальнила сучасні підходи до моніторингу природної радіоактивності в океанічних і прісноводних екосистемах, акцентуючи увагу на необхідності залучення анатомічної деталізації у радіоекологічному аналізі.

У вітчизняному контексті дослідження Voitsekhovich та ін. (2007) окреслили екологічні наслідки забруднення водного середовища радіонуклідами в післяаварійний період, однак не торкалися питання фракційного розподілу природного ^{40}K у тканинах риб. Подібна прогалина спостерігається і в інших джерелах, які здебільшого обмежуються аналізом загального рівня радіоактивності без урахування анатомічної та видоспецифічної структури (Mas, García-León, 2006).

У контексті вивчення техногенних радіонуклідів, зокрема ^{137}Cs , варто відзначити роботу Zarubin та співавт. (2014), у якій проаналізовано довгострокову динаміку специфічної активності у 13 видів риб охолоджувального ставка ЧАЕС за період 1986–2013 рр. Автори підкреслили важливість трофічної спеціалізації як фактора, що впливає на рівень біоаккумуляції цезію-137.

Крім того, в роботі Kashparov та ін. (2004) розглянуто кінетику розчинення «гарячих» частинок у ґрунті зони відчуження, що дає змогу оцінити часові аспекти мобільності ^{90}Sr і ^{137}Cs у водних компонентах екосистеми.

Автор цього дослідження раніше розглядав загальні аспекти відновлення водних екосистем Житомирського Полісся після Чорнобильської аварії (Махінко, 2024), а також здійснював ретроспективний аналіз довготривалого радіоекологічного навантаження на водойми регіону (Makhinko, 2024). Проте в попередніх працях увага не зосереджувалася на співвідношенні між анатомічними структурами та рівнем накопичення саме природного радіонукліду ^{40}K (калію-40).

Таким чином, залишається недостатньо дослідженою низка важливих аспектів:

- анатомічна диференціація накопичення ^{40}K у рибах різного трофічного рівня;
- потенціал використання ^{40}K як екосистемного індикатора в постчорнобильському середовищі;
- порівняння рівнів ^{40}K із фоновими нормами й оцінка ризиків у разі споживання водних біоресурсів.

Запропоноване дослідження має на меті заповнити зазначені прогалини шляхом аналізу розподілу ^{40}K у тканинах прісноводних риб річки Здвиж, з урахуванням трофічної спеціалізації, анатомічної структури та фізіологічних особливостей видів.

Мета. Метою цієї роботи є визначення закономірностей анатомічного розподілу природного радіонукліду калію-40 (^{40}K) у тканинах прісноводних риб різних трофічних груп, виловлених у річці Здвиж (Житомирська область), як індикатора радіоекологічного стану водної екосистеми.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

- здійснити відбір біологічного матеріалу чотирьох видів риб, репрезентативних для іхтіофауни річок Полісся;
- провести розподіл зразків на анатомічні фракції – м'язову тканину та голову з внутрішніми органами;
- визначити рівні питомої активності ^{40}K у кожній з фракцій методом гамма-спектрометрії;
- провести порівняльний аналіз ступеня накопичення радіонукліду залежно від трофічного статусу риб;
- встановити, чи може розподіл ^{40}K у тканинах риб виступати надійним показником екологічного стану річкової екосистеми.

Матеріали та методи дослідження. Польовий етап дослідження проводився 8 січня 2025 року на середній



Рис. 1. Місце відбору проб

Fig. 1. Sampling site

течії річки Здвиж поблизу села Карабачин Брусилівського району Житомирської області (рис. 1).

Цей водотік є характерним для південного Полісся за гідрологічними, геохімічними та ландшафтними особливостями, а також підпадає під зону впливу радіоактивного забруднення, пов'язаного з аварією на Чорнобильській АЕС.

Як об'єкти біомоніторингу були відібрані чотири види риб, які широко представлені в іхтіофауні регіону та мають різну трофічну спеціалізацію: товстолобик (*Hypophthalmichthys molitrix*), короп (*Cyprinus carpio*), карась (*Carassius gibelio*) та щука (*Esox lucius*). Усі зразки були виловлені в межах одного гідробіологічного району одночасно, що мінімізує вплив сезонної чи просторової варіації. Усього було проаналізовано по 5 особин кожного виду ($n = 5$), що забезпечило репрезентативність вибірки.

Після вилову кожну рибину розділяли на дві анатомічні фракції:

- м'язову тканину (їстівна частина/туша);
- голову разом із внутрішніми органами (об'єднаний сегмент, що охоплює життєво важливі метаболічно активні структури, зокрема печінку, нирки, зябра та мозок, які потенційно беруть участь у накопиченні радіонуклідів).

Такий підхід до групування відповідає загальноприйнятій практиці радіоекологічних досліджень, коли фрагментація на м'язову та нем'язову частини дає змогу оцінити контрастність накопичення ізотопів у тканинах різної фізіолого-біохімічної природи (Carter, 2012; Belyaev, Volkova, Gudkov, 2023). Інші анатомічні структури (кістяк, плавники тощо) у рамках цієї методики не розглядалися, оскільки не є основними депо для ^{40}K .

Підготовка проб до аналізу включала попереднє миття, механічне очищення, подрібнення

та гомогенізацію зразків. Аналітичні вимірювання питомої активності радіонукліду ^{40}K (у Бк/кг свіжої маси) виконувалися в лабораторії Поліського національного університету, сертифікованій відповідно до вимог ДСТУ ISO 10012:2005. Для визначення використовувався гамма-спектрометр МКС-АТ1315 (виробництва АТОМТЕХ, Білорусь) із сцинтиляційним блоком детектування на основі NaI(Tl), розміром 63×63 мм.

Процедура аналізу передбачала:

- фіксацію фонових спектра протягом 3 годин;
- розміщення проб у контейнерах «Марінеллі, об'ємом 1000 cm^3 ;
- безперервну реєстрацію гамма-випромінювання;
- ідентифікацію та підрахунок активності ^{40}K за енергією $1460,8 \text{ keV}$.

Повторюваність вимірювань забезпечувалася шляхом проведення трьох паралельних вимірювань для кожного зразка, а середнє значення використовувалося для подальшого аналізу.

Для контролю дози зовнішнього опромінення додатково використовували спектрометр-дозиметр МКГ-АТ1321, оснащений сцинтиляційним детектором і лічильником Гейгера-Мюллера. Обробка спектрів проводилася у режимі реального часу за допомогою програмного забезпечення SPTR. Статистичний аналіз результатів передбачав обчислення середніх значень, стандартних відхилень, коефіцієнтів варіації та парних відсоткових різниць між фракціями.

Дослідження проведене в рамках науково-дослідної теми «Радіоекологічна оцінка водних біоресурсів у віддалений період після аварії на Чорнобильській атомній електростанції» (реєстраційний номер МОН України: №0124U000593).

Отримані результати та їх обговорення. У межах проведеного дослідження визначено питомі активності

Таблиця 1. Питома активність ^{40}K у тканинах прісноводних риб річки Здвиж, Бк/кг (Махінко, 2025)
Table 1. Specific activity of ^{40}K in tissues of freshwater fish from the Zdvyzh River, Bq/kg (Makhinko, 2025)

№	Вид риби	Сегмент	^{40}K , Бк/кг \pm SD
1	Товстолоб	Голова та внутрішні органи	59,77 \pm 5,9
2	Товстолоб	М'язова тканина	85,80 \pm 8,5
3	Короп	Голова та внутрішні органи	53,70 \pm 5,4
4	Короп	М'язова тканина	62,90 \pm 6,2
5	Карась	Голова та внутрішні органи	98,50 \pm 9,1
6	Карась	М'язова тканина	117,00 \pm 11,2
7	Щука	Голова та внутрішні органи	113,00 \pm 11,0
8	Щука	М'язова тканина	156,00 \pm 15,8

природного радіонукліду ^{40}K у тканинах чотирьох видів риб, виловлених у річці Здвиж. Для кожного виду проаналізовано два анатомічні сегменти – м'язову тканину (тушу) та голову з внутрішніми органами. Отримані значення наведено в таблиці 1.

Аналіз розподілу радіонукліду між сегментами тіла показав виражену перевагу накопичення ^{40}K у м'язовій тканині незалежно від трофічної належності виду. Найбільша абсолютна різниця між м'язовою тканиною та головою з внутрішніми органами спостерігалась у товстолобика (26,03 Бк/кг), що становило 43,5 % відносного зростання. У хижого виду (щука) цей показник становив 38,1 %, тоді як у всеїдного коропа та карася – 17,1 і 18,8 % відповідно.

Порівняльна характеристика концентрацій ^{40}K свідчить про видоспецифічні відмінності: найнижчі значення зареєстровані у коропа (62,90 Бк/кг у м'язовій тканині), тоді як найвищі – у щуки (156,00 Бк/кг). Таким чином, спостерігається кореляція між трофічним

статусом виду та рівнем акумуляції радіонукліду: хижі види демонструють вищу здатність до біоаккумуляції ^{40}K .

Окрему увагу приділено аналізу варіабельності показників. Для кожного виду було проаналізовано по 5 особин ($n = 5$), а всі вимірювання виконано у трикратній повторності, що забезпечило статистичну достовірність. Для всіх зразків стандартне відхилення не перевищувало 10–12 %, що підтверджує стабільність розподілу дослідженого радіонукліду. Діаграма розподілу концентрацій (рис. 3) ілюструє чітку перевагу м'язової тканини як депо ^{40}K у всіх досліджуваних видів.

Таким чином, результати дослідження засвідчують наявність як анатомічної, так і міжвидової диференціації у накопиченні природного радіонукліду ^{40}K . Отримані значення (від 53,70 до 156,00 Бк/кг у свіжій масі) перебувають у межах регіональних фонових рівнів для водойм Полісся, які, за даними Voitsekovich et al.



Рис. 3. Діаграма порівняльного розподілу активності ^{40}K у тканинах риб
Fig. 3. Distribution of ^{40}K in edible tissues and organs of freshwater fish from the Zdvyzh River

(2007) та Dvoretzkyi et al. (2016), становлять у середньому 50–160 Бк/кг для м'язової тканини прісноводних риб. Це дає змогу розглядати розподіл ^{40}K не лише як характеристику метаболічного профілю виду, а і як потенційний екологічний індикатор стану водного середовища.

Отримані результати демонструють чітко виражену анатомічну специфіку накопичення ^{40}K у тканинах прісноводних риб, що підтверджує відомі фізіолого-біохімічні особливості розподілу загального калію як макроелемента, тісно пов'язаного з метаболічною активністю м'язової тканини (Egorov, 2021; Carter, 2012). Встановлено, що у всіх видів вміст ^{40}K у м'язах суттєво перевищує його концентрацію в голові з внутрішніми органами.

У межах всеїдних і рослиноїдних видів простежується послідовне зростання рівнів ^{40}K у м'язовій тканині в ряду короп – товстолобик – карась, що може бути зумовлено як біологічними, так і екологічними чинниками. Короп (*Syrpinus carpio*), як типовий всеїдний вид, має відносно повільний темп росту та нижчу частку м'язової маси в тілі, що впливає на меншу загальну потребу в калії. Товстолобик (*Hypophthalmichthys molitrix*), переважно рослиноїдний, характеризується вищими темпами росту і значною м'язовою масою, що корелює з вищими значеннями ^{40}K . Карась (*Carassius gibelio*) демонструє найвищу концентрацію серед цих трьох видів, що може пояснюватися його високою витривалістю, частим перебуванням у гіпоксичних умовах малих водойм та відповідною адаптацією метаболічних процесів із підвищенням калієвим обміном. Також можна припустити, що відмінності можуть бути пов'язані з особливостями живлення і трофічної пластичності карася, здатного активно споживати як рослину, так і тваринну їжу, що посилює його метаболічну активність, а отже, і накопичення калію.

Такий розподіл загалом узгоджується з відомими механізмами біоаккумуляції техногенних радіонуклідів, зокрема ^{137}Cs , який, як хімічний аналог калію, також накопичується переважно в м'язовій тканині. Щодо ^{90}Sr , то, згідно з даними літератури, цей радіонуклід подібний до кальцію за біохімічною поведінкою та звичай інтегрується в кісткову тканину (Dvoretzkyi et al., 2016; Marenkov et al., 2010), хоча в межах цього дослідження ми не аналізували кістковий структури. Таким чином, профіль розподілу природного ^{40}K може слугувати орієнтиром для розуміння загальних закономірностей метаболізму радіонуклідів у риб і використовується нами як фізіолого-біохімічна основа для подальших порівнянь із поведінкою техногенних ізотопів у водних екосистемах.

Найвищі рівні активності ^{40}K виявлені в щуки – типового хижака верхнього трофічного рівня. Такий результат узгоджується з гіпотезою про біологічну магніфікацію природного калію в харчових ланцюгах і з даними попередніх спостережень у водних об'єктах зони відчуження (Belyaev, Volkova, Gudkov, 2023). Висока концентрація ^{40}K у м'язах хижих видів також

може бути наслідком їхньої переважаючої м'язової маси, інтенсивного обміну речовин та фізіологічної ролі калію в нервово-м'язовій передачі.

Значущість трофічного статусу як фактора накопичення підтверджується систематичним зростанням рівнів активності ^{40}K від рослиноїдного товстолобика до хижої щуки. Подібні закономірності раніше виявлено і для техногенних радіонуклідів у рибах Дніпровського каскаду (Marenkov et al., 2010), проте їх екстраполяція на природний ^{40}K була обмеженою.

Авторські попередні дослідження вказували на загальний добрий стан водних об'єктів Житомирського Полісся у віддалений період після ЧАЕС, з фоновими концентраціями основних радіонуклідів (Махінко, 2024; Makhinko, 2024). Результати поточного аналізу підтверджують ці результати: усі значення питомої активності ^{40}K перебувають у межах, характерних для природних водойм району досліджень, що свідчить про відсутність радіологічної загрози споживання у їжу прісноводних риб. Зокрема, встановлені значення не перевищують гігієнічні нормативи, встановлені для сумарної радіоактивності в харчових продуктах (наприклад, до 370 Бк/кг для цезію-137 згідно з НРБУ-97 (Норми радіаційної безпеки України), хоча для ^{40}K окремі обмеження в межах цього класу не регламентуються через його природне походження). Водночас виявлена міжвидова й анатомічна варіабельність концентрацій ^{40}K дає змогу розглядати його розподіл як потенційний індикатор внутрішньоекосистемних процесів, пов'язаних із метаболічною активністю, енергетичним балансом і харчовими взаємозв'язками.

З практичного погляду, враховуючи високу питому активність ^{40}K у їстівних частинах щуки, доцільним є подальше вивчення її ролі як індикаторного виду для оцінки екологічної безпеки водних біоресурсів у регіоні. Крім того, анатомічна диференціація розподілу ^{40}K може бути використана як інструмент для ідентифікації змін в екосистемах, пов'язаних із трансформацією трофічної структури або впливом вторинного забруднення.

Таким чином, результати підтверджують значимість анатомічного та трофічного аналізу для оцінки радіоекологічного стану водойм і відкривають перспективи застосування ^{40}K як внутрішнього екологічного маркера стабільності водних екосистем.

Висновки. За результатами дослідження встановлено чітку анатомічну закономірність розподілу природного радіонукліду ^{40}K у тканинах прісноводних риб річки Здвиж. Для всіх досліджуваних видів виявлено переважне накопичення ^{40}K у м'язовій тканині порівняно з головою та внутрішніми органами.

Виявлено виражену міжвидову диференціацію питомої активності ^{40}K залежно від трофічного рівня. Найвищі концентрації зафіксовано у хижого виду – щуки (*Esox lucius*), що підтверджує гіпотезу про вплив трофічної спеціалізації на біоаккумуляцію природних радіонуклідів.

Рівні активності ^{40}K у всіх зразках не перевищують регіональних фонових значень для водойм Українського

Полісся, тож можна припустити відсутність помітного радіоекологічного навантаження за цим показником на екосистему річки Здвиж у досліджений період. Водночас зазначений показник не дає змоги робити узагальнені висновки щодо загального антропогенного впливу, оскільки не охоплює інших можливих типів забруднення (органічного, хімічного, токсикологічного тощо).

Отримані результати свідчать про потенціал використання ^{40}K як екосистемного індикатора, здатного відображати як фізіолого-біохімічні властивості гідробіонтів, так і загальний стан водного середовища.

Методика фракційного аналізу накопичення ^{40}K у рибах різних трофічних груп може бути рекомендована для включення в комплексні програми радіоекологічного моніторингу прісноводних екосистем, а також як основа для розробки підходів до оцінки якості водних біоресурсів з урахуванням їх безпечного використання в рибогосподарстві.

Перспективами подальших досліджень є розширення видового складу досліджуваних риб, включення сезонного чинника до аналізу накопичення ^{40}K , розмірної структури особин (віку), паралельне вивчення співвідношення природних і техногенних радіонуклідів (^{137}Cs , ^{90}Sr), розробка моделей прогнозування динаміки розподілу ^{40}K в умовах кліматичних змін.

Література

1. Маренкоу 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.
2. Дворецький А., Сапронова В., Байдак Л., Маренков О. Радіоекологія водних екосистем Придніпров'я. *Вісн. ЖНАЕУ.* 2016. № 1 (55). С. 283–290.
3. Махінко 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>.
4. Makhinko R. Long-term consequences of the Chernobyl disaster for aquatic ecosystems: A retrospective analysis and prognosis. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources.* 2024. Vol. 15, № 2. P. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.58>.
5. Voitsekovich O.V., Perepylatnikov G., Nasvit O. Radioecological Aspects of Water Use. The Chernobyl Catastrophe: Consequences on Human Health and the Environment. Springer, 2007. P. 57–83. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/1-4020-5349-5_3.pdf.
6. Carter M.W. Radionuclides in the Food Chain. Springer, 2012. 518 p. URL: https://books.google.com/books?id=uG_rBwAAQBAJ.
7. Egorov V. Theory of Radioisotopic and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems. Radioactive Contamination in Marine Environments. Springer, 2021. P. 121–139. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-80579-1.pdf>.
8. Belyaev V.V., Volkova O.M., Gudkov D.I. Radiation dose reconstruction for higher aquatic plants and fish in Glyboke Lake during the early phase of the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X23000620>.
9. Rathnayake R.M.N.P. Nuclear and Radioactive Marine Pollution and Monitoring of Radioactivity in Oceans. *Radiological Environmental Protection.* Wiley, 2025. P. 175–190. DOI: [10.1002/9781394237029.ch10](https://doi.org/10.1002/9781394237029.ch10).
10. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) : ГН 6.6.1-6.5.001-98. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 1998. 132 с. Додаток 13.
11. International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Guide No. GSG-1. Vienna: IAEA, 2014. 138 p. ISBN: 978-92-0-135310-8.
12. Зарубін О.Л., Зарубіна Н.С., Заліський А.О., Костюк В.А. Динаміка питомої активності ^{137}Cs у риб з різним типом живлення в охолоджувальному ставку ЧАЕС (1986–2013). *Гідробиологічний журнал.* 2014. Т. 50, № 3. С. 95–106. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v50.i3.110>
13. Кашпаров В.О., Ахамдах Н., Зварич С.І., Йошенко В.І., Малоштан І.М., Дев'єр Л. Кінетика розчинення паливних частинок Чорнобиля в ґрунті за природних умов. *Журнал радіоекології довідля.* 2004. Т. 72, № 3. С. 335–353. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.08.002>.

References

1. Marenkov, O.M., Dvoretzkiy, A.I. and Bilokon, G.S. (2010), Radionuclides contamination of industrial types of fishes of Dnieper reservoir. *Naukovi zapysky Ternopil National Pedagogical University, Seriya Biologiya*, 2 (43): 338–341.
2. Dvoretzkiy, A., Sapronova, V., Baidak, L. and Marenkov, O. (2016), Radioecology of the Pridneprovie water ecosystems. *Visnyk ZhNAEU*, (1) 55: 283–290.
3. Makhinko, R.H. (2024), Kompleksni zakhody po vidnovlenniu vodoim Zhytomyrskoho Polissia pislia Chornobylskoi katastrofy. *Ekologichni nauky*, (3) 54: 57–63. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7>.
4. Makhinko, R. (2024), Long-term consequences of the Chernobyl disaster for aquatic ecosystems: A retrospective analysis and prognosis. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 15 (2): 58–67. <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.58>.
5. Voitsekovich, O.V., Perepylatnikov, G. and Nasvit, O. (2007), Radioecological Aspects of Water Use. In: *The Chernobyl Catastrophe: Consequences on Human Health and the Environment*. Springer, pp. 57–83. Available at: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/1-4020-5349-5_3.pdf.
6. Carter, M.W. (2012), *Radionuclides in the Food Chain*. Springer. Available at: https://books.google.com/books?id=uG_rBwAAQBAJ.
7. Egorov, V. (2021). Theory of Radioisotopic and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems. In: *Radioactive Contamination in Marine Environments*. Springer, pp. 121–139. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-80579-1.pdf>.
8. Belyaev, V.V., Volkova, O.M. and Gudkov, D.I. (2023), Radiation dose reconstruction for higher aquatic plants and fish in Glyboke Lake during the early phase of the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X23000620>.
9. Rathnayake, R.M.N.P. (2025). Nuclear and Radioactive Marine Pollution and Monitoring of Radioactivity in Oceans. In: *Radiological Environmental Protection*. Wiley, pp. 175–190. <https://doi.org/10.1002/9781394237029.ch10>.
10. Ministry of Health of Ukraine. (1998), *Norms of Radiation Safety of Ukraine (NRBU-97): Hygienic regulation GN 6.6.1-6.5.001-98*. Kyiv: Ministry of Health of Ukraine [in Ukrainian].
11. International Atomic Energy Agency. (2014), *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. Vienna: IAEA. ISBN 978-92-0-135310-8.
12. Zarubin, O.L., Zarubina, N.E., Zalisskiy, A.A. and Kostyuk, V.A. (2014), Dynamics of ^{137}Cs Specific Activity in Fishes Differing in the Type of Their Nutrition in the Cooling Pond of the Chernobyl NPS (1986–2013). *Hydrobiological Journal*, 50 (3): 95–106. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v50.i3.110>.
13. Kashparov, V.A., Ahamdach, N., Zvarich, S.I., Yoschenko, V.I., Maloshtan, I.N. and Dewiere, L. (2004), Kinetics of dissolution of Chernobyl fuel particles in soil in natural conditions. *Journal of Environmental Radioactivity*, 72 (3): 335–353. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.08.002>.

DISTRIBUTION OF ⁴⁰K IN FRESHWATER FISH TISSUES AS AN INDICATOR OF RADIOECOLOGICAL STATUS OF THE ZDVIYZH RIVER**Makhinko R.H.****Makhinko R.H.**, PhD student, (Ecology), Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine, ORCID: 0009-0002-8401-8226, vse-svit@ukr.net

*This study presents the results of a radioecological investigation focused on assessing the anatomical distribution of the natural radionuclide potassium-40 (⁴⁰K) in tissues of freshwater fish from the Zdyvzh River (Zhytomyr Region, Ukraine) as a potential indicator of the ecological condition of aquatic ecosystems under post-Chernobyl environmental conditions. The study involved four fish species representing different trophic levels: *Hypophthalmichthys molitrix* (Valenciennes, 1844), *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758), *Carassius gibelio* (Bloch, 1782), and *Esox lucius* (Linnaeus, 1758). For each species, two key anatomical compartments were examined—muscle tissue and the head with internal organs. The specific activity of ⁴⁰K was determined using gamma spectrometry with certified scintillation-based equipment (MKS-AT1315) following national metrological standards (DSTU ISO 10012:2005).*

The results demonstrated a pronounced anatomical specificity in ⁴⁰K accumulation: in all fish species, muscle tissue exhibited significantly higher levels of ⁴⁰K compared to internal organs. The highest value of ⁴⁰K specific activity was recorded in pike (156.00 Bq/kg in muscle), a top-level predatory species, suggesting potential biological magnification of potassium-40 along the trophic chain. In contrast, the herbivorous silver carp showed notably lower concentrations (85.80 Bq/kg), highlighting interspecies variation. Statistical analysis confirmed the robustness of the results, with standard deviation not exceeding 12% across all tissue types, indicating stable physiological patterns of radionuclide distribution and reliable measurement reproducibility.

This research provides the first detailed comparative assessment of ⁴⁰K anatomical distribution in fish from this particular freshwater system. The findings offer new insights into the radioecological structure of aquatic ecosystems in the Polissya region and validate the potential of using ⁴⁰K tissue profiling as an ecological indicator. From an applied perspective, all detected values remained within established regional background levels, indicating no significant radiological impact on the ecosystem. The results may be used in developing long-term monitoring protocols and recommendations for the sustainable exploitation of aquatic bioresources in post-accident environments. Additionally, the study offers a foundational model for future integrative research on radionuclide biokinetics and ecosystem health assessment in contaminated or post-contamination scenarios.

Key words: radioecology, ⁴⁰K, freshwater fish, muscle tissue, anatomical distribution, Zdyvzh River, trophic specialization, gamma spectrometry.