

РАДІОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ І ДОЗИ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ РИБИ В ОЗЕРІ ГЛИБОКЕ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

М. О. ГРЕЧАНЮК, аспірант^{1*}

О. В. КАШПАРОВА, молодший науковий співробітник^{1,2}

П. М. ПАВЛЕНКО, аспірант¹

С. Є. ЛЕВЧУК, кандидат біологічних наук¹

В. І. МАКСІН, доктор хімічних наук, професор^{1,3}

В. О. КАШПАРОВ, доктор біологічних наук, професор^{1,2}

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України

²Center for Environmental Radioactivity (CERAD), Norwegian University of Life Sciences, P.O. Box 5003, N-1432, Ås, Норвегія

³Науково-дослідний інститут "Ресурс" Держагенства України "Резерв"
maksgrek@ukr.net

<https://doi.org/dopovidi2022.03.003>

Анотація. Після аварій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС у радіоактивно забруднених водоймах питома активність радіонуклідів в рибі сягала сотень кБк кг⁻¹. З часом, по мірі покращення радіологічного становища, відбувалось зменшення радіоактивного забруднення риби, але і зараз спостерігаються випадки перевищення допустимих рівнів вмісту в ній радіонуклідів для продуктів харчування.

Метою даної роботи було визначення в реальних умовах вмісту ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs в різних видах риб в одній з найбільш радіоактивно забруднених водойм Чорнобильської зони відчуження – оз. Глибоке.

У результаті проведених експериментальних досліджень протягом 2016-2021 рр. були отримані значення питомої активності ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs у різних видах риб, які в сотні разів перевищували допустимі рівні. Показано, що без використання контрзаходів така ситуація зберігатиметься ще протягом кількох десятиліть.

Результати роботи свідчать про те, що внутрішні дози опромінення риб, обумовлені рівнем їх радіоактивного забруднення, не перевищують допустимих рівнів, які рекомендовані міжнародними організаціями для радіаційного захисту навколишнього середовища.

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

Актуальність. Допустимі воді згідно НРБУ-97 [1] для концентрації ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs у питній населення становлять 10 Бк·л⁻¹ і 100

* Науковий керівник – доктор хімічних наук, професор, В.І.Максін

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максін В. І., Кашпаров В. О.

Бк·л⁻¹, відповідно. В той же час, допустимі рівні вмісту ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs у питній воді в ДР-2006 не виправдано занижені в порівнянні з НРБУ-97 і становлять 2 Бк·л⁻¹ [2]. При таких рівнях радіоактивного забруднення водойм (2 Бк·л⁻¹) питома активність ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs може в тисячі разів перевищувати допустимі рівні вмісту у рибі в Україні, тобто відповідно 35 Бк·кг⁻¹ і 150 Бк·кг⁻¹ [2-11].

При існуючих рівнях питомої активності ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs у водоймах для вимірювання їх величини необхідно відбирати досить великі об'єми води [8]. Для оцінки рівнів забруднення водойм цими радіонуклідами може використовуватись риба, яка є хорошим біоіндикатором радіоактивного забруднення водойм. Також МКРЗ рекомендує використовувати рибу в якості одного з референтних організмів для оцінок впливу іонізуючого випромінювання на біоту з метою радіаційного захисту довкілля [12].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Озеро Глибоке є однією з найбільш радіоактивно забруднених водойм Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) і унікальним полігоном для проведення радіологічних досліджень у прісноводному середовищі в природних умовах [7, 9]. Питома активність ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr в рибі зараз досягає десятків кБк·кг⁻¹ при вмісті у воді о. Глибоке цих радіонуклідів на

рівні 3-5 Бк·л⁻¹ і 50 - 100 Бк·л⁻¹, відповідно [7-11]. При цьому, приблизно, 55–67% ¹³⁷Cs міститься у м'язовій тканині риб, а в кістковій тканині і лусці – до 91–97% активності ⁹⁰Sr [5, 6]. Основний внесок в дозу внутрішнього опромінення риб дає ⁹⁰Sr, а зовнішнього - ¹³⁷Cs, який міститься в донних відкладах озера [5, 8]. За таких умов поглинуті дози опромінення риб можуть досягати 1 Гр [8].

Внутрішня доза опромінення риб визначається вмістом в організмі радіонуклідів, значення яких характеризуються великою варіабельністю, що обумовлена часовою динамікою та суперечливими даними про «розмірний» ефект – залежність вмісту радіонуклідів від маси риб [5-8, 11, 13]. Метаболізм радіонуклідів визначає їх вміст в рибі [9-11, 14, 15]. При цьому, більше 99% активності ¹³⁷Cs надходить в рибу з кормом, а 99% активності ⁹⁰Sr – безпосередньо з води через зябра [10, 11, 15].

Зовнішня доза опромінення риб визначається просторово-часовим розташуванням риб протягом року в шарі води відносно донних відкладень з надзвичайно нерівномірним розподілом питомої активності ¹³⁷Cs [8, 16].

Мета дослідження полягає у визначенні динаміки вмісту радіонуклідів в організмах різних видів риб в оз. Глибоке з ціллю

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максін В. І., Кашпаров В. О.

радіаційного захисту людини і навколишнього середовища шляхом оцінок внутрішніх поглинених доз опромінення в ситуації існуючого хронічного опромінення.

Матеріали і методи дослідження. Експериментальні дослідження з вивчення динаміки вмісту радіонуклідів в рибі проводили в одній з найбільш забруднених радіонуклідами водойм в ЧЗВ – озері Глибоке (51.44480°, 30.06394°) на північно-західному сліду чорнобильських радіоактивних випадів на відстані 6.5 км (338°) від ЧАЕС протягом 2016–2021 років. Довжина озера становить 1.2 км при максимальній ширині 0.25 км і глибині 6–7 м в центральній частині [9-11].

Об'єктами дослідження були обрані хижі риби: щука звичайна (*Esox lucius* L.) і окунь звичайний (*Perca fluviatilis* L.). З «мирних» різновидів риб вивчали представника фітофагів – краснопірку звичайну (*Scardinius erythrophthalmus* L.) та бентофагів – карася сріблястого (*Carassius gibelio* Bloch) і лина (*Tinca tinca* L.).

Після умертвіння риби шляхом удару по голові, на вагах з точністю 1 г вимірювали її масу, а також, за допомогою лінійки, її загальну довжину з точністю 1 мм. Відбір зразків м'язової та кісткової тканин з хребта риби проводили після видалення шкіри у відповідності до загальноприйнятого протоколу

відбору зразків EMERGE [8] з дотриманням вимог Закону України «Про захист тварин та жорстокого поводження» від 21.02.2006 № 3447-IV. Відібрані зразки, до проведення вимірювань радіонуклідів, зберігали в морозильній камері при -20°C.

Вимірювання активності ^{137}Cs у м'язовій тканині риб проводили в пластикових ємностях об'ємом 5 см³ і 10 см³ на γ -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 складала 0,1 Бк. Для вимірювання активності ^{137}Cs у відібраних зразках тканин риби використовували калібрувальні еталонні джерела з відомою активністю [9-11].

Активність ^{90}Sr в кістковій тканині риб вимірювали після озолення проб в муфельній печі при температурі 550°C, прямим методом на бета-спектрометрі СЕБ-01-70 (АКП, Україна). Мінімально детектована активність ^{90}Sr – становила 1 Бк [9-11]. Зольність кісток риби, що використовувалися в експерименті, становила $20 \pm 3\%$. Перевірка точності вимірювань проводилася шляхом повторних вимірювань зразків за допомогою

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максим В. І., Кашпаров В. О.

класичного радіохімічного аналізу, який також використовувався для вимірювання активності ^{90}Sr у м'язовій тканині риб і вмісту радіоізоотопів плутонію [18].

Визначення вмісту стабільних елементів у воді проводилося, після її фільтрації через фільтр 0.45 мкм, за допомогою мас-спектрометра ICP-MS Agilent 8800 (США) згідно методики, описаної нами раніше [9, 11].

Зразки тканин риб перед вимірюванням активності радіонуклідів зважувались на вагах KERN pfb (Німеччина) з точністю до 0,01 г і AXIS AD200 (Польща) з точністю до 0,001 г.

Всі результати вимірювання питомої активності радіонуклідів в тканинах риби приведені для природної вологості зразків (WM).

Для аналізу експериментальних даних, а саме: отримання середніх значень, стандартних відхилень і коефіцієнтів кореляції, використовувався стандартний набір інструментів - MS Excel 2016 року. Достовірність відмінностей між вибірками аналізували з допомогою непараметричного критерію Манна-Уїтні. На рисунках наведені середні значення $\pm$ стандартне відхилення. Статистична значущість встановлена на рівні $p < 0,05$.

Оцінки внутрішньої дози опромінення проводили на підставі виміряних значень питомих активностей радіонуклідів в різних

органах або організму риби в цілому з урахуванням маси і геометричних розмірів (довжина:ширина:висота) з використанням рекомендованих МКРЗ дозових коефіцієнтів (<http://biotadc.icrp.org>).

Результати дослідження та їх обговорення. Протягом останніх 5 років питома активність ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді не сильно змінювалася і становила близько $100 \pm 10 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$ і $4 \pm 1 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$, відповідно. Середній вміст стабільних елементів у воді оз. Глибоке складав: Na - $4.5 \pm 0.4 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; Mg - $3.8 \pm 0.3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; K - $1.2 \pm 0.1 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; Ca - $30 \pm 2 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; Sr - $0.11 \pm 0,04 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$; Cs - $5 \pm 3 \text{ нг} \cdot \text{л}^{-1}$ [9, 11].

Середньоарифметична питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині аборигенних карасів сріблястих (N = 12, 27.03.2019) масою від 320 до 1700 г та линів (N=5, 08.07.2020) масою від 200 до 1100 г оз. Глибоке відповідно складала $6.7 \pm 1.2 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (середнє геометричне $6.6 \cdot 1.2^{\pm 1} \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$) та $3.8 \pm 1.1 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (середнє геометричне $3.7 \cdot 1.4^{\pm 1} \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Такі значення відповідають рівноважним коефіцієнтам накопичення (CF, 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 карася - 1860 ± 615 та лини - 960 ± 280 . Питома активність ^{90}Sr в м'язовій тканині карасів була на порядок менша у порівнянні з ^{137}Cs і становила лише $0.5 \pm 0.3 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (CF = 5 ± 3), при цьому питома активність ^{90}Sr в кістковій тканині карасів та

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максим В. І., Кашпаров В. О.

линів була більш ніж у 100 разів вищою у порівнянні з м'язовою тканиною – 63 ± 16 кБк·кг⁻¹ ($CF = 630 \pm 160$) та 69 ± 14 кБк·кг⁻¹ ($CF = 690 \pm 140$).

Водночас не спостерігалось достовірності кореляції між питомою

активністю ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr в м'язовій та кістковій тканинах аборигенних карасів і їх масою – «розмірний» ефект (рис. 1), що не співпадає з певними літературними даними [13].

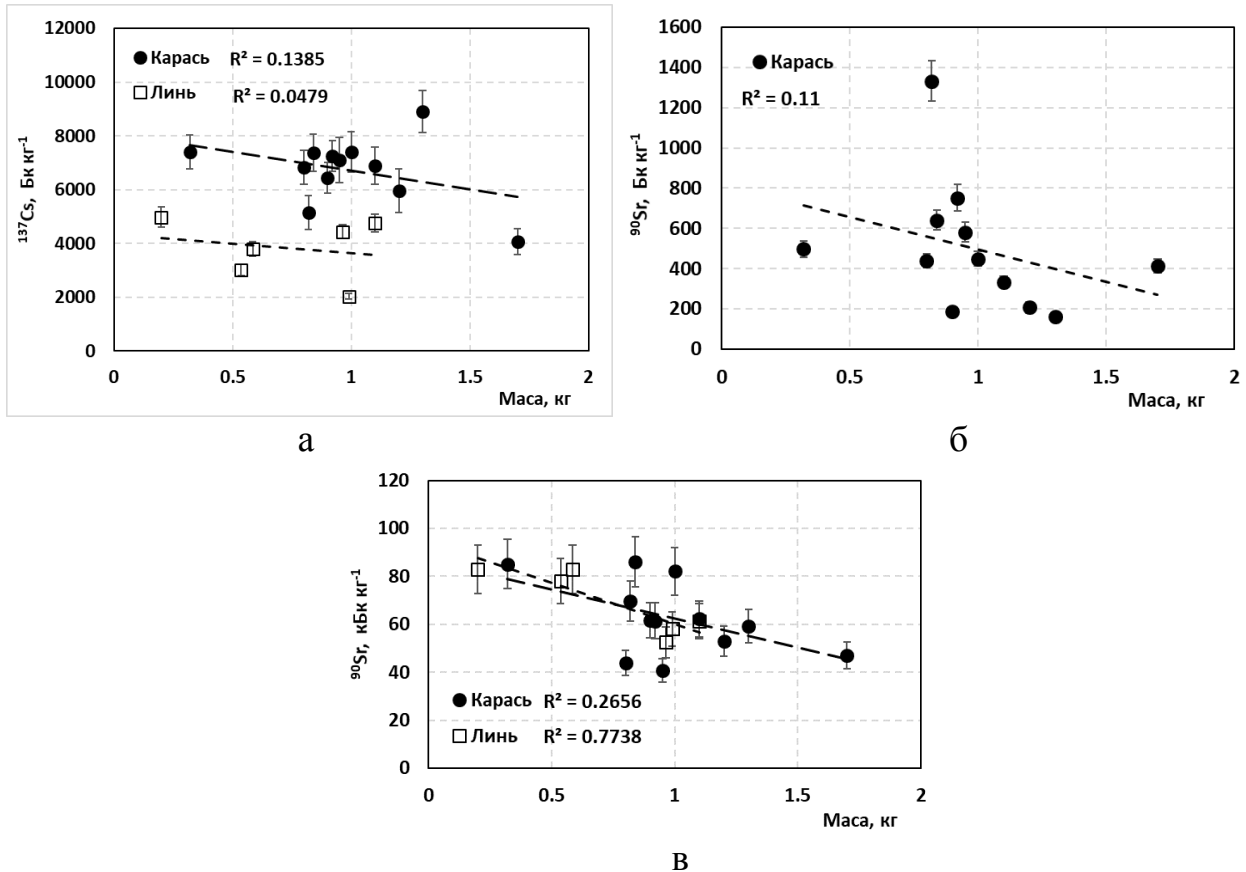
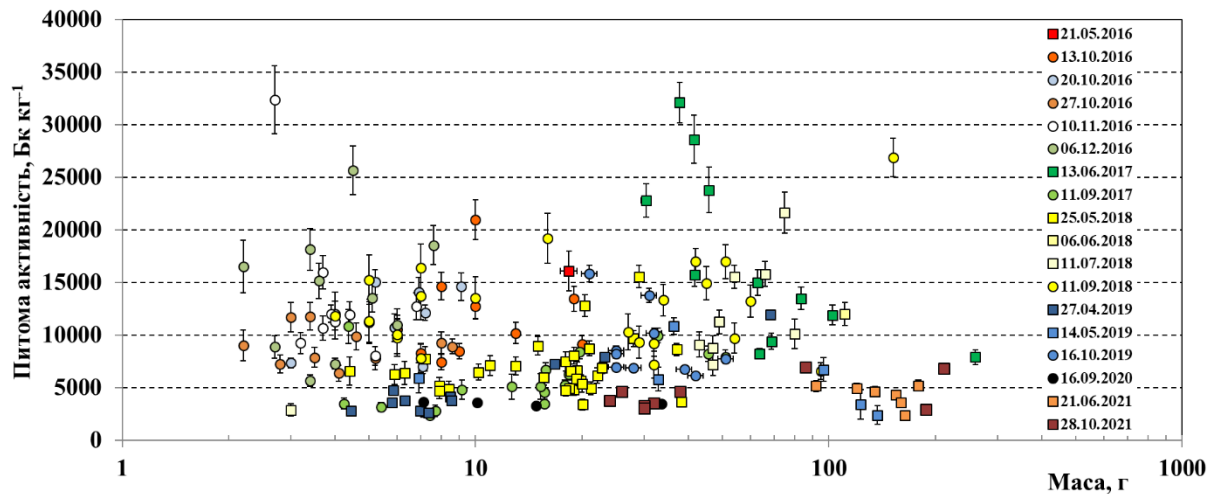


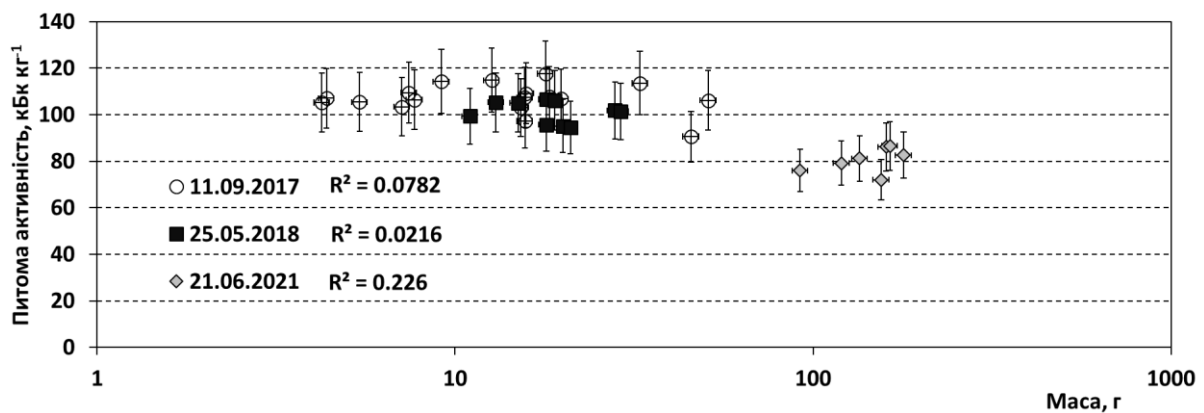
Рис. 1. Питома активність ¹³⁷Cs в м'язовій тканині (а) та ⁹⁰Sr в м'язовій (б) і кістковій (в) тканинах риб в оз. Глибоке.

Значення питомої активності ¹³⁷Cs в м'язовій тканині аборигенних карасірок (N=243) масою 3–260 г, які були відібрані у оз. Глибоке протягом 2016–2021 рр. характеризувалось великою варіабельністю (рис. 2а). Середньоарифметичне значення вибірки склало 9.9 ± 4.2 кБк·кг⁻¹ (середнє геометричне $9.0 \cdot 1.8^{\pm 1}$

кБк·кг⁻¹), що співпадає з літературними даними [6, 7]. Жодних статистично значущих залежностей питомої активності ¹³⁷Cs в м'язовій (рис. 2а) і ⁹⁰Sr в кістковій (рис. 2) тканинах аборигенних карасірок від її маси, або сезону року за час спостереження встановлено не було, що відповідає літературним даним [6, 7].



а



б

Рис. 2. Середня питома активність ^{137}Cs в м'язовій тканині (а) та ^{90}Sr в кістковій (б) тканині краснопірок в 2016–2021 роках в оз. Глибоке.

Період напівзменшення вмісту ^{137}Cs у м'язовій тканині краснопірок різної ваги, спійманих протягом однієї доби в 2016–2021 роках в оз. Глибоке, склав 3.2 роки (Рис. 3),

що приблизно в 2 рази менше у порівнянні з літературними даними [7, 8]. Період напівзменшення вмісту ^{90}Sr у кістковій тканині краснопірок був 9.5 років (Рис. 3)

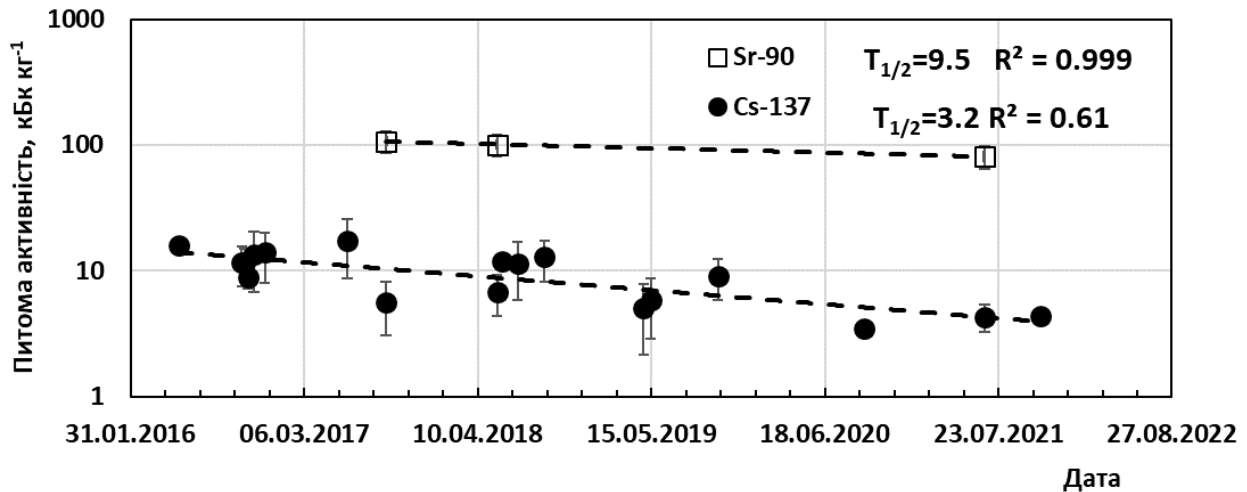
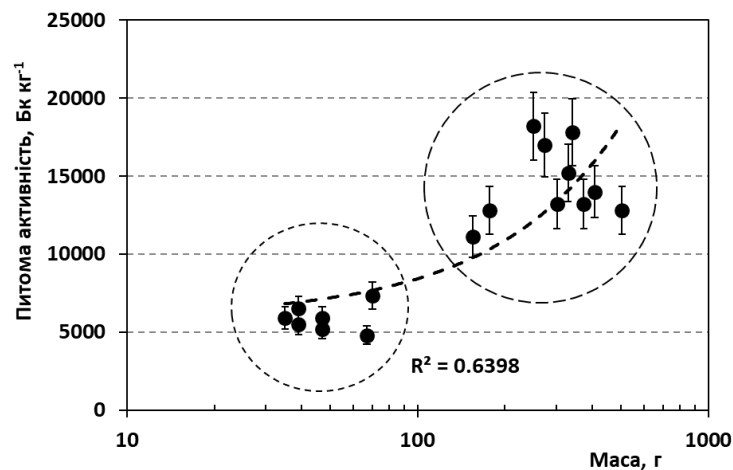


Рис. 3. Динаміка питомої активності ^{137}Cs в м'язовій і ^{90}Sr в кістковій тканині краснопірок різної ваги, спійманих протягом однієї доби в 2016–2021 роках в оз. Глибоке.

У «хижих» риб, таких як окунь звичайний (*Perca fluviatilis*) і щука звичайна (*Esox lucius*), «розмірний» ефект для питомої активності ^{137}Cs у м'язовій тканині є більш вираженим, у порівнянні з «мирними» рибами (рис. 4а і 4б). У окуня масою менше 70 г питома активність ^{137}Cs у м'язовій тканині (близько $5 \text{ kBq} \cdot \text{kg}^{-1}$) була в 3

рази менше, в порівнянні з більш великими рибами масою понад 110 г (близько $15 \text{ kBq} \cdot \text{kg}^{-1}$) – рис. 4а. На наш погляд, це обумовлено різним раціоном живлення окуня з різним вмістом ^{137}Cs . Кореляції між питомою активністю ^{90}Sr в кістковій тканині щук і їх масою в оз. Глибоке не спостерігалось (рис. 4в).



а

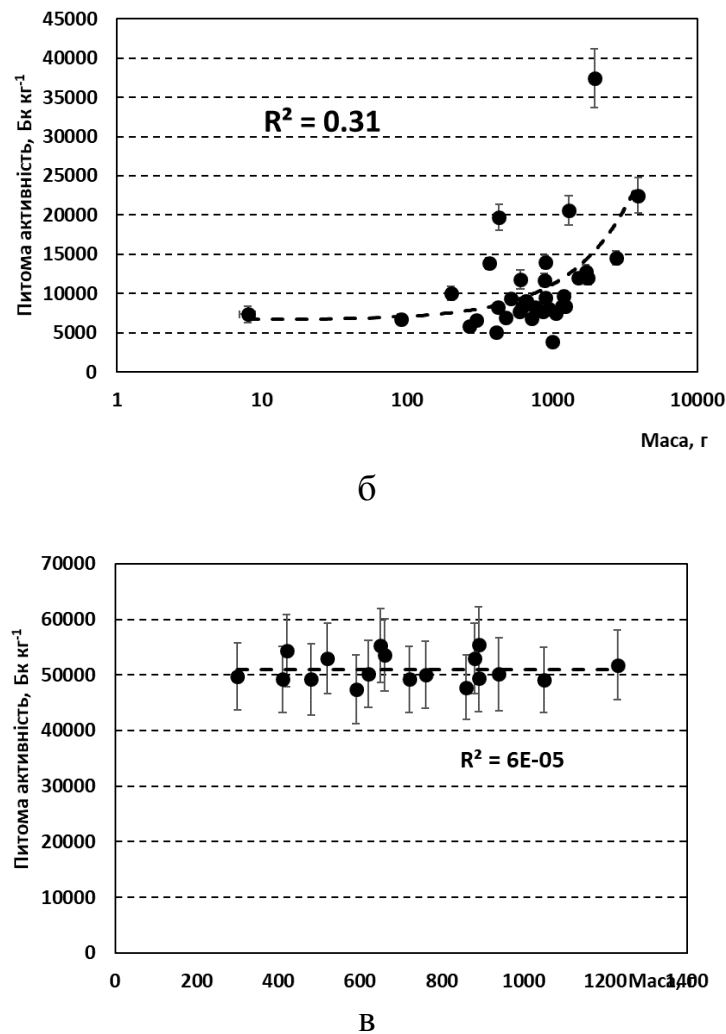


Рис. 4. Питома активність ¹³⁷Cs в м'язовій тканині окуня звичайного – *Perca fluviatilis* (а) і щуці звичайної (*Esox lucius*) (б) та ⁹⁰Sr в кістковій тканині (в) щуки в 2016–2019 роках в оз. Глибоке.

Активність трансуранових елементів в органах риб була значно нижче, у порівнянні з ⁹⁰Sr і ¹³⁷Cs. Питома активність альфа (²³⁸⁻²⁴⁰Pu і ²⁴¹Am) і бета (²⁴¹Pu) випромінюючих ізотопів в кістковій тканині риб не перевищувала 3-5 Бк·кг⁻¹ і 50-70 Бк·кг⁻¹, відповідно.

Питома активність ⁹⁰Sr і ¹³⁷Cs в печінці риб була на рівні м'язової тканини, в той час як ²³⁸⁻²⁴⁰Pu (до 30 Бк·кг⁻¹) і ²⁴¹Am (до 50 Бк·кг⁻¹) – на порядок більше, в порівнянні з м'язовою тканиною.

Отримані результати показали, що найбільші рівні питомої активності ¹³⁷Cs спостерігалися в м'язовій тканині щуки (до 37.4 ± 3.7 кБк·кг⁻¹) (Рис.4б), а найбільші питомі активності ⁹⁰Sr спостерігалися в кістковій тканині краснопірок (до 118 ± 15 кБк·кг⁻¹) (Рис.2б).

Середнє співвідношення між питомою активністю ⁹⁰Sr в організмі прісноводних риб та кістковою тканиною складе 0.14, а між питомою активністю ¹³⁷Cs в організмі риб та

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максим В. І., Кашпаров В. О.

м'язовою тканиною дорівнює 1.1 [19]. Таким чином вміст радіонуклідів в рибі оз. Глибоке в сотні разів перевищує допустимі рівні вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs в свіжій та мороженій рибі в Україні (ДР-2006), 35 Бк·кг⁻¹ і 150 Бк·кг⁻¹, відповідно [2, 3].

На підставі отриманих експериментальних даних проведено розрахунок потужності максимальних поглинутих доз внутрішнього опромінення риб в оз. Глибоке.

Оцінки внутрішньої дози опромінення були зроблені на підставі вимірюваних значень питомих активностей радіонуклідів в різних органах для риб масою 1 кг і пропорцією довжина:висота:ширина = 1:0.2:0.1 з використанням рекомендованих МКРЗ дозових коефіцієнтів (<http://biotadc.icrp.org>)

(табл. 1). З наведених результатів видно, що найбільша потужність внутрішньої поглиненої дози формується в кістковій тканині (^{90}Sr та ^{137}Cs) та прилеглих органах (головний і спинний мозок, нирки, зябра, кришталік ока і т. д.) за рахунок бета-випромінювання ^{90}Sr + ^{90}Y . У м'язовій тканині і тілі риби потужність внутрішньої поглиненої дози буде на порядок менше – (^{90}Sr та ^{137}Cs). Незначна потужність поглиненої дози буде також в печінці – (^{90}Sr та ^{137}Cs), однак з огляду на ваговий коефіцієнт альфа випромінювання (10-20) по відношенню до бета і гамма-випромінювання, еквівалентна доза опромінення організму риб може бути значно вищою, за рахунок альфа випромінювання $^{238-240}\text{Pu}$ і ^{241}Am (табл.1).

1. Оцінки максимальних внутрішніх доз опромінення тканин риби в оз.

Глибоке

Радіонуклід	Максимальна питома активність, кБк/кг			Дозовий коефіцієнт DC, (мкГр·год ⁻¹)/(Бк·кг ⁻¹)	Потужність поглинутої дози, мкГр·год ⁻¹		
	М'язи	Кістки	Печінка		М'язи	Кістки	Печінка
^{90}Sr	0.5	120	0.5	6.2E-04	0.3	74.4	0.3
^{137}Cs	40	15	40	1.8E-04	7.2	2.7	7.2
$^{238-240}\text{Pu}$	0.003	0.004	0.03	3.1E-03	0.01	0.01	0.09
^{241}Pu	0.05	0.06	0.5	5.7E-06	0.0003	0.0003	0.003
^{241}Am	0.005	0.005	0.05	3.2E-03	0.02	0.02	0.16
Всього					7.5	77.1	7.8

У відповідності з рекомендаціями МАГАТЕ і МКРЗ, допустимою дозою, при якій забезпечується захист більш 95% всіх видів риб, являє 417 мкГр·год⁻¹ (10

мГр·доба⁻¹) [12]. Ця допустима доза перевищує наші консервативні оцінки більш ніж в 5 разів (табл. 1).

Висновки і перспективи. В результаті проведених

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максін В. І., Кашпаров В. О.

експериментальних досліджень, в одній з найбільш радіоактивно забруднених водойм ЧЗВ оз. Глибоке, протягом 2016-2021 рр., були отримані значення питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs в різних видах риби. Аналіз результатів показав, що найбільші рівні питомої активності ^{137}Cs спостерігалися в м'язовій тканині щуки (до 37 ± 4 кБк·кг⁻¹), а найбільші рівні питомої активності ^{90}Sr спостерігалися в кістковій тканині краснопірок (до 118 ± 15 кБк·кг⁻¹). Питома активність радіонуклідів у рибі оз. Глибоке - в сотні разів перевищує допустимі рівні вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs в рибі в Україні (ДР-2006) [2, 3]. Отримані у роботі результати узгоджуються з літературними даними [7, 8].

Для «мирних» риби (карася сріблястого, лина та краснопірки), на відміну від хижих риби (щуки і окуня) - не спостерігалось достовірності кореляції між питомою активністю ^{137}Cs і ^{90}Sr в м'язовій та кістковій тканинах риби та їх масою.

Період напівзменшення вмісту ^{137}Cs у м'язовій та ^{90}Sr у кістковій тканині краснопірок в 2016–2021 роках в оз. Глибоке склав 3.2 і 9.5 років. Тільки через 20-30 років, за рахунок природних процесів, питома активність радіоцезію в рибі зменшиться до рівня гігієнічних

нормативів (150 Бк кг⁻¹). Застосування контрзаходів може дозволити суттєво зменшити рівні радіоактивного забруднення риби цим падіонуклідом [10, 11].

Оцінки максимальних поглинених доз внутрішнього опромінення риби в оз. Глибоке (< 2 мГр·доба⁻¹) показали, що отримані значення не перевищують рекомендовані міжнародними організаціями допустимі дози, що забезпечують захист більш 95% всіх видів риби (10 мГр·доба⁻¹).

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку НУБіП України за підтримку цієї роботи, в рамках теми 110/1-пр-2022 (№ держреєстрації 0122U001794) і гранту СРЕА-2015/10108 Норвезького центру міжнародного співробітництва в галузі освіти /the Norwegian Centre for International Cooperation in Education (SiU) «Joint Ukrainian-Norwegian education programme in Environmental Radioactivity». Ці дослідження також були частково підтримані в 2020-2021 рр. в рамках проекту НФДУ №93/02.2020 «Закономірності впливу хронічного іонізуючого випромінювання на референтні організми рослин і тварин в екосистемах Чорнобильської зони відчуження».

Список використаних джерел

1. НОРМИ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ (НРБУ-97). Київ. 1998 <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>

2. 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.

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максим В. І., Кашпаров В. О.

http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE12719.html

3. Balonov M., Kashparov V., Nikolaenko E., Berkovsky V., Fesenko S. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Radiological Protection*. 2018. Vol. 38. P. 854–867. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aabe34>

4. IAEA, 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and fresh-water environments. Vienna. IAEA-TRS-472. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf

5. Gudkov D. I., Kaglyan A. Ye., Nazarov A. B., Klenus V. G. Dynamics of the Content and Distribution of the Main Dose Forming Radionuclides in Fishes of the Exclusion Zone of the Chernobyl NPS. Begell House, Inc. *Hydrobiological Journal*. 2008. 44(5), 87-104.

6. Каглян А.Е., Гудков Д.И., Кленус В.Г., Широкая З.О., Поморцева Н.А., Юрчук Л.П., Назаров А.Б. Радионуклиды в аборигенных видах рыб чернобыльской зоны отчуждения. *Ядерная физика та енергетика*. 2012. 13(3), 306-315.

7. Каглян О. Є., Гудков Д. І., Кіреєв С. І., Кленус В. Г., Беляєв В. В., Юрчук Л. П., Дроздов В. В., Гупало О. О. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика*. 2021. 22(1), 62-73. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.01.062>

8. Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Kireyev S.I., Yurchuk L.P., Gupalo Ye.A. Fish of the Chernobyl exclusion zone: modern levels of radionuclide contamination and radiation doses. *Hydrobiological Journal*. 2019. 55(5), 81–99. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i5.80>

9. Teien, H.-C., Kashparova, O., Salbu, B., Levchuk, S., Protsak, V., Eide D. M., Jensen, K. A., Kashparov V., 2021. Seasonal changes in uptake and depuration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in silver Prussian carp (*Carassius gibelio*) and common rudd (*Scardinius*

erythrophthalmus). *Science of the Total Environment*. 786, 147280, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147280>

10. Павленко П. М., Кашпарова О. В., Левчук С. Є., Гречанюк М. О., Гудков І. М., Кашпаров В. О. Вплив додаткового "чистого" годування на вміст ^{90}Sr і ^{137}Cs в карасях сріблястих (*Carassius gibelio*) у Чорнобильській зоні відчуження. *Ядерна фізика та енергетика*. 2021. 22(3), 272-283 (Ukr). <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.03.272>

11. Kashparova O. et al. Clean feed as countermeasure to reduce the ^{137}Cs and ^{90}Sr levels in fish from contaminated lakes. *J. Environ. Radioact.* (2022). (Submitted).

12. ICRP, Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. (ICRP Publication 108), 2008, 242p. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20108>

13. Ненашев Н.А. и др. Накопление ^{137}Cs ихтиофауной различных водоемов ПГРЭЗ. Экосистемы и радиация: Аспекты существования и развития. Сб. науч. тр., посвященный 25-летию Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Под общ. ред. Ю.И. Бондаря. Минск: БОРБИЦ РНИУП «Институт радиологии». (2013) 353 с.

14. Кашпарова Е., Теин Х.-С., Левчук С., Павленко В., Салбу Б., Кашпаров В. Динамика выведения ^{137}Cs из организма серебряного карася (*Carassius gibelio*) при разной температуре воды. *Ядерная физика та енергетика*. 2019. №20(4). С.411 <https://doi.org/10.15407/jnpae2019.04.411>

15. Кашпарова Е., Теин Х.-С., Левчук С., Процак В., Корепанова К., Салбу Б., Ибатуллин И., Кашпаров В. Динамика поступления ^{137}Cs из воды в организм серебряного карася (*Carassius gibelio*). *Ядерная физика та енергетика*. 2020. №21(1). С.064-074 <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.01.064>

16. Konoplev A. et al. 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 / Konoplev A., Laptev

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максим В. І., Кашпаров В. О.

G., Igarashi Y., Nanba K. *ENVIRA 5th International Conference on Environmental Radioactivity: BOOK OF ABSTRACTS* ID 95, Prague Czech Republic, 13 Sept. 2019. P. 73.

17. Rosseland, B., Massabuau, J., Grimalt, J., Hofer, R., Lackner R., Raddum G., et al., 2001. Fish ecotoxicology, The EMERGE fish sampling manual for live fish. The EMERGE Project (European Mountain Lake Ecosystems: Regionalisation, diagnostic and socio-economic valuation).

18. Павлоцкая Ф.И. Основные принципы радиохимического анализа объектов окружающей среды и методы определения радионуклидов стронция и трансурановых элементов. Журнал аналитической химии. 52 (2) (1997) 126-143

19. Yankovich, T.L., Beresford, N.A., Wood, M.D. et al., 2010. Whole-body to tissue concentration ratios for use in biota dose assessments for animals. Radiation and Environmental Biophysics. 49, 549–565 <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0323-z>

References

1. NORMY RADIATSIYNOYI BEZPEKY UKRAYINY (NRBU-97). Kyiv. 1998

<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>

2. Dopustymi rivni vmistu radionuklidiv ^{137}Cs ta ^{90}Sr u produktakh kharchuvannya ta pytniy vodi (DR-2006). Hihiyenichnyy normatyv HN 6.6.1.1-130-2006.

http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE12719.html

3. Balonov M., Kashparov V., Nikolaenko E., Berkovsky V., Fesenko S. (2018). Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident. Journal of Radiological Protection. Vol. 38. P. 854–867. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aabe34>

4. IAEA, 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and fresh-water environments. Vienna. IAEA-TRS-472. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf

5. Gudkov D. I., Kaglyan A. Ye., Nazarov A. B., Klenus V. G. (2008). Dynamics of the Content and Distribution of the Main Dose Forming Radionuclides in Fishes of the Exclusion Zone of the Chernobyl NPS. Begell House, Inc. Hydrobiological Journal. 44(5), 87-104.

6. Kaglyan A.E., Gudkov D.Y., Klenus V.H., Shyrokaya Z.O., Pomortseva N.A., Yurchuk L.P., Nazarov A.B. (2012). Radyonuklydy v aboryhennykh vyдах ryb

chernobyl'skoy zony otchuzhdenyya. Yaderna fizyka ta enerhetyka. 13(3), 306-315.

7. Kaglyan O. YE., Gudkov D. I., Kireyev S. I., Klenus V. H., Byelyayev V. V., Yurchuk L. P., Drozdov V. V., Gupalo O. O. (2021). Dynamika pytomoyi aktyvnosti ^{90}Sr i ^{137}Cs u predstavnykiv ikhtiofauny vodoym Chornobyl's'koyi zony vidchuzhennya. Yaderna fizyka ta enerhetyka. 22(1), 62-73. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.01.062>

8. Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Kireyev S.I., Yurchuk L.P., Gupalo Ye.A. (2019). Fish of the Chernobyl exclusion zone: modern levels of radionuclide contamination and radiation doses. Hydrobiological Journal. 55(5), 81–99. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v55.i5.80>

9. Teien, H.-C., Kashparova, O., Salbu, B., Levchuk, S., Protsak, V., Eide D. M., Jensen, K. A., Kashparov V., (2021). Seasonal changes in uptake and depuration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in silver Prussian carp (*Carassius gibelio*) and common rudd (*Scardinius erythrophthalmus*). Science of the Total Environment. 786, 147280, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147280>

10. Pavlenko P. M., Kashparova O. V., Levchuk S. YE., Hrechanyuk M. O., Hudkov I. M., Kashparov V. O. (2021). Vplyv dodatkovoho "chystoho" hoduvannya na vmist ^{90}Sr i ^{137}Cs v karasyakh sriblyastykh (*Carassius gibelio*) u Chornobyl's'kiy zoni vidchuzhennya. Yaderna fizyka ta enerhetyka. 22(3), 272-283 (Ukr). <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.03.272>

11. Kashparova O. et al. (2022). Clean feed as countermeasure to reduce the ^{137}Cs and

Гречаниук М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максін В. І., Кашпаров В. О.

⁹⁰Sr levels in fish from contaminated lakes. J. Environ. Radioact. (Submitted).

12. ICRP, Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. (ICRP Publication 108), 2008, 242p. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20108>

13. Nenashev N.A. i dr. (2013). Nakopleniye ¹³⁷Cs ikhtiofaunoy razlichnykh vodoyemov PGREZ. Ekosistemy i radiatsiya: Aspekty sushchestvovaniya i razvitiya. Sb. nauch. tr., posvyashchenny 25-letiyu Poleskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika. Pod obshch. red. YU.I. Bondarya. Minsk: BORBITS RNIUP «Institut radiologii». 353 s.

14. Kashparova Ye., Tein KH.-S., Levchuk S., Pavlenko V., Salbu B., Kashparov V. (2019.) Dinamika vyvedeniya ¹³⁷Cs iz organizma serebryanogo karasya (Carassius gibelio) pri raznoy temperature vody. Yaderna fizika ta yenergetika. №20(4). S.411 <https://doi.org/10.15407/jnpae2019.04.411>

15. Kashparova Ye., Tein KH.-S., Levchuk S., Protsak V., Korepanova K., Salbu B., Ibatullin I., Kashparov V. (2020). Dinamika postupleniya ¹³⁷Cs iz vody v organizm serebryanogo karasya (Carassius gibelio). Yaderna fizika ta yenergetika. №21(1). S.064-074 <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.01.064>

16. Konoplev A. et al. (2019.) Vertical distributions of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am in bottom sediments of water bodies in exclusion zone represent long-term dynamics of water contamination / Konoplev A., Laptev G., Igarashi Y., Nanba K. ENVIRA 5th International Conference on Environmental Radioactivity: BOOK OF ABSTRACTS ID 95, Prague Czech Republic, 13 Sept. P. 73.

17. Rosseland, B., Massabuau, J., Grimalt, J., Hofer, R., Lackner R., Raddum G., et al., (2001). Fish ecotoxicology, The EMERGE fish sampling manual for live fish. The EMERGE Project (European Mountain Lake Ecosystems: Regionalisation, diagnostic and socio-economic valuation).

18. Pavlotskaya F.I. (1997). Osnovnyye printsipy radiokhimicheskogo analiza ob"yektov okruzhayushchey sredy i metody opredeleniya radionuklidov strontsiya i transuranovykh elementov. Zhurnal analiticheskoy khimii. 52 (2) 126-143

19. Yankovich, T.L., Beresford, N.A., Wood, M.D. et al., (2010). Whole-body to tissue concentration ratios for use in biota dose assessments for animals. Radiation and Environmental Biophysics. 49, 549-565 <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0323-z>

RADIOACTIVE CONTAMINATION AND DOSES OF INTERNAL IRRADIATION OF FISH IN THE DEEP LAKE OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

M. Hrechaniuk, O. Kashparova, P. Pavlenko, S. Levchuk, V. Maksin, V. Kashparov

Abstract. After the accidents at the Chornobyl and Fukushima NPPs, the specific activity of radionuclides in fish in radioactively contaminated reservoirs reached hundreds of kBq kg⁻¹. Over time, as the radiological situation improved, there was a decrease in radioactive contamination of fish, but even now there are cases of exceeding the permissible levels of radionuclides in food.

This work aimed to determine in real conditions the content of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in different species of fish in one of the most radioactively contaminated reservoirs of the Chornobyl Exclusion Zone - Glubokoye lake.

As a result of experimental studies conducted from 2016 to 2021, the values of the specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in different species of fish were obtained, which were hundreds of times higher than the permissible levels. It is shown that without the use of countermeasures, this situation will persist for several decades.

Гречанюк М. О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максим В. І., Кашпаров В. О.

The results show that the internal radiation doses of fish due to the level of their radioactive contamination do not exceed the permissible levels recommended by international organizations for radiation protection of the environment.

Keywords: ^{90}Sr , ^{137}Cs , radioecology, Chornobyl accident, radioactive contamination