

В. О. Кашпаров^{1*}, С. Є. Левчук¹, Д. М. Голяка¹, Ю. В. Хомутинін¹,
В. П. Процак¹, Д. М. Кондратюк², М. А. Журба¹

¹ Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

² Природний заповідник «Древянський», Народиці, Україна

*Відповідальний автор: kashparov@nubip.edu.ua

РАДІОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ РИБИ У ЗАПЛАВНОМУ ОЗЕРІ СТАРУХА ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Після аварій на Чорнобильській АЕС у 1986 р. та АЕС Фукусіма-1 у 2011 р. в радіоактивно забруднених прісноводних водоймах питома активність радіонуклідів у рибі сягала сотень кБк·кг⁻¹ і перевищувала міжнародні та національні допустимі рівні. Метою даної роботи було визначення в реальних умовах вмісту радіонуклідів у різних видах риб у «напівзакритому» заплавному озері Старуха річки Прип'ять на північно-західному сліду радіоактивних випадів у чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ). У результаті проведених експериментальних досліджень протягом 2000 - 2018 рр. було отримано значення питомої активності ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr у різних видах риб. Максимальні рівні питомої активності ¹³⁷Cs у м'язовій тканині риб 3,7 і 3,6 кБк·кг⁻¹ було зафіксовано у щуки звичайної масою 6,2 і 1,65 кг 04.10.2000 р. та 30.08.2006 р. У 2016 і 2018 рр. питома активність ¹³⁷Cs у м'язовій і ⁹⁰Sr у кістковій тканині хребта не перевищувала 800 Бк·кг⁻¹. Ефективний період напівзменшення питомої активності ¹³⁷Cs у м'язовій тканині щуки, судака і білизни звичайної становив 19 - 30 років, що в основному обумовлено радіоактивним розпадом ¹³⁷Cs. Середньгеометрична питома активність ¹³⁷Cs у м'язовій тканині щуки, судака і білизни в оз. Старуха тільки до 2043 - 2072 рр. досягне рівня гігієнічного нормативу – 150 Бк·кг⁻¹. При цьому неперевіщення питомої активності ¹³⁷Cs у м'язовій тканині окремих риб із імовірністю 95 % буде досягнуто через 50 - 100 років. Це може вказувати на потенційну небезпеку міграції риби із заплавлених озер ЧЗВ під час паводку в р. Прип'ять та Київське водосховище.

Ключові слова: ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, радіоекологія, Чорнобильська аварія, зона відчуження, радіоактивне забруднення.

1. Вступ

Допустимі рівні вмісту ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs у питній воді в Україні після Чорнобильської аварії згідно з ДР-2006 становлять 2 Бк·л⁻¹ [1]. При таких рівнях радіоактивного забруднення закритих водойм питома активність ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs може у сотні та тисячі разів перевищувати допустимі рівні вмісту радіонуклідів у рибі в Україні, тобто 35 і 150 Бк·кг⁻¹ відповідно [1 - 10]. Це було причиною того, що в деяких населених пунктах саме риба була основним джерелом надходження радіоцезію в організм місцевих жителів та обумовленого цим внутрішнього опромінення населення [10, 11]. Рівні радіоактивного забруднення риби у закритих водоймах чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) і р. Прип'ять відрізняються в сотні та тисячі разів [3]. Найвищими значеннями питомої активності ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs характеризуються риби закритих водойм у центральній частині ділянки Красненської заплави (оз. Вершина, оз. Глибоке, оз. Далеке), розташованих на території південно-західного сліду чорнобильських радіоактивних випадів (рис. 1) [3, 12, 13]. Упродовж 2016 - 2021 рр. у цих озерах було зафіксовано

максимальні рівні питомої активності ⁹⁰Sr в мирних рибах, таких як карась та краснопірка (до 140 кБк·кг⁻¹). У той же час максимальні значення ¹³⁷Cs спостерігались у хижих рибах, таких як щука та окунь (до 40 кБк/кг). Ці значення у сотні та тисячі разів перевищували гігієнічні нормативи ДР-2006 [3 - 6]. За даними О. Є. Кагляна представники іхтіофауни руслової ділянки р. Прип'ять у межах ЧЗВ характеризуються найменшими значеннями вмісту радіонуклідів серед досліджених водних об'єктів [3]. Так у 2018 - 2019 рр. середня питома активність ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs в рибі з р. Прип'ять не перевищувала допустимі рівні ДР-2006 і становила: для судака – 12 ± 5 і 129 ± 35 Бк·кг⁻¹; для білизни – 12 ± 5 і 84 ± 15 Бк·кг⁻¹; для ляща – 18 ± 7 і 24 ± 9 Бк·кг⁻¹ [3]. У північній частині Київського водосховища за межами ЧЗВ вже у 2010 - 2014 рр. середня питома активність ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs у рибі не перевищувала 5 та 60 Бк·кг⁻¹ відповідно [12, 14, 15]. Це призвело спочатку до відновлення промислового вилову риби у верхів'ях Київського водосховища, а з 2018 р. у р. Прип'ять на території Поліського державного радіаційно-екологічного заповідника, розташованого в Білорусі. При цьому

проводився вибірковий контроль вмісту радіонуклідів у рибі, який не гарантує неперевіщення допустимих рівнів у окремих особинах. Це обумовлено високими розкидами вмісту радіонуклідів у рибі навіть у закритих водоймах (геометричні стандартні відхилення питомої активності ^{137}Cs та ^{90}Sr становлять 1,2 - 1,9) [16] і можливою міграцією риби з високо забруднених водойм заплави в р. Прип'ять під час паводку. Враховуючи великі періоди напівзменшення вмісту радіонуклідів в організмі риб у закритих водоймах ЧЗВ

(понад 5 років) [3], а також періоди напіввиведення радіонуклідів з організму риб під час переміщення їх у «чисту» воду (понад 100 діб) [5, 17] міграція риби під час паводків із заплавлених озер у р. Прип'ять та Київське водосховище може призводити до аномально високої питомої активності радіонуклідів в окремих риб з уловів за межами ЧЗВ, що потребує експериментальної оцінки. У зв'язку з цим, залишається актуальним вивчення динаміки радіоактивного забруднення риби у «напівзакритих» заплавлених озерах р. Прип'ять у ЧЗВ.

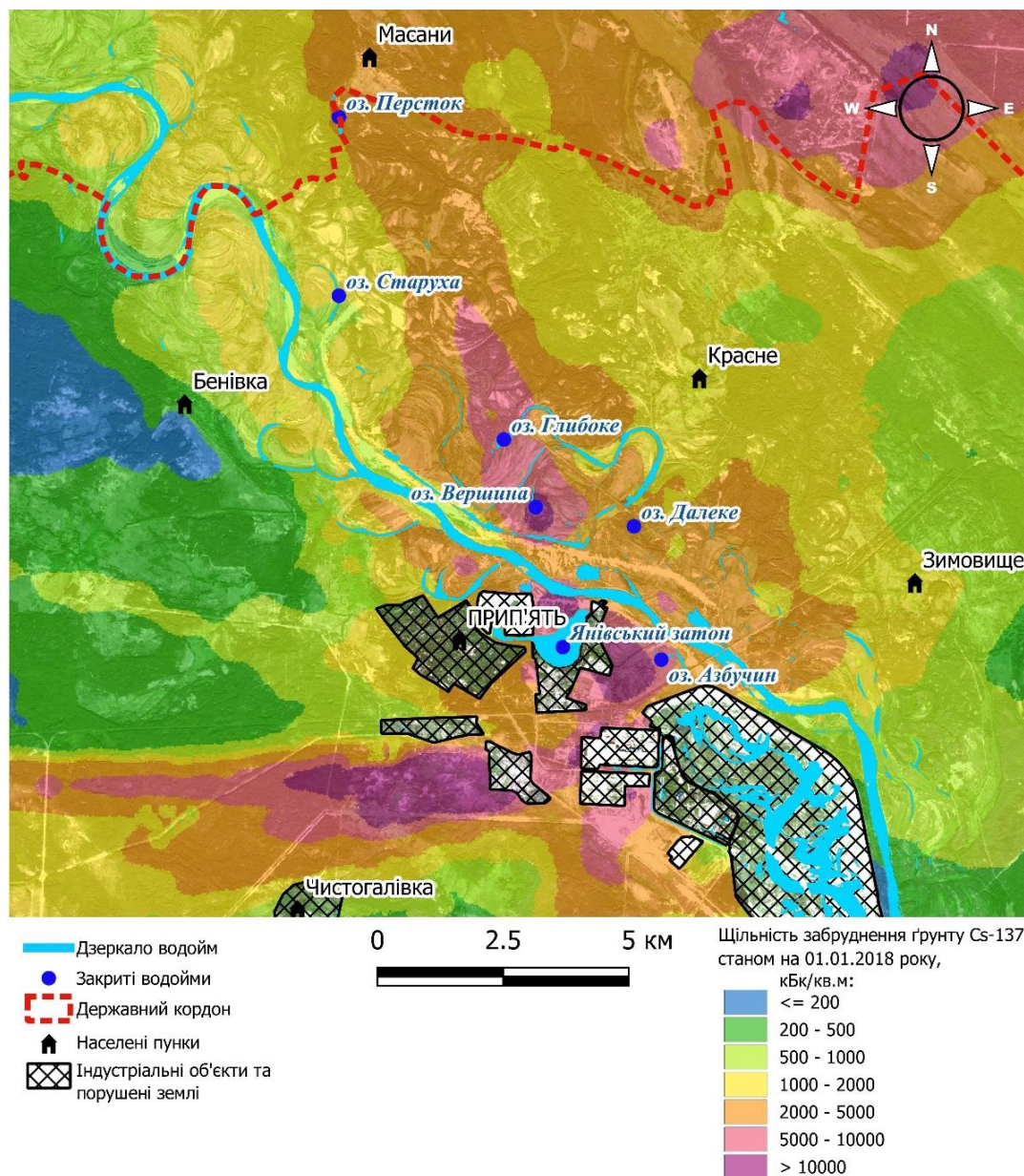


Рис. 1. Карта-схема полігонів та щільності забруднення ^{137}Cs території у ЧЗВ [12, 13].
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Мета дослідження полягає у визначенні динаміки вмісту радіонуклідів в організмах різних видів риб у заплавному оз. Старуха на північно-західному сліду радіоактивних випа-

дінь ЧЗВ з метою радіаційного захисту людини і навколишнього середовища в ситуації існуючого хронічного опромінення.

2. Матеріали і методи досліджень

Експериментальні дослідження з вивчення динаміки вмісту радіонуклідів у рибі проводили протягом 2000 - 2018 рр. у заплавному оз. Старуха

(від 51.462540°, 30.010837° до 51.473351°, 30.006310°) на північно-західному сліду радіоактивних випадіннь у північній частині ЧЗВ на відстані 10,5 км (325°) від ЧАЕС і 1,2 - 2,5 км від кордону з Білоруссю (рис. 1 - 3).



а



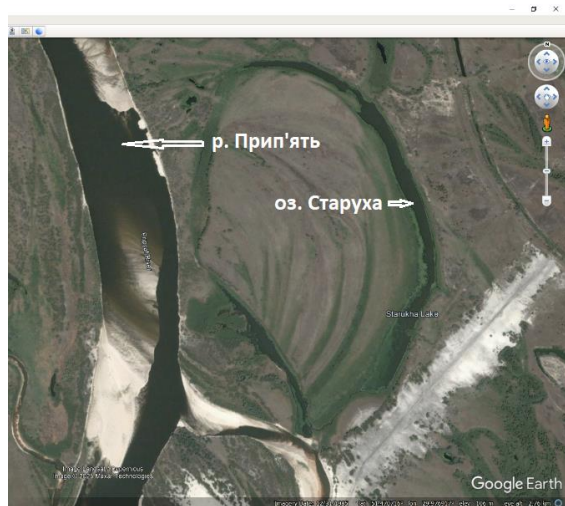
б

Рис. 2. Вигляд оз. Старуха в 2006 р. в південно-західному 215° (а) і північно-північно-західному – 338° (б) напрямках. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

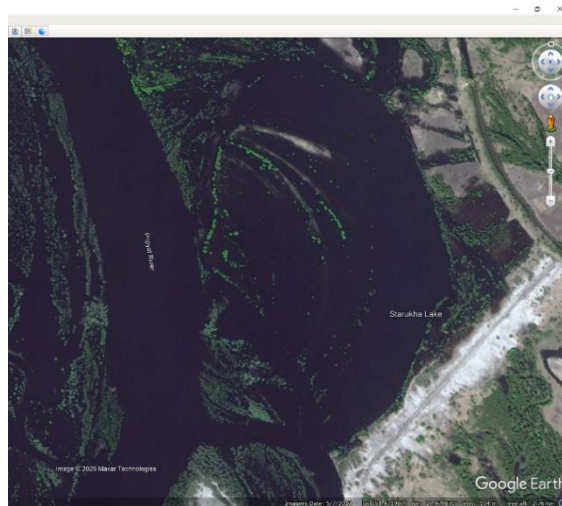
Щільність забруднення водозбірної території ^{137}Cs озера на 2018 р. варіювала в межах 1000 - 2000 кБк·м⁻² (див. рис. 1) [12, 13]. Озеро є старою меандрою русла ріки і утворене в результаті зміни напрямку руслового потоку та має дугоподібну форму, характерну для стариці. Довжина озера приблизно 1,4 км при мінімальному рівні води влітку і восени та 1,8 км під час розливу р. Прип'ять навесні за максимальної ширини озера близько 100 м (див. рис. 2). Площа водної поверхні влітку близько 10 га. Рельєф дна має жолобоподібну витягнуту вздовж осі озера форму. Глибини в озері розподілені нерівномірно. У цілому вони не перевищують 2 - 3 м, але по осі в центральній частині озера є, западина (51.472317°, 30.013501°) з максимальними глибинами до 7 - 8 м. Береги пологі, порослі очеретом звичайним та іншою водною рослинністю. Краї озера мілководні (глибиною до 50 - 70 см), густо зарослі рослинністю, в основному глечиками жовтими (*Nuphar lutea*). У

звуженнях озера трапляються мілини, повністю вкриті рослинністю. У засушливі періоди року озеро втрачає до 1 м глибини. Деякі закраїни висихають практично повністю (див. рис. 3).

Озеро в періоди середніх і високих весняних повеней у квітні - травні має обміліле сполучення з р. Прип'ять (див. рис. 3). Таким чином, через протоку шириною до 50 м та глибиною до 1 м на південному-сході (51.462454°, 30.010559°) в озеро на нерест заходять та виходять великі групи риби, які неодноразово нами візуально спостерігалися. Водобмін забезпечує в озері велику популяцію риби та її видове різноманіття. Видовий склад риби близький до такого в р. Прип'ять і включає судака, білизну, ляща, плоскирку, синця та відрізняється від закритих озер лівобережної заплави в ЧЗВ [3, 4]. При зниженні рівня води в р. Прип'ять з'єднання озера з річкою переривається до наступної повені і риба виявляється відрізаною від річки (див. рис. 3). У кінці року водойма має замкнутий кругообіг води.



а



б

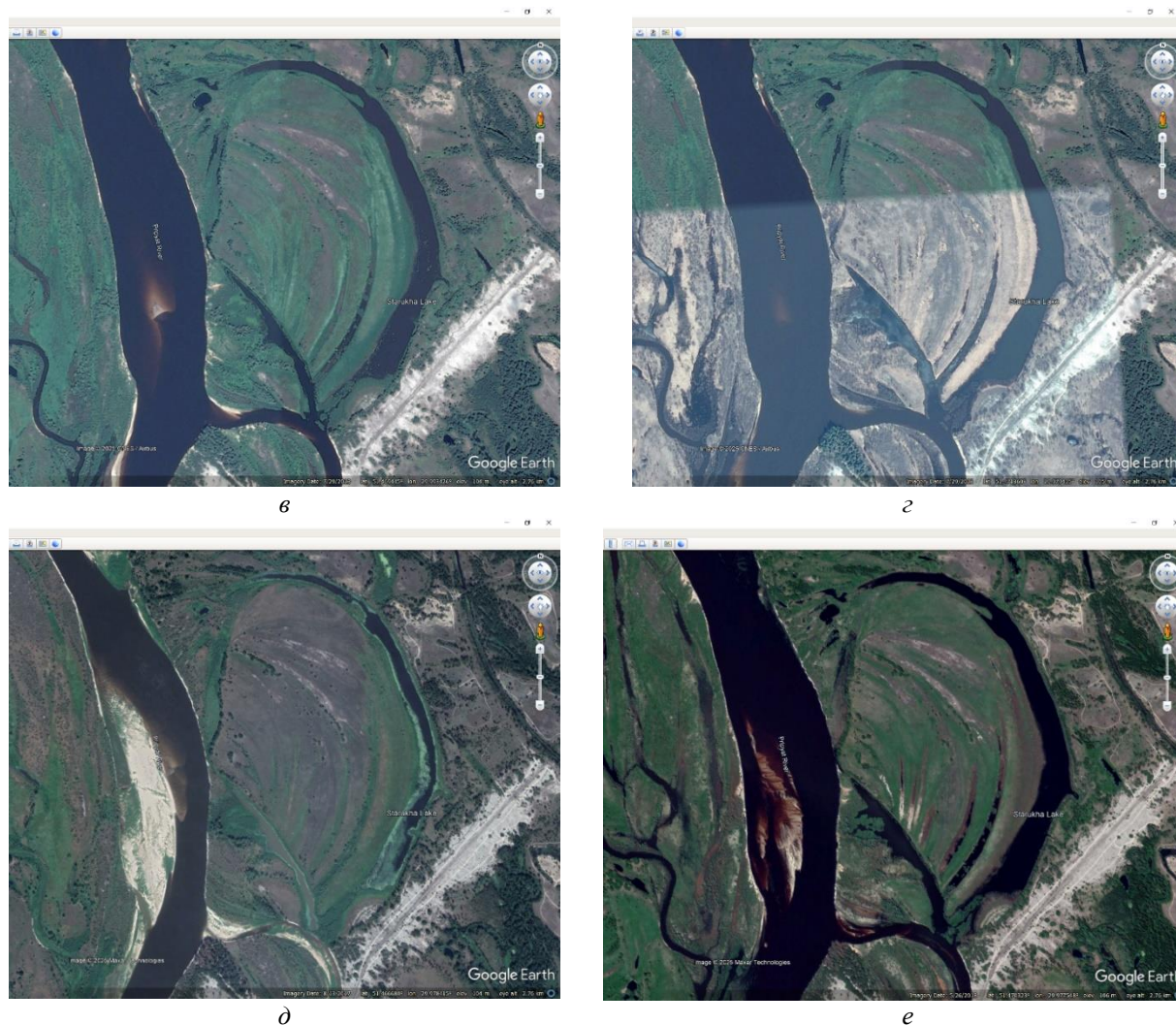


Рис. 3. Космічні знімки оз. Старуха в ЧЗВ на: 21.07.2002 р. (а), 07.05.2013 р. (б), 29.07.2013 р. (в), 11.03.2014 р. (з), 13.08.2017 р. (д) і 26.05.2018 р. (е).

(Google Earth Pro, https://www.google.com/intl/en_uk/earth/about/versions/#earth-pro)

(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Об'єктами дослідження були обрані хижи риби: білизна звичайна (*Aspius aspius* L.), судак звичайний (*Stizostedion lucioperca* L.), щука звичайна (*Esox lucius* L.) і окунь звичайний (*Perca fluviatilis* L.). З «мирних» видів риб вивчали: краснопірку звичайну (*Scardinius erythrophthalmus* L.), плоскирку (*Blicca bjoerkna* L.), плітку звичайну (*Rutilus rutilus* L.), синця звичайного (*Ballerus ballerus* L.) і ляща (*Abramis brama* L.).

Виллов риби проводили у 2000, 2001 та 2006 рр. [9, 18], а також у 2016 та 2018 рр. (таблиця). Масу риби вимірювали на вагах з точністю 1 г, а також, за допомогою лінійки, її загальну довжину (TL) з точністю 1 см. Відбір зразків м'язової та кісткової тканин з хребта риби проводили після видалення шкіри відповідно до загальноприйнятого протоколу відбору зразків EMERGE [5] з дотриманням вимог Закону України «Про захист тварин та жорстокого поводження» від 21.02.2006

№ 3447-IV. Відібрані зразки, до проведення вимірювань активності радіонуклідів, зберігали в морозильній камері за температури -20°C .

Вимірювання активності ^{137}Cs у м'язовій тканині риб проводили в пластикових ємностях об'ємом 5, 20 і 100 cm^3 на гамма-спектрометричному комплексі, з багатоканальним аналізатором ASPEC-927 (програмне забезпечення GammaVision 32) та детектором з високочистого германію GEM-30185 фірми «EG & G ORTEC» (США) з енергетичним розрізненням 1,78 кеВ по лінії ^{60}Co 1,33 МеВ в низькофоновому пасивному захисті. Мінімальна детектована активність ^{137}Cs становила 0,1 Бк. Для вимірювання активності ^{137}Cs у відібраних зразках тканин риби використовували калібрувальні еталонні джерела з відомою активністю [5, 7, 8]. Відносна похибка вимірювання активності ^{137}Cs у зразках не перевищувала 10 %.

Розмір вибірок риби (N), середньоегеометрична маса та питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині риби (GM-GSD $^{\pm 1}$) в оз. Старуха

Вид риби	Дата відбору	N	Маса риби, г			Довжина риби, см		Питома активність ^{137}Cs , Бк·кг $^{-1}$		
			GM	Min	Max	Min	Max	GM	Min	Max
Краснопірка звичайна	06.09.2001	28	46·2,1 $^{\pm 1}$	20	230	9	22	292·2,1 $^{\pm 1}$	100	1273
	06.07.2006	7	97·1,4 $^{\pm 1}$	60	130	14	17,5	470·2,4 $^{\pm 1}$	143	1118
Плоскирка	06.09.2001	8	37·1,7 $^{\pm 1}$	22,5	60	11	16,5	190·1,1 $^{\pm 1}$	167	208
Плітка звичайна	30.06.2001	1	100			16,5		273		
Синець звичайний	06.09.2001	1	65			17		144		
Лящ	13.10.2016	1	1780			54,5		40		
Білізна звичайна	19.09.2001	4	246·1,7 $^{\pm 1}$	130	400	22	30	599·1,9 $^{\pm 1}$	304	1363
	06.07.2006	1	65			17		498		
	13.10.2016	4	804·2,7 $^{\pm 1}$	200	1730	20	60	364·1,7 $^{\pm 1}$	230	790
Судак звичайний	19.09.2001	3	2182·1,7 $^{\pm 1}$	1300	3650	51	72	785·1,7 $^{\pm 1}$	435	1166
	30.08.2006	2	2045·1,1 $^{\pm 1}$	1900	2200	55	56	526·1,7 $^{\pm 1}$	360	770
	13.10.2016	5	1906·1,3 $^{\pm 1}$	1390	2800	49,5	70	543·1,7 $^{\pm 1}$	220	730
Щука звичайна	04.10.2000	37	518·2,5 $^{\pm 1}$	175	6200	27	89	892·1,8 $^{\pm 1}$	351	3729
	19.09.2001	51	798·3,1 $^{\pm 1}$	150	7500	26	98	833·1,8 $^{\pm 1}$	284	2663
	06.12.2006	20	1348·2,5 $^{\pm 1}$	280	6500	30,5	86	874·1,6 $^{\pm 1}$	390	3560
	13.10.2016	6	2798·1,4 $^{\pm 1}$	1760	4885	61	88	413·1,4 $^{\pm 1}$	270	600
	03.10.2018	5	1244·2,4 $^{\pm 1}$	400	3100	43	77	434·1,4 $^{\pm 1}$	281	672
Окунь звичайний	06.09.2001	57	56·2,0 $^{\pm 1}$	33	310	10	25	546·1,6 $^{\pm 1}$	122	1654
	04.09.2006	3	218·1,7 $^{\pm 1}$	130	360	20	25	812·2,9 $^{\pm 1}$	260	2200

Активність ^{90}Sr у кістковій тканині риби вимірювали після озолення проб у муфельній печі за температури 550 °С, прямим методом на бета-спектрометрі СЕБ-01-70 (АКП, Україна). Мінімум детектована активність ^{90}Sr становила 1 Бк [5, 7, 8]. Зольність кісток риби становила 20 ± 3 %. Перевірка точності вимірювань проводилася повторним вимірюванням зразків за допомогою класичного радіохімічного аналізу, що також використовувався для вимірювання активності ^{90}Sr у воді [19]. Відносна похибка вимірювання активності ^{90}Sr у зразках не перевищувала 10 %.

Як правило, одночасно з виловом риби в оз. Старуха проводився відбір проб води об'ємом 50 л з глибини 1 - 2 м на відстані не менше 10 м від берега. Відібрана вода фільтрувалася через фільтр 1 мкм. Вміст ^{137}Cs у воді визначали після його концентрування за допомогою системи Анфеж® або після осадження ^{137}Cs на катіоніт КУ-8 (Україна), згідно з методикою, описаною нами раніше [5]. Розчинений у воді ^{90}Sr осаджувався з карбонатами, після чого проводилося радіохімічне виділення ^{90}Sr стандартними методами [18]. Хімічний вихід ^{90}Sr визначався за допомогою стабільного стронцію, який вносився в пробу перед концентруванням.

Вимірювання концентрації у воді K^+ та Ca^{2+} здійснювали електрохімічним методом за допомогою іоніміра (Horiba LAQUAtwin, Японія).

Зразки тканин риби перед вимірюванням активності радіонуклідів зважували на вагах KERN pfb (Німеччина) з точністю до 0,1 г. Усі результати визначення питомої активності радіонуклідів у тканинах риби подані з урахуванням природного вмісту води у зразках (WM).

Для аналізу експериментальних даних, а саме: отримання середніх арифметичних та геометричних значень, стандартних відхилень і коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена, використовувався стандартний набір інструментів програми MS Excel 2016 р. Оскільки розподіл питомої активності радіонуклідів у тканинах риби та риби цілком підпорядковується логнормальному закону розподілу випадкових величин [9, 14, 15], то для характеристики вибірок риби одного виду, які було відловлено одночасно з водойми, використовувалися середньоегеометричні значення (GM) та геометричні стандартні відхилення (GSD). Достовірність відмінностей між вибірками аналізували за допомогою непараметричного критерію Манна - Уїтні та Краскала - Уолліса [20]. Статистична значущість встановлена на рівні $p < 0,05$.

3. Результати дослідження та їх обговорення

Питома активність ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді оз. Старуха у літньо-осінній період 2000 - 2006 рр. (не під час повені) становила 1 - 2 і 0,10 - 0,15 Бк·л $^{-1}$

та в 2016 - 2018 рр. – 0,5 - 1,0 і 0,05 - 0,10 Бк·л⁻¹ відповідно. Питома активність радіонуклідів у воді озера було на два порядки величини менше порівняно із закритим оз. Глибоке (50 - 100 і 3 - 5 Бк·л⁻¹), яке розташоване на відстані близько 4 км у південно-східному напрямку ближче до ЧАЕС (див. рис. 1) [3, 5]. Концентрація катіонів калію та кальцію у воді змінювалася в межах від 0,5 до 1,5 мг·л⁻¹ (K⁺) та від 30 до 60 мг·л⁻¹ (Ca²⁺) [9] і була близькою до їхньої концентрації в

оз. Глибоке [3, 5].

У таблиці наведено усереднені дані щодо маси, довжини та питомої активності ¹³⁷Cs у м'язовій тканині риб, виловлених в озері у різний час. У даній водоймі спостерігається хороша кореляція між загальною довжиною (TL) і масою окуня ($R^2 = 0,95$) і щуки ($R^2 = 0,98$) (рис. 4). Отримані залежності добре корелюють з даними інших досліджень [21] і вказують на максимальний вік окуня і щуки 6 - 8 і 18 - 20 років відповідно.

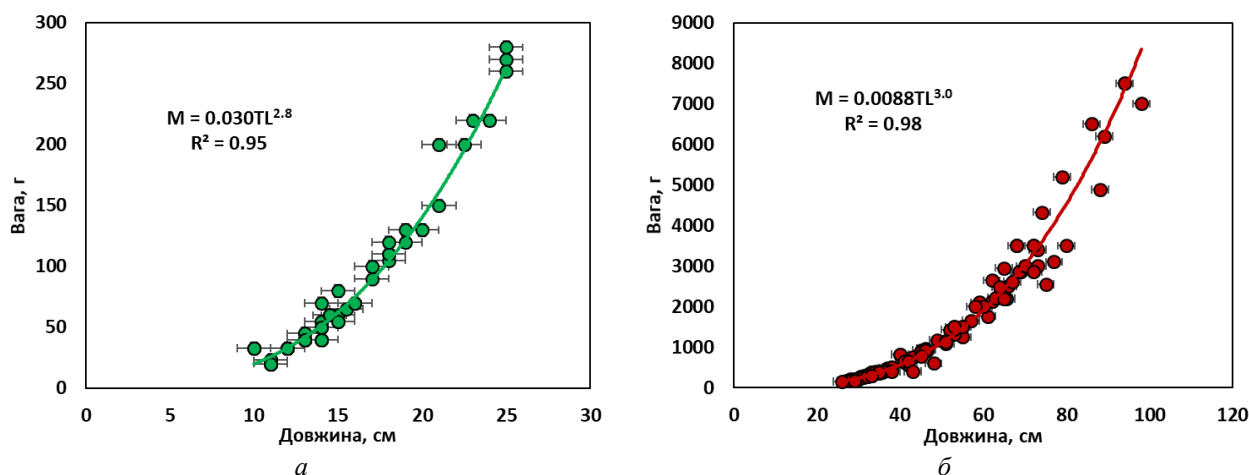


Рис. 4. Співвідношення між загальною довжиною (TL) і масою (M) окуня (а) та щуки (б).
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Загалом питома активність ¹³⁷Cs у хижих риб була вищою порівняно з мирними рибами (див. таблицю). Максимальні рівні питомої активності ¹³⁷Cs у м'язовій тканині риб 3,7 і 3,6 кБк·кг⁻¹ були зафіксовані у щук масою 6,2 і 1,65 кг, виловлених 04.10.2000 р. та 30.08.2006 р. (див. таблицю, рис. 5 і 6). При цьому, як видно з отриманих

результатів (див. рис. 5), щукам з максимальною масою не завжди властиве максимальне забруднення радіоцезієм. Так щуки масою 7,0 та 7,5 кг у 2001 р. мали забруднення м'язової тканини тільки 0,9 і 1,8 кБк·кг⁻¹, а у 2006 р. при масі 6,5 - 1,0 кБк·кг⁻¹ відповідно.

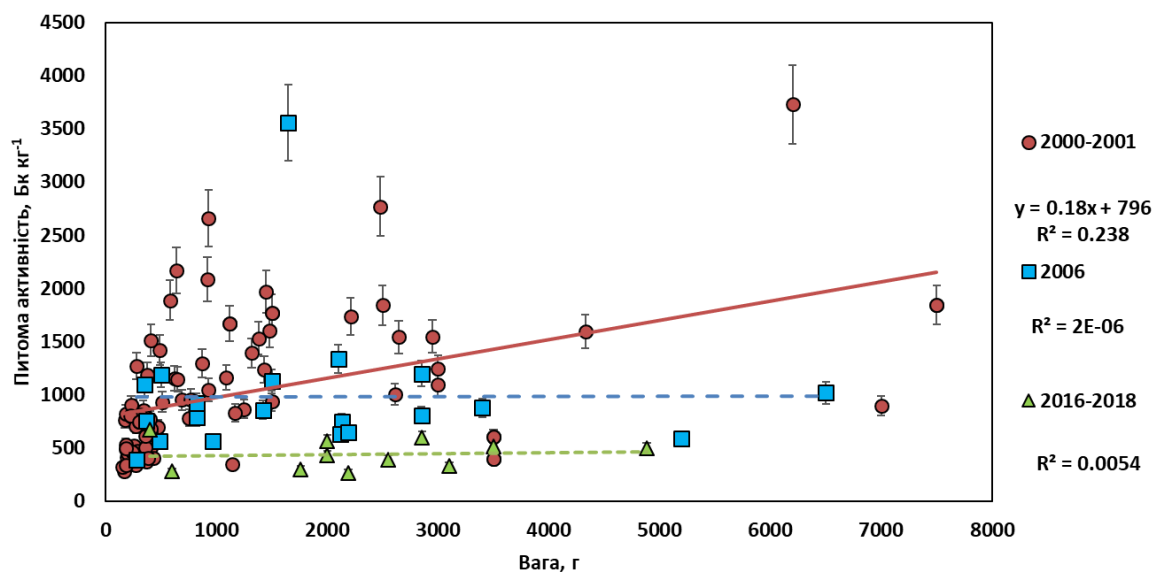


Рис. 5. Залежність питомої активності ¹³⁷Cs в м'язовій тканині від маси щуки.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

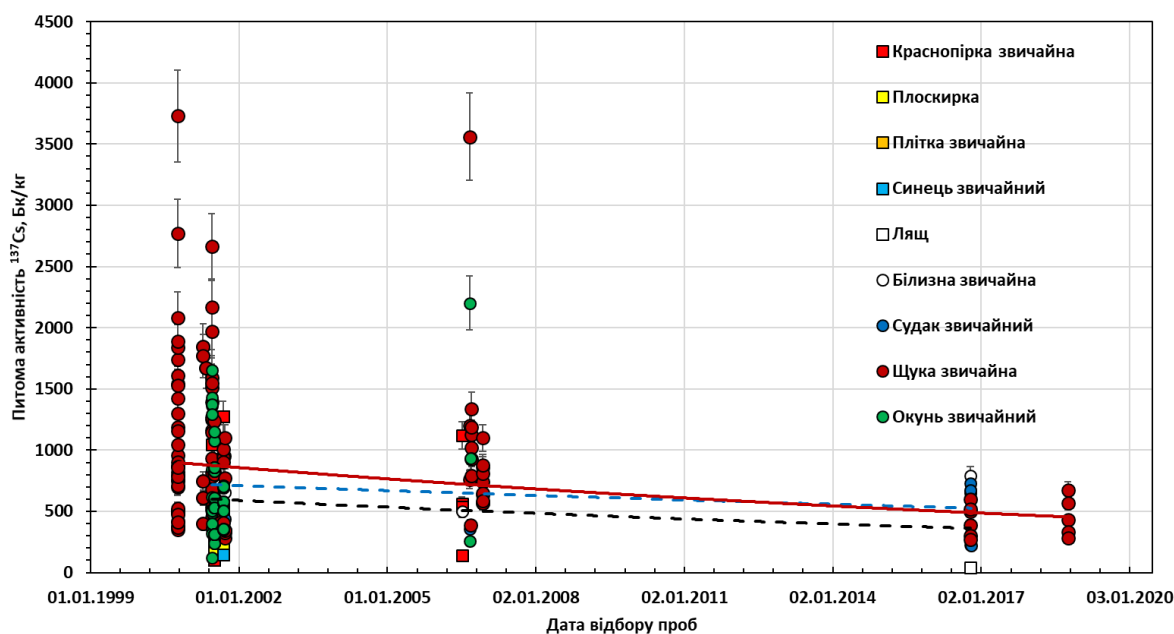


Рис. 6. Динаміка питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині риб оз. Старуха.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

У всіх рибах, крім ляща, середньгеометрична питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині перевищувала допустимі рівні $150 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$. Питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині досить великого ляща довжиною 55 см (маса 1,78 кг, 13.10.2016 р.) була мінімальною серед усіх проаналізованих риб і становила всього $40 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (див. таблицю), що в 4 рази менше порівняно з допустимими рівнями ДР-2006 (150 Бк/кг) і, можливо, пов'язано як з його специфічним раціоном харчування, так і можливим заходом в озеро з річки Прип'ять у квітні - травні 2016 р. під час паводку. Аналогічне співвідношення між середньою питомою активністю ^{137}Cs у лящі та судаку з білизнаю ($0,1 - 0,5$) спостерігалось і в інших водоймах ЧЗВ упродовж 2018 - 2019 рр. [3].

Достовірної кореляції між масою та питомою активністю ^{137}Cs у м'язовій тканині («розмірний ефект») для мирних риб виявлено не було, що узгоджується з результатами для закритих водойм [3, 6, 9]. Тільки для хижих риб у оз. Старуха, як і в інших закритих водоймах лівобережної заплави [3, 6], у деяких випадках спостерігалася помірна, за шкалою Чеддока, кореляція між питомою активністю ^{137}Cs та масою риб: для щуки в 2000 та 2001 рр. (див. рис. 5) коефіцієнт рангової кореляції Спірмена становив $R = 0,49$ за рівня значимості $< 0,01$ ($N = 88$) [9], а для судака у 2016 р. $R = 0,64$ за рівня значимості $< 0,2$ ($N = 6$).

У окуня звичайного, масою менше $0,1 \text{ кг}$, у 2001 та 2006 рр. питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині $GM = 481 \cdot 1,5^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 43$) була в 2 рази менша порівняно з більш великими рибами масою понад $0,1 \text{ кг}$ – $799 \cdot 1,9^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 16$). Це

обумовлено різним раціоном живлення дрібної та великої риби [6].

Слід зазначити високу варіабельність питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині риб оз. Старуха. Стандартне геометричне відхилення питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині червонопірки в цьому озері в 2001 - 2006 рр. становило $GSD = 2,2$ ($N = 35$), що було вище значень для закритої водойми оз. Глибоке $GSD = 1,8$ ($N = 234$) [6]. Стандартні геометричні відхилення питомої активності ^{137}Cs у щуці в оз. Старуха ($N = 119$) та оз. Глибоке ($N = 37$) були однакові $GSD = 1,4 - 1,8$, що вказує на осілий характер її перебування у водоймах. В оз. Старуха для окуня масою менше та більше $0,1 \text{ кг}$ стандартні геометричні відхилення питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині становили $GSD = 1,5$ ($N = 35$) і $GSD = 1,9$ ($N = 16$) відповідно. Тоді як для закритого оз. Глибоке ці значення були суттєво меншими – $GSD = 1,15$ ($N = 7$) і $GSD = 1,18$ ($N = 10$).

На рис. 6 наведено динаміку питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині риб оз. Старуха. Ефективний період напівзменшення питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині щуки звичайної становив 19 років ($R^2 = 0,90$), судака звичайного – 30 років ($R^2 = 0,50$) і білизни звичайної – 21 рік ($R^2 = 0,99$). Такі значення, в основному, зумовлені радіоактивним розпадом ^{137}Cs . Отже, середньгеометрична питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині щуки, судака і білизни в оз. Старуха тільки до 2047, 2072 і 2043 років, відповідно, досягне рівня гігієнічного нормативу – $150 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$. При цьому неперевикнення питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині окремих риб з імовірністю 95 % буде досягнуто через 50 - 100 років.

Середньогометрична питома активність ^{90}Sr у хребтовій кістковій тканині судака у жовтні 2016 р. становила $281 \cdot 1,2^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 5$), білизни – $573 \cdot 1,3^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 4$) і щуки – $646 \cdot 1,3^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 3$). При цьому коефіцієнт варіації питомої активності ^{90}Sr в кістковій тканині судака становив усього 16 %, білизни – 26 % і щуки – 29 %. У цей же час мінімальна питома активність ^{90}Sr в хребтовій кістковій тканині була виявлена у великого ляща – $173 \pm 35 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Упродовж 2018 - 2019 рр. у закритих водоймах та р. Прип'ять у ЧЗВ питома активність ^{90}Sr у білизні, судаку та лящі статистично достовірно не відрізнялася [3]. Оскільки ^{90}Sr переважно надходить у рибу безпосередньо з води, практично не виводиться з кісткової тканини риб, а зміна його вмісту зумовлена зростанням риби [5, 7, 8], то менша питома активність ^{90}Sr в хребтовій кістковій тканині судака і ляща порівняно з білизною і щукою може бути зумовлена більшим часом перебування їх у «чистішій» воді р. Прип'ять (наявності «чистої» кісткової тканини) порівняно з оз. Старуха. Враховуючи той факт, що питома активність ^{90}Sr у кістковій тканині риб більше, ніж у 100 разів перевищує питому активність м'язової тканини [7, 22], можна зробити висновок, що в даний час філе риби (м'язова тканина без кісток, шкіри та луски) з оз. Старуха буде відповідати ДР-2006 ($35 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$).

Середньогометричні рівноважні коефіцієнти накопичення (CR , відношення питомої активності радіонукліда в тканині риб ($\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$) до питомої активності у воді ($\text{Бк} \cdot \text{л}(\text{кг})^{-1}$) для ^{137}Cs у м'язовій тканині мирної та хижої риби становили 1000 - 3500 та 4000 - 7000 відповідно. Ці дані добре співвідносяться з результатами інших досліджень у закритих водоймах ЧЗВ [3, 4, 6, 9]. Значення CR 500 - 1000 ^{90}Sr у хребтовій кістковій тканині щуки у 2016 р. в оз. Старуха також відповідає аналогічним даним для оз. Глибоке [6], що вказує на осілий характер перебування щуки в оз. Старуха.

4. Висновки

У результаті проведених протягом 2000 - 2018 рр. експериментальних досліджень були отримані значення питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs в різних видах риб у заплавному оз. Старуха р. Прип'ять на північно-західному сліду радіоактивних випадів у ЧЗВ. Аналіз результатів пока-

зав, що найбільші рівні питомої активності ^{137}Cs спостерігалися в м'язовій тканині щуки у 2000 і 2006 рр. (до $3,7 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), а найменші – у ляща ($40 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$) у 2016 р. У всіх рибах, крім ляща, середньогометрична питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині перевищувала допустимі рівні $150 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Достовірної кореляції між масою та питомою активністю ^{137}Cs у м'язовій тканині («розмірний ефект») для мирних риб виявлено не було. Тільки для хижих риб у оз. Старуха, як і для інших закритих водойм лівобережної заплави, в деяких випадках, спостерігалася помірна (за шкалою Чеддока) кореляція. Питомі активності ^{137}Cs у м'язовій тканині риб у оз. Старуха характеризувалися високою варіабельністю: геометричне стандартне відхилення (GSD) цієї величини досягало 2,2 у краснопірки, 1,8 у щуки та 1,9 у окуня.

Ефективний період напівзменшення питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині щуки звичайної в оз. Старуха становив 19 років, судака звичайного – 30 років і білизни звичайної – 21 рік. Отже, середньогометрична питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині цих риб лише до 2043 - 2072 рр. досягне рівня гігієнічного нормативу $150 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$. При цьому неперевіщення питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині окремих риб з імовірністю 95 % буде досягнуто лише через 50 - 100 років.

Середньогометрична питома активність ^{90}Sr у хребтовій кістковій тканині судака у жовтні 2016 р. становила $281 \cdot 1,2^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 5$), білизни – $573 \cdot 1,3^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 4$) і щуки – $646 \cdot 1,3^{\pm 1} \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($N = 3$). У цей же час мінімальна питома активність ^{90}Sr у хребтовій кістковій тканині була виявлена у великого ляща – $173 \pm 35 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$, що може бути зумовлено деяким часом перебування цієї риби за час життя у «чистішій» воді р. Прип'ять.

Середньогометричні рівноважні коефіцієнти накопичення ^{137}Cs у рибі оз. Старуха відповідали аналогічним значенням для закритих водойм ЧЗВ. Це може вказувати на потенційну небезпеку міграції риби із заплавлених озер ЧЗВ під час паводку в р. Прип'ять та Київське водосховище.

Автори висловлюють подяку НУБіП України за підтримку цієї роботи в рамках теми 110/6-пр-2024 (№ держреєстрації 0124U001260) і 110/7-пр-2024 (№ держреєстрації 0124U001053).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді (ДР-2006). Гігієнічний норматив ГН 6.6.1.1-130-2006. / Permissible levels of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in food and drinking water (DR-2006). Hygienic standard of the State Sanitary and Epidemiological Service. HS 6.6.1.1-130-2006. (Ukr)
2. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of*

- Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments*. Technical reports series No. 472 (Vienna, IAEA, 2010) 208 p.
3. О.Є. Каглян та ін. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика* 22(1) (2021) 62. / A.Ye. Kaglyan et al. Dynamics of specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs in representatives of ichthyofauna of Chornobyl exclusion zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(1) (2021) 62. (Ukr)
 4. О.Є. Каглян та ін. Потужність поглиненої дози зовнішнього опромінення представників іхтіофауни озер у Чорнобильській зоні відчуження. *Ядерна фізика та енергетика* 25(2) (2024) 141. / A.Ye. Kaglyan et al. The absorbed dose rate of external exposure to representatives of ichthyofauna of lakes in the Chornobyl exclusion zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 25(2) (2024) 141. (Ukr)
 5. H.-C. Teien et al. Seasonal changes in uptake and depuration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in silver Prussian carp (*Carassius gibelio*) and common rudd (*Scardinius erythrophthalmus*). *Sci. Total Environ.* 786 (2021) 147280.
 6. М.О. Гречанюк та ін. Радіоактивне забруднення і дози внутрішнього опромінення риби в озері Глибоке Чорнобильської зони відчуження. *Наукові доповіді НУБіП України* 3(97) (2022) 1. / M. Hrechaniuk et al. Radioactive contamination and doses of internal irradiation of fish in the Deep lake of the Chornobyl exclusion zone. *Sci. Rep. Natl. Univ. Life Environ. Sci. Ukr.* 3(97) (2022) 1. (Ukr)
 7. O. Kashparova et al. Clean feed as countermeasure to reduce the ^{90}Sr and ^{137}Cs levels in fish from contaminated lakes. *J. Environ. Radioact.* 258 (2023) 107091.
 8. P. Pavlenko et al. Testing countermeasures to reduce ^{90}Sr content in fish products. *J. Environ. Radioact.* 271 (2024) 107316.
 9. Ю.В. Хомутинин, В.А. Кашпаров, А.В. Кузьменко. Зависимость коэффициентов накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr рыбой от содержания калия и кальция в воде пресноводного водоема. *Радиационная биология. Радиоэкология* 51(3) (2011) 374. / Yu.V. Khomutinin, V.A. Kashparov, A.V. Kuz'menko. Dependences of ^{137}Cs and ^{90}Sr concentration ratios in fish on the potassium and calcium concentrations in the freshwater reservoirs. *Radiats. Biol. Radioecol.* 51(3) (2011) 374. (Rus)
 10. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. Radiological Assessment Reports Series (Vienna, IAEA, 2006) 180 p.
 11. I.G. Travnikova et al. Lake fish as the main contributor of internal dose to lakeshore residents in the Chernobyl contaminated area. *J. Environ. Radioact.* 77(1) (2004) 63.
 12. V. Kashparov et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth Syst. Sci. Data* 10 (2018) 339.
 13. V. Kashparov et al. Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987. *Earth Syst. Sci. Data* 12 (2020) 1861.
 14. Ю.В. Хомутинин и др. Прогноз динамики и риска превышения допустимого содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в рыбе Киевского водохранилища на поздней фазе Чернобыльской аварии. *Радиационная биология. Радиоэкология* 53(4) (2013) 411. / Yu.V. Khomutinin et al. Forecast of the dynamics and risk of exceeding the permissible content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in fish of the Kyiv reservoir in the late phase of the Chornobyl accident. *Radiats. Biol. Radioecol.* 53(4) (2013) 411. (Rus)
 15. Ю.В. Хомутинин. Оцінка радіоекологічної безпеки прісноводних водойм України на пізній стадії аварії на ЧАЕС. *Ядерна фізика та енергетика* 15(4) (2014) 389. / Yu.V. Khomutinin. Evaluation of radioecological safety of freshwater reservoirs in Ukraine during late phase of ChNPP accident. *Nucl. Phys. At. Energy* 15(4) (2014) 389. (Ukr)
 16. Ю.В. Хомутинин, В.А. Кашпаров. Оптимизация отбора проб для оценки удельной активности и коэффициентов накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr рыбой. *Ядерна фізика та енергетика* 17(2) (2016) 189. / Yu.V. Khomutinin, V.O. Kashparov. Optimization of fish sampling procedure for evaluating the specific activity of ^{137}Cs , ^{90}Sr and accumulation coefficients. *Nucl. Phys. At. Energy* 17(2) (2016) 189. (Rus)
 17. V. Kashparov et al. Uptake from water and depuration of ^{137}Cs and ^{90}Sr by silver Prussian carp (*Carassius gibelio*). *J. Environ. Radioact.* 276 (2024) 107443.
 18. Звіт про науково-дослідну роботу «Вивчення закономірностей поведінки радіонуклідів та інших важких металів у водних екосистемах на забруднених у результаті Чорнобильської катастрофи територіях». № 0106U004248 (Київ, НУБіП України 2008) 91с. / Report on the research work "Study of the patterns of behavior of radionuclides and other heavy metals in aquatic ecosystems in the territories contaminated as a result of the Chernobyl disaster", No. 0106U004248 (Kyiv, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2008) 91 p. (Ukr)
 19. Ф.И. Павлоцкая. Основные принципы радиохимического анализа объектов окружающей среды и методы определения радионуклидов стронция и трансурановых элементов. *Журнал аналитической химии* 52(2) (1997) 126. / F.I. Pavlotskaya. Basic principles of radiochemical analysis of environmental objects and methods for determination of strontium radionuclides and transuranic elements. *J. Anal. Chem.* 52(2) (1997) 126. (Rus)
 20. С. Гланц. *Медико-биологическая статистика* (Москва: Практика, 1998) 459 с. / S. Glantz. *Medico-Biological Statistics* (Moscow: Praktika, 1998) 459 p. (Rus)
 21. <https://fisher-club.com/news/spravka/1-0-9>
 22. T.L. Yankovich et al. Whole-body to tissue concentration ratios for use in biota dose assessments for animals. *Radiat. Environ. Biophys.* 49 (2010) 549.

V. O. Kashparov^{1,*}, S. Ye. Levchuk¹, D. M. Holiaka¹, Yu. V. Khomutinin¹,
V. P. Protsak¹, D. M. Kondratiuk², M. A. Zhurba¹

¹ Ukrainian Institute of Agricultural Radiology,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Drevlianskyi Nature Reserve, Narodychi, Ukraine

*Corresponding author: kashparov@nubip.edu.ua

RADIOACTIVE CONTAMINATION OF FISH IN THE FLOODING LAKE STARUKHA IN THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

After the accidents at the Chornobyl NPP in 1986 and the Fukushima-1 NPP in 2011, the activity concentration of radionuclides in fish in radioactively contaminated freshwater bodies reached hundreds of kBq kg⁻¹ and exceeded international and national permissible levels. The work aimed to determine the content of radionuclides in different fish species in “the semi-closed” flooding Starukha Lake, which is located in the north-western trace of radioactive fallout in the Chornobyl Exclusion Zone (ChEZ). The experimental studies were conducted during 2000 - 2018. The values of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr activity concentrations in different fish species were obtained. The maximum levels of ¹³⁷Cs activity concentration in fish muscle tissue of 3.7 and 3.6 kBq·kg⁻¹ were in pikes, which weighed 6.2 and 1.65 kg and were caught on 04.10.2000 and 30.08.2006, respectively. In 2016 and 2018, the activity concentration of ¹³⁷Cs in muscle tissue and ⁹⁰Sr in bone tissue did not exceed 800 Bq·kg⁻¹. The effective half-lives of ¹³⁷Cs activity concentrations in muscle tissue of pike, pike perch, and common whitefish were estimated to be in the range of 19 - 30 years. The radioactive decay of the radionuclide is the main process governing the activity decreasing. The geometric mean of ¹³⁷Cs activity concentration in the muscle tissue of pike, pike perch, and whitefish in Starukha Lake will decrease below the permissible level of 150 Bq kg⁻¹ by 2043 - 2072. At the same time, the non-exceeding activity concentration of ¹³⁷Cs in the muscle tissue of individual fish with a probability of 95 % will be achieved in 50 - 100 years. Thus, there is a potential threat that fish may migrate during flooding from “semi-closed” lakes in the ChEZ to the Pripyat River and the Kyiv Reservoir.

Keywords: ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, radioecology, Chornobyl accident, Exclusion Zone, radioactive contamination.

Надійшла / Received 18.02.2025