

ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИ КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ У ВОДОЙМАХ

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,

³Науково-дослідний інститут "Ресурс" Держагенства України "Резерв",

E-mail: maksgrek@ukr.net

<https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.05.002>

Анотація. За вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs у воді водойм нижче допустимого рівня, навіть для питної води, питома активність радіонуклідів в рибі може в сотні і тисячі разів перевищувати встановлені гігієнічні нормативи ДР-2006.

Метою даної роботи було визначення гранично допустимих концентрацій ^{90}Sr та ^{137}Cs у воді водойм залежно від вмісту у воді кальцію та калію на основі параметрів метаболізму цезію та стронцію у риб, котрі гарантують неперевикнення встановлених гігієнічних нормативів радіонуклідів у рибі (ДР-2006) з ймовірністю 95 %.

Показано, що у водоймах з низькою мінералізацією води гранично допустимі концентрації ^{90}Sr і ^{137}Cs будуть надто низькі на рівні одиниць Бк в кубічному метрі та важко вимірюваними на відміну від радіоактивного забруднення риби, що робить, рибу навіть при незначному радіоактивному забрудненні водойм, унікальним біоіндикатором для цілей радіаційного захисту людини та навколишнього середовища.

Ключові слова: ^{90}Sr , ^{137}Cs , радіоекологія, допустимі рівні, біотестування на рибі, Чорнобильська аварія, радіоактивне забруднення, гранично допустима концентрація

Актуальність. Внаслідок аварій на АЕС в Чорнобилі в 1986 році та в Фукусимі в 2011 році питома активність ^{90}Sr та ^{137}Cs в рибі в радіоактивно забруднених водоймах

перевищувала допустимі рівні [1-6]. Встановлення гранично допустимої концентрації радіонуклідів у воді водойм має гарантувати неперевикнення гігієнічних рівнів

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

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

вмісту ^{90}Sr ($35 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$) і ^{137}Cs ($150 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$) в рибі (ДР-2006) для зменшення внутрішніх доз опромінення населення [7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Допустимі концентрації ^{90}Sr та ^{137}Cs у питній воді згідно ДР-2006 для населення складають $2 \text{ Бк}\cdot\text{л}^{-1}$ [7] та НРБУ-97 [8] 10 і $100 \text{ Бк}\cdot\text{л}^{-1}$, відповідно. При таких рівнях вмісту радіонуклідів у воді питома активність ^{90}Sr та ^{137}Cs в рибі в сотні і тисячі разів може перевищувати допустимі рівні вмісту радіонуклідів в свіжій та мороженій рибі в Україні, $35 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$ і $150 \text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$, відповідно [5, 7, 9-16].

Більш ніж половина активності ^{137}Cs ($55\text{--}70\%$) накопичується в м'язовій тканині риб, в той час коли в кістковій тканині і лусці міститься основна частина активності ^{90}Sr (до $91\text{--}97\%$) [10, 11, 17]. Середнє співвідношення питокої активності ^{90}Sr в тілі та кістковій тканині прісноводних кісткових риб складає 0.14 , для ^{137}Cs середнє співвідношення питокої активності в тілі риб та в м'язових тканинах - 1.1 [17].

Вміст ^{90}Sr та ^{137}Cs в рибі прямо пропорційно залежить від питокої активності цих радіонуклідів у воді та обернено пропорційно від вмісту у воді макроаналогів цих радіонуклідів – іонів кальцію (Ca^{2+}) і калію (K^{+}) [9, 18-21].

Мета дослідження полягає у визначенні гранично допустимої

концентрації ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді в водоймах з різним вмістом їх макроаналогів – іонів кальцію і калію, яка має гарантувати з заданою імовірністю неперевикнення гігієнічних рівнів вмісту радіонуклідів в рибі ДР-2006.

Матеріали і методи дослідження. Гранично допустимі концентрації (ГДК) ^{90}Sr та ^{137}Cs у воді водойм ($\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$) встановлюються на основі параметрів метаболізму цезію та стронцію у риб залежно від вмісту у воді кальцію [Ca^{2+} , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$] та калію [K^{+} , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$] з метою неперевикнення встановлених гігієнічних нормативів за вмістом ^{90}Sr і ^{137}Cs у рибі (ДР-2006) з ймовірністю більше 95% . Для визначення у воді концентрації іонів кальцію [Ca^{2+} , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$] використовували титриметричний метод [27], для визначення концентрації іонів калію [K^{+} , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$] у воді користувались методом полуменової фотометрії [27].

У природних умовах Чорнобильської зони відчуження і акваріумних експериментах було отримано параметри математичної трикамерної моделі - значення швидкості надходження і виведення ^{90}Sr і ^{137}Cs з риби і біологічні періоди напівзменшення вмісту в м'язовій і кістковій тканині риб, що дозволило використовувати їх для прогнозування вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs у рибі та окремих тканинах при надходженні радіонуклідів в організм риб як з кормом, так і безпосередньо,

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

з води за різних умов навколишнього середовища і режимах годування [14-16, 22-25].

Отримані нами рівноважні коефіцієнти накопичення радіонуклідів з води до риби (CR , відношення питомої активності радіонукліду в рибі (органі або тканині) при природній вологості ($Bk \cdot kg^{-1}$, FM) до питомої активності

цього радіонукліду у воді ($Bk \cdot l(kg)^{-1}$) у рівноважних умовах) при різному вмісті у воді K^+ і Ca^{2+} [14-16, 19, 24] добре узгоджуються з літературними даними [9, 18, 21] з урахуванням усереднених значень геометричного стандартного відхилення коефіцієнтів накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs для риб різних видів рівним 1.7-2.3 [26] (Табл. 1).

1. Коефіцієнти накопичення радіонуклідів з води до риби (CR) при різному вмісті у воді K^+ і Ca^{2+} – у літній період року.

Риби	Радіо- нуклід	CR з [14-16, 19, 24]	CR з [9, 18, 21]
Не хижі	^{90}Sr	$(1500-4500) \cdot [Ca^{2+}]^{-1}$	$CF_{whole}^{Sr-90} = \frac{3940(Range: 1180 - 5660)}{[Ca^{2+}]}$
	^{137}Cs	$(1000-4500) \cdot [K^+]^{-1}$	$CF_{whole}^{Cs-137} = \frac{2390(Range: 1740 - 3280)}{[K^+]}$
Хижі	^{90}Sr	$(2000-4000) \cdot [Ca^{2+}]^{-1}$	$CF_{whole}^{Sr-90} = \frac{4770(Range: 3020 - 7520)}{[Ca^{2+}]}$
	^{137}Cs	$(2000-8000) \cdot [K^+]^{-1}$	$CF_{whole}^{Cs-137} = \frac{4800(Range: 1780 - 7590)}{[K^+]}$

Неперевищення встановлених гігієнічних нормативів ДР-2006 за вмістом ^{90}Sr (C^{Sr} , $Bk \cdot kg^{-1}$) і ^{137}Cs (C^{Cs} ,

$$C^{Sr} / 35 + C^{Cs} / 150 \leq 1, \quad (1)$$

Питома активність ^{90}Sr та ^{137}Cs у тілі всіх видів прісноводних риб з довірчою ймовірністю 0,95 на основі метаболізму цезію та стронцію у риб і вмісті у воді ^{90}Sr (W^{Sr} , $Bk \cdot l^{-1}$) та ^{137}Cs

$$C^{Sr} = 7520 \cdot W^{Sr} / [Ca^{2+}] \quad (2)$$

$$C^{Cs} = 7590 \cdot W^{Cs} / [K^+] \quad (3)$$

$Bk \cdot kg^{-1}$) в свіжій рибі спостерігається при дотриманні нерівності [7]:

(W^{Cs} , $Bk \cdot l^{-1}$) і їх макроаналогів – кальція [Ca^{2+} , $mg \cdot l^{-1}$] і калія [K^+ , $mg \cdot l^{-1}$] неперевисуватиме таких значень – Табл.1 [9]:

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

Отже, не перевищення встановлених гігієнічних нормативів за вмістом ^{90}Sr і ^{137}Cs у свіжій рибі (ДР-2006) [7] залежно від вмісту у воді ^{90}Sr (W^{Sr} , Бк·л⁻¹) і ^{137}Cs (W^{Cs} ,

$$215 \cdot W^{\text{Sr}} / [\text{Ca}^{2+}] + 51 \cdot W^{\text{Cs}} / [\text{K}^{+}] \leq 1 \quad (4)$$

Результати дослідження та їх обговорення. Гранично допустимі концентрації ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді водойм (Бк·л⁻¹) за наявності обох радіонуклідів встановлюються

Бк·л⁻¹) та їх макроаналогів – кальцію [Ca^{2+} , мг·л⁻¹] і калію [K^{+} , мг·л⁻¹] спостерігається при дотриманні нерівності (1-3):

залежно від вмісту у воді калію та кальцію [Ca^{2+} , мг·л⁻¹] і [K^{+} , мг·л⁻¹] за умови дотримання нерівності (4) і наведені у графічному вигляді на Рис. 1.

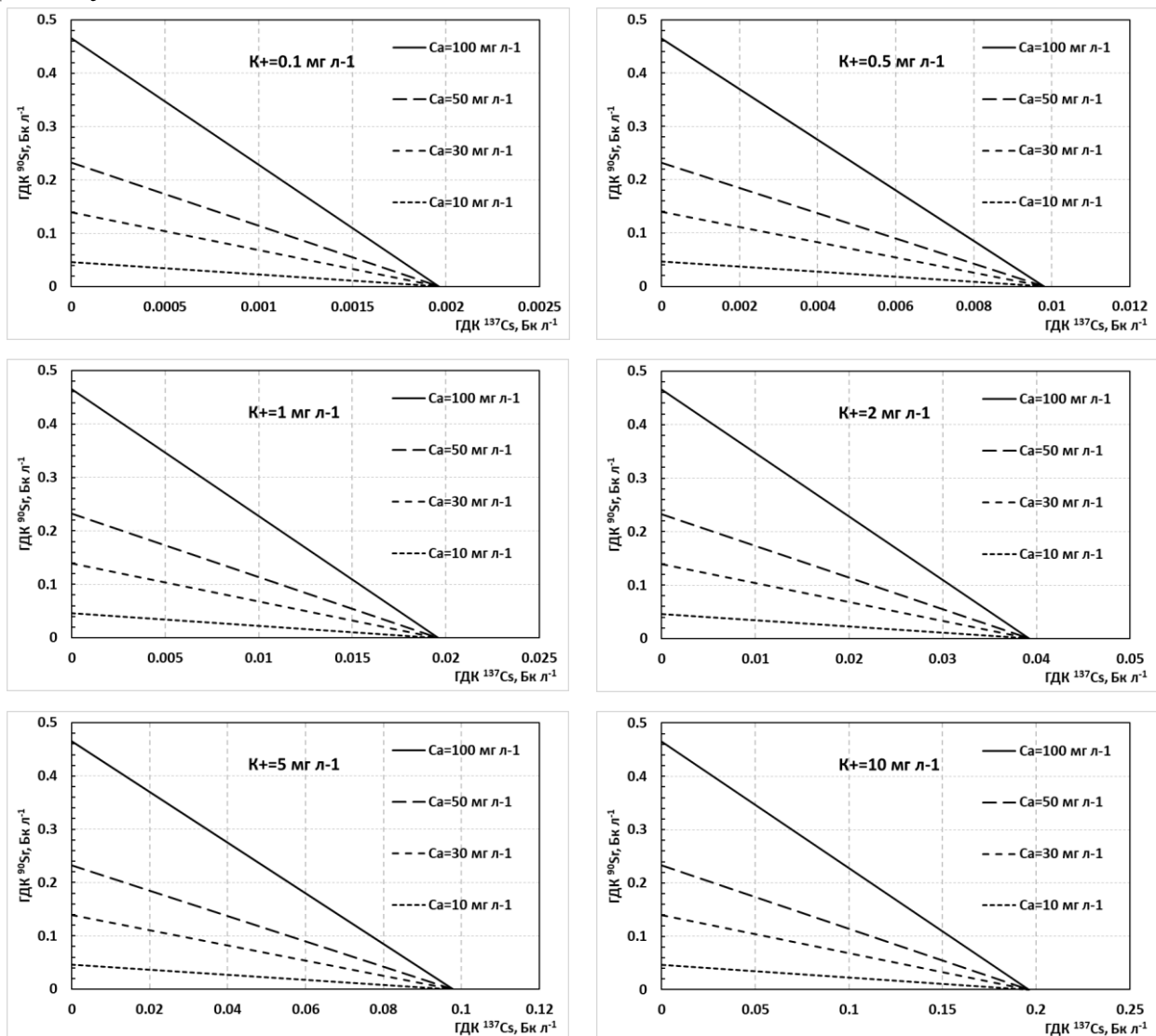


Рис. 1. Гранично допустимі концентрації (ГДК) ^{137}Cs та ^{90}Sr у воді водойм за наявності обох радіонуклідів залежно від вмісту у воді калію [K^{+} , мг·л⁻¹] і кальцію [Ca^{2+} , мг·л⁻¹].

За відсутності ^{90}Sr у воді водойм, ГДК ^{137}Cs (Бк·л⁻¹) встановлюються

залежно від вмісту у воді калію [K^{+} , мг·л⁻¹] за умови дотримання

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

нерівності (4) та наведені у чисельному вигляді у Таблиці 2. У разі застосування додаткового чистого корму в рекомендованій фізіологічно необхідній кількості гранично допустимі концентрації ^{137}Cs у воді водойм ($\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$) можуть

бути збільшені в 2 рази [15,16]. ГДК ^{90}Sr ($\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$) за відсутності ^{137}Cs у воді водойм встановлюються залежно від вмісту у воді кальцію [Ca^{2+} , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$] за умови дотримання нерівності (4) і наведені у чисельному вигляді у Таблиці 2.

2. Гранично допустимі концентрації (ГДК) ^{137}Cs та ^{90}Sr у воді водойм за наявності лише одного радіонуклідів залежно від вмісту у воді калію [K^+ , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$] або ж кальцію [Ca^{2+} , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$].

K^+ , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$	ГДК ^{137}Cs (за відсутності ^{90}Sr), $\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$		Ca^{2+} , $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$	ГДК ^{90}Sr (за відсутності ^{137}Cs), $\text{Бк}\cdot\text{л}^{-1}$
0.1	0.002		2	0.001
0.2	0.004		5	0.02
0.3	0.006		10	0.05
0.4	0.008		15	0.07
0.5	0.010		20	0.09
0.6	0.012		25	0.12
0.7	0.014		30	0.14
0.8	0.016		35	0.16
0.9	0.018		40	0.19
1	0.020		45	0.21
1.1	0.022		50	0.23
1.2	0.024		55	0.26
1.3	0.025		60	0.28
1.4	0.027		65	0.30
1.5	0.029		70	0.33
1.6	0.031		75	0.35
1.7	0.033		80	0.37
1.8	0.035		85	0.40
1.9	0.037		90	0.42
2	0.039		95	0.44
3	0.059		100	0.47
4	0.078		105	0.49
5	0.098		110	0.51
6	0.118		115	0.53
7	0.137		120	0.56
8	0.157		125	0.58
9	0.176		130	0.60
10	0.196		135	0.63
20	0.392		140	0.65
50	0.980		150	0.70

Висновки і перспективи. У результаті проведених досліджень на основі параметрів метаболізму цезію та стронцію у риб залежно від вмісту у воді калію [K^+ , $мг \cdot л^{-1}$] та кальцію [Ca^{2+} , $мг \cdot л^{-1}$] отримані рівноважні значення гранично допустимих концентрацій ^{137}Cs та ^{90}Sr у воді водойм ($Бк \cdot л^{-1}$), котрі гарантують неперевищення встановлених гігієнічних нормативів радіонуклідів у рибі (ДР-2006) з ймовірністю 95%. Показано, що навіть при надто високому вмісті калію ($K^+ = 50 \text{ мг} \cdot л^{-1}$) та кальцію ($Ca^{2+} = 150 \text{ мг} \cdot л^{-1}$) у воді прісноводних водойм (Табл. 2), ГДК $^{137}Cs - 1.0 \text{ Бк} \cdot л^{-1}$ і $^{90}Sr - 0.7 \text{ Бк} \cdot л^{-1}$ буде менше у порівнянні з допустимими рівнями вмісту радіонуклідів у питній воді ($\geq 2 \text{ Бк} \cdot л^{-1}$) [7,8]. У водоймах з низькою мінералізацією при вмісті калію ($K^+ = 0.2 \text{ мг} \cdot л^{-1}$) та кальцію ($Ca^{2+} = 2 \text{ мг} \cdot л^{-1}$) у воді [19], як зазначено у Таблиці 2, ГДК радіонуклідів буде вкрай низьким, і навіть важко вимірюваним ($^{137}Cs - 0.004 \text{ Бк} \cdot л^{-1}$ і $^{90}Sr - 0.001 \text{ Бк} \cdot л^{-1}$), на відміну від

радіоактивного забруднення риби. Саме це робить рибу зручним біоіндикатором навіть за незначного радіоактивного забруднення водойм.

На початковому етапі радіоактивного забруднення водойм ГДК можуть бути трохи вище рівноважних значень через монотонну динаміку збільшення питомої активності радіонуклідів у рибі протягом перших місяців [22]. При використанні додаткового чистого годування риби ГДК ^{137}Cs можуть бути збільшені в 2 рази [15, 16]. Також слід зазначити, що ГДК ^{90}Sr будуть залежати від віку/розміру риб [16].

Більше ніж 90% ^{90}Sr міститься в кістках та лусці риб [10, 11, 17] і при кулінарній обробці практично не надходить в продукти харчування [9]. Тому введення нижчого допустимого рівня вмісту ^{90}Sr у свіжій та мороженій цільній тушці риби ($35 \text{ Бк} \cdot кг^{-1}$) [7], а не в їстівній її частині м'язової тканини, на наш погляд, є надмірно консервативним і невиправданим.

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. IAEA, 2006. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', Ed. Ansbaugh, L. and Balonov, M., Radiological assessment reports series, IAEA, STI/PUB/1239. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf
2. IAEA, 2015. The Fukushima Daiichi accident. Radiological Consequences. 4/5. Vienna. IAEA- STI/PUB/1710. <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf>
3. Wada, T., Fujita, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Mizuno, T., Sohtome, T., Kamiyama, K., Narita, K., Watanabe, M., Hatta, N., Ogata, Y., Morita, T., Igarashi, S., 2016. Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: An update after five years. *Journal of Environmental Radioactivity*. 164, 312-324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.028>
4. Wada, T., Konoplev, A., Wakiyama, Y., Watanabe, K., Furuta, Y., Morishita, D., Kawata, G., Nanba, K., 2019. Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*. 204, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.04.006>
5. 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>
6. UNSCEAR 2020/2021 Report. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021. Report to the General Assembly with Scientific Annexes VOLUME II. Scientific Annex B. UNITED NATIONS. New York, 2022. https://www.unscear.org/docs/publications/2020/UNSCEAR_2020_21_Report_Vol.II.pdf
7. 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. http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE12719.html
8. НОРМИ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ (НРБУ-97). Київ. 1998 <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>
9. 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
10. 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.
11. 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.
12. 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>
13. 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>
14. 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,

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

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147280>

15. 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>

16. O. Kashparova 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).

17. 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>

18. Smith, J.T., 2006. Modelling the dispersion of radionuclides following short duration releases to rivers Part 2. Uptake by fish. Science of the Total Environment. 368(2-3), 502–518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.03.011>

19. Хомутинин Ю. В., Кашпаров В. А., Кузьменко А. В. 2011. Зависимость коэффициентов накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr рыбой от содержания калия и кальция в воде пресноводного водоема. Радиационная биология. Радиоэкология. 51(3), 374–384

20. Хомутинин Ю.В., Кашпаров В. А., Кузьменко А.В., Павлюченко В.В. 2013. 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), 411–427.

21. Smith J.T. et al. Radiocaesium concentration factors of chernobyl-contaminated fish: a study of the influence of potassium, and "blind" testing of a previously developed model. Journal of Environmental Radioactivity. 2000. Vol. 48. P. 359–369.

22. Кашпарова Е. В., Теиен Г.-Х., Левчук С. Е., Процак В. П., Корепанова К. Д., Салбу Б., Ибатуллин И. И., Кашпаров В. А. 2020. Динамика поступления ^{137}Cs из воды в организм серебряного карася (*Carassius gibelio*). Ядерна фізика та

енергетика. 21(1), 64-74 <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.01.064>

23. Кашпарова Е. В., Теиен Г.-Х., Левчук С. Е., Павленко В. С., Салбу Б., Кашпаров В. А. 2019. Динамика выведения ^{137}Cs из организма серебряного карася (*Carassius gibelio*) при разной температуре воды. Ядерна фізика та енергетика. 20(4), 411-419

<https://doi.org/10.15407/jnpae2019.04.411>

24. Гречанюк М.О., Кашпарова О. В., Павленко П. М., Левчук С. Є., Максін В. І., Кашпаров В. О. 2022. Радіоактивне забруднення і дози внутрішнього опромінення риби в озері Глибоке Чорнобильської зони відчуження. Наукові доповіді НУБіП України, №3 (97).

25. Kashparova O. V., Levchuk S. E., Khomutinin Yu. V., Pavlenko P. M., Hrechaniuk, M. O., Kashparov V. O. 2022. The uptake and excretion rate of ^{137}Cs from the silver prussian carp (*Carassius gibelio*) at different feeding routine. Ядерна фізика та енергетика. 23(1), 57-63

<https://doi.org/10.15407/jnpae2022.01.057>

26. Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А. Оптимизация отбора проб для оценки удельной активности и коэффициентов накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr рыбой. Ядерна фізика та енергетика. 2016. Vol. 17(2). С. 189–198

<https://doi.org/10.15407/jnpae2016.02.189>

27. Набиванець Б. Й., Осадчий В. І., Осадча Н. М., Набиванець Ю. Б. Аналітична хімія поверхневих вод. Київ 2007. С. 119-128.

References

1. IAEA, (2006). Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', Ed. Ansphaugh, L. and Balonov, M., Radiological assessment reports series, IAEA, STI/PUB/1239. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf

2. IAEA, (2015). The Fukushima Daiichi accident. Radiological Consequences. 4/5. Vienna. IAEA- STI/PUB/1710. <http://www->

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

pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf

3. Wada, T., Fujita, T., Nemoto, Y., Shimamura, S., Mizuno, T., Sohtome, T., Kamiyama, K., Narita, K., Watanabe, M., Hatta, N., Ogata, Y., Morita, T., Igarashi, S., (2016). Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: An update after five years. *Journal of Environmental Radioactivity*. 164, 312-324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.028>

4. Wada, T., Konoplev, A., Wakiyama, Y., Watanabe, K., Furuta, Y., Morishita, D., Kawata, G., Nanba, K., (2019). Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*. 204, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.04.006>

5. 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>

6. UNSCEAR 2020/2021 Report. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021. Report to the General Assembly with Scientific Annexes VOLUME II. Scientific Annex B. UNITED NATIONS. New York, 2022. https://www.unscear.org/docs/publications/2020/UNSCEAR_2020_21_Report_Vol.II.pdf

7. Dopustymi rivni vmistu radionuklidiv 137Cs ta 90Sr 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

8. NORMY RADIATSIYNOYI BEZPEKY UKRAYINY (NRBU-97). Kyiv. 1998 <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>

9. 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

10. 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.

11. Kaglyan A.E., Gudkov D.Y., Klenus V.H., Shyroka 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.

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

13. 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>

14. 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 ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr 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>

15. Pavlenko P. M., Kashparova O. V., Levchuk S. YE., Hrechaniuk M. O., Gudkov I. M., Kashparov V. O. (2021). Vplyv dodatkovoho "chystoho" hoduvannya na vmist 90Sr i 137Cs v karasyakh sriblyastykh (*Carassius gibelio*) u Chornobyl's'kiy zoni vidchuzhennya. *Yaderna fizyka ta enerhetyka*. 22(3), 272-283 (Ukr). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147280>

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

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

17. 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>

18. Smith J.T. (2006). Modelling the dispersion of radionuclides following short duration releases to rivers Part 2. Uptake by fish. Science of the Total Environment. 368(2-3), 502–518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.03.011>

19. Khomutinin YU. V., Kashparov V. A., Kuz'menko A. V. (2011). Zavisimost' koeffitsiyentov nakopleniya ^{137}Cs i ^{90}Sr ryboy ot sodержaniya kaliya i kal'tsiya v vode presnovodnogo vodoyema. Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 51(3), 374–384

20. Khomutinin YU.V., Kashparov V. A., Kuz'menko A.V., Pavlyuchenko V.V. (2013). Prognoz dinamiki i riska prevysheniya dopustimogo sodержaniya ^{137}Cs i ^{90}Sr v rybe Kiyevskogo vodokhranilishcha na pozdney faze Chernobyl'skoy avarii. Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 53(4), 411–427.

21. Smith J.T. et al. (2000). Radiocaesium concentration factors of chernobyl-contaminated fish: a study of the influence of potassium, and “blind” testing of a previously developed model. Journal of Environmental Radioactivity. Vol. 48. P. 359–369.

22. Kashparova Ye. V., Teiyen G.-KH., Levchuk S. Ye., Protsak V. P., Korepanova K. D., Salbu B., Ibatullin I. I., Kashparov V. A.

(2020). Dinamika postupleniya ^{137}Cs iz vody v organizm serebryanogo karasya (*Carassius gibelio*). Yaderna fizika ta yenergetika. 21(1), 64-74

<https://doi.org/10.15407/jnpae2020.01.064>

23. Kashparova Ye. V., Teiyen G.-KH., Levchuk S. Ye., Pavlenko V. S., Salbu B., Kashparov V. A. (2019). Dinamika vyvedeniya ^{137}Cs iz organizma serebryanogo karasya (*Carassius gibelio*) pri raznoy temperature vody. Yaderna fizika ta yenergetika. 20(4), 411-419

<https://doi.org/10.15407/jnpae2019.04.411>

24. Hrechaniuk M.O., Kashparova O. V., Pavlenko P. M., Levchuk S. YE., Maksin V. I., Kashparov V. O. (2022). Radioaktyvne zabrudnennya i dozy vnutrishn'oho oprominennya ryby v ozeri Hlyboke Chernobyl's'koyi zony vidchuzhennya. Naukovi dopovidi NUBiP Ukrayiny, №3 (97).

25. Kashparova O. V., Levchuk S. E., Khomutinin Yu. V., Pavlenko P. M., Hrechaniuk, M. O., Kashparov V. O. 2022. The uptake and excretion rate of ^{137}Cs from the silver prussian carp (*Carassius gibelio*) at different feeding routine. Nucl. Phys. At. Energy. 23(1), 57-63 <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.01.057>

26. Khomutinin YU.V., Kashparov V.A. (2016). Optimizatsiya otbora prob dlya otsenki udel'noy aktivnosti i koeffitsiyentov nakopleniya ^{137}Cs i ^{90}Sr ryboy. Nucl. Phys. At. Energy. Vol. 17(2). C. 189–198 <https://doi.org/10.15407/jnpae2016.02.189>

27. Nabyvanets' B. Y., Osadchyy V. I., Osadcha N. M., Nabyvanets' YU. B. (2007). Analychna khimiya poverkhnevykh vod. Kyiv S. 119-128.

THRESHOLD LIMIT VALUES OF RADIONUCLIDES IN THE WATERBODIES

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

Abstract. When the content of ^{90}Sr and ^{137}Cs in reservoir water is below the permissible level, even for drinking water, the specific activity of radionuclides in fish can be hundreds and thousands of times higher than the established hygienic standards of DR-2006.

The purpose of this work was to determine the maximum permissible concentrations of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the water of reservoirs depending on the content of calcium and potassium in the water based on the parameters of the metabolism of cesium and strontium in fish, which guarantee that the established hygienic standards of radionuclides in fish (DR-2006) are not exceeded with a probability of 95%.

It is shown that in reservoirs with low water mineralization, the maximum allowable concentrations of ^{90}Sr and ^{137}Cs will be too low at the level of Bq units per cubic meter and difficult to measure, unlike radioactive contamination of fish, which makes them, even with minor radioactive contamination of reservoirs, a unique bioindicator for the purposes radiation protection of people and the environment.

Keywords: ^{90}Sr , ^{137}Cs , radioecology, biotesting of fish, Chornobyl accident, radioactive contamination, threshold limit value