

В. О. Кашпаров<sup>1,\*</sup>, С. Є. Левчук<sup>1</sup>, **Ю. В. Хомутінін<sup>1</sup>**,  
Д. М. Кондратюк<sup>2</sup>, М. А. Журба<sup>1</sup>, Д. М. Голяка<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Природний заповідник «Древлянський», Народиці, Житомирська обл., Україна

\*Відповідальний автор: [kashparov@nubip.edu.ua](mailto:kashparov@nubip.edu.ua)

## ВПЛИВ ЗАЛІЗО-ГЕКСАЦІАНОФЕРАТУ КАЛІЮ НА НАДХОДЖЕННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ <sup>137</sup>Cs З ОРГАНІЗМУ КАРАСЯ СРІБЛЯСТОГО (*CARASSIUS GIBELIO* BLOCH)

У лабораторних акваріумних експериментах при температурі води  $24 \pm 2$  °C вивчався вплив різного вмісту в кормі 0, 0,01, 0,025, 0,05, 0,1 і 1 % залізо-гексаціаноферату калію (KFCF -  $KFe[Fe(CN)_6]$ ) на надходження та виведення <sup>137</sup>Cs з організму карася сріблястого (*Carassius gibelio* Bloch). В якості базового корму з різним вмістом KFCF було використано промисловий корм для коропових риб фірми «Скалярія» з розміром гранул 3 мм, що містить 30 % білка, 10 % жиру, 3 % клітковини та вітаміни А, D3, Е і С. Щодня протягом години (15:00–16:00) шість риб загальною масою приблизно 120 г у кожному з шести 27-літрових акваріумів отримували 1 г корму з вмістом KFCF від 0 до 1 %, що відповідало споживанню 0,8–80 мг KFCF на 1 кг живої маси. Хронічне надходження <sup>137</sup>Cs у рибу забезпечували через щоденне годування о 9:00 кормом «Nutra Olympic» (1,5 мм) у кількості  $0,200 \pm 0,005$  г ( $19 \pm 2$  Бк·доб<sup>-1</sup>), забрудненим <sup>137</sup>Cs із активністю  $94 \pm 5$  Бк·г<sup>-1</sup>.

Для визначення активності <sup>137</sup>Cs у кожній окремій рибі та в групі по шість особин, риб з кожного акваріума поміщали в ємність Марінеллі (1 л) із «чистою» водою. Загальну масу води доводили до 500 г для вимірювання однієї риби або до 1000 г для групи із шести риб, щоб забезпечити коректні умови для детектування радіоактивності. Вимірювання активності <sup>137</sup>Cs проводили протягом 600–1000 с на сцинтиляційному гамма-спектрометрі (СЕГ-05, Україна). Наприкінці експерименту прижиттєві вимірювання активності <sup>137</sup>Cs в рибі дублювалися вимірюваннями проб риби на напівпровідниковому гамма-спектрометрі.

Протягом 60 діб експерименту спостерігалось монотонне збільшення маси риб ( $0,03$ – $0,05$  г·доба<sup>-1</sup>) без статистично значущого впливу KFCF у кормі (0–1 %). Встановлено, що застосування KFCF у кормах призводить до статистично достовірного зменшення надходження <sup>137</sup>Cs у рибу. Радіологічна ефективність застосування KFCF зростає зі збільшенням його вмісту в кормі і досягає протягом 60 діб максимуму – 2,1 і 3,5 рази при концентрації 0,1 і 1 % KFCF, що узгоджується з раніше отриманими результатами. Для визначення радіологічної ефективності контрзаходу було проведено статистичну обробку експериментальних даних. У цілому, радіологічна ефективність використання корму, який містив 0,1 і 1 % KFCF була досить високою і становила 8 та 16 разів при досягненні стаціонарного рівня вмісту <sup>137</sup>Cs у рибі. Корм із вмістом 0,01–0,05 % KFCF мав найменшу радіологічну ефективність – 3–6 разів.

Було підтверджено висновок наших попередніх досліджень про те, що на відміну від ссавців, застосування KFCF у кормі для риб призводить до незначного зменшення швидкості всмоктування радіоцезію у шлунково-кишковому тракті риб (1,3–1,7 рази), але при цьому суттєво зменшує період його напіввиведення з організму до 20–30 діб.

Загалом експеримент показав, що використання корму із вмістом 0,1 і 1 % KFCF є ефективним і відносно недорогим контрзаходом для зменшення забруднення <sup>137</sup>Cs риб.

**Ключові слова:** <sup>137</sup>Cs, гексаціаноферат, контрзахід, радіоактивне забруднення, Берлінська лазур, прісноводна риба, фактор зменшення, залізо-гексаціаноферат калію.

### 1. Вступ

На Поліссі, радіоактивне забруднення якого сформоване в результаті глобальних радіоактивних випадів після випробувань ядерної зброї і Чорнобильської аварії, продукція тваринництва та дари лісу є основним джерелом надходження радіоцезію до організму людини [1, 2]. Тому однією з основних цілей радіаційного захисту

населення є зниження питомої активності радіонуклідів у сільськогосподарській продукції до рівня, нижчого за рівень прийняття рішень – допустимий рівень, установлений в Україні для рибної продукції за вмістом <sup>137</sup>Cs [3, 4]. Застосування захисних заходів/контрзаходів після Чорнобильської аварії в сільському господарстві України було найбільш ефективним засобом радіаційного захисту населення і дало змогу в 2 рази

© Автор(и), 2025

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

зменшити його дози внутрішнього опромінення [2]. Застосування селективних сорбентів цезію, таких як гексаціаноферати/Берлінська лазур (БЛ) було найефективнішим і відносно недорогим контрзаходом після Чорнобильської аварії в ряді європейських країн, включаючи Австрію, Францію, Німеччину, Норвегію, Сполучене Королівство та Україну для зниження вмісту  $^{134,137}\text{Cs}$  в організмах різних сільськогосподарських тварин, таких як велика рогата худоба (ВРХ), вівці, свині, кози, північні олені, домашня птиця та їхні продукти [2, 5, 6]. Після Чорнобильської аварії в Європі найбільш часто використовувалася БЛ у формі гексаціаноферату амонію (AFCF, сіль  $\text{Гіса} - \text{NH}_4\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ), яка рекомендується ЄС незважаючи на те, що ця комерційно доступна сполука є досить дорогою [6]. В Україні вартість імпортованого AFCF була і є непомірно високою, тому в основному використовували недорогий фероцин (суміш 95 % залізо-гексаціаноферату (FCF -  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ) і 5 % залізо-гексаціаноферату калію (KFCCF -  $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ )) [6, 7]. Використання різних видів БЛ у тваринництві у вигляді добавок у корм мало близьку радіологічну ефективність і характеризувалося відсутністю токсичності [5, 6]. Ці сполуки використовуються як добавки до корму тварин (6–40 мг на 1 кг живої маси тварини щодня). Внесення гексаціаноферату у кормовий концентрат у процесі його приготування на промислових установках є найпростішим і найдешевшим способом виробництва. У шлунково-кишковому тракті БЛ зв'язує радіоцезій у  $10^3$ – $10^4$  разів ефективніше порівняно з  $\text{Na}^+$  і  $\text{K}^+$  [5, 6]. Гексаціаноферат абсорбує цезій, не всмоктується в кров у шлунково-кишковому тракті і виводиться з фекаліями, що аналогічно до застосування «чистих» кормів. При цьому досягається зменшення вмісту радіоцезію на 80–90 % у молоці і м'ясі ВРХ та у м'ясі овець і свиней [5].

Після застосування ядерної зброї, руйнування АЕС чи сховищ радіоактивних матеріалів, радіаційних аварій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС на радіоактивно забрудненій території вміст  $^{137}\text{Cs}$  в рибі може в десятки і сотні разів перевищувати допустимі рівні [2, 8, 9]. Без застосування контрзаходів вміст радіонуклідів у прісноводній рибі закритих водойм у зонах радіоактивного забруднення в Україні після Чорнобильської аварії ще довгі роки перевищуватиме встановлені гігієнічні нормативи ДР-2006 [3, 9, 10]. В Україні в останні роки було розроблено та апробовано ефективні й недорогі захисні заходи для зменшення вмісту  $^{137}\text{Cs}$  в рибі в лабораторних експериментах та при утриманні в садках у реальних умовах Чорнобильської зони відчуження [11–13].

Застосування одного з видів БЛ у кормі для коропових риб, а саме, залізо-гексаціаноферату калію при концентрації 0,1 та 1 %, дало змогу більше, ніж у 10 разів знизити вміст  $^{137}\text{Cs}$  в рибі [12, 13].

«Чистий» корм без KFCCF зменшував питому активність  $^{137}\text{Cs}$  у м'язах карася сріблястого влітку у  $2,6 \pm 0,3$  раза, що зумовлено підвищенням приростом маси риб у  $2,6 \pm 0,2$  раза внаслідок біологічного розведення. Застосування додаткового «чистого» корму, що містив 0,1 або 1 % KFCCF, призвело до додаткового зниження вмісту  $^{137}\text{Cs}$  у тканинах риб у  $2,7 \pm 0,9$  та  $4,4 \pm 0,3$  раза відповідно, порівняно з рибами з додатковим «чистим» кормом без KFCCF. З урахуванням біорозведення радіологічна ефективність (коефіцієнт зменшення) застосування додаткового «чистого» корму, що містив 0,1 та 1 % KFCCF, для зниження питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  у м'язовій тканині риб становила 7–16 та 12–27 разів відповідно, порівняно з контрольними групами та аборигенними рибами без додаткового «чистого» корму [12].

При хронічному надходженні  $^{137}\text{Cs}$  в організм риб з кормом та після застосування корму із вмістом 0,1 та 1 % KFCCF спостерігалася різке зменшення вмісту  $^{137}\text{Cs}$  у рибі в контрольованих лабораторних акваріумних експериментах [13]. При цьому, протягом перших 100 діб вміст  $^{137}\text{Cs}$  в організмі риб, які вживали корм із вмістом 0,1 і 1 % KFCCF, був навіть нижче, ніж у риб, які отримували тільки «чистий» корм. Це свідчить про вплив KFCCF на швидкість виведення  $^{137}\text{Cs}$  з організму риб. Отже, застосування корму для риб з 0,1 та 1 % KFCCF протягом перших 100 діб є навіть більш ефективним порівняно з переведенням риби лише на «чистий» корм у «чистій» воді. При цьому швидкість виведення  $^{137}\text{Cs}$  з риби становила  $0,01$ – $0,02$  доби $^{-1}$  ( $T_{1/2} = 40$ – $70$  діб). У сільськогосподарських тварин добавки KFCCF у кормі впливали на поглинання  $^{137}\text{Cs}$  у шлунково-кишковому тракті, але при цьому, на відміну від риб, не впливали на швидкість виведення вже депонованого в організмі цезію [5]. Для риб статистично достовірно ( $p < 0,01$ ) встановлено вплив KFCCF на швидкість виведення радіоцезію з організму: вона була приблизно у 2–4 рази вищою, ніж за умов використання лише «чистого» корму без KFCCF [14].

Радіологічна ефективність застосування 0,1 та 1 % KFCCF у кормі з метою зменшення вмісту  $^{137}\text{Cs}$  у рибі через 60 діб становить 3 та 4 рази відповідно [13].

На підставі отриманих результатів [12, 13] можна зробити висновок, що застосування менших концентрацій KFCCF в кормі риб ( $< 0,1$  % або  $< 8$  мг/кг маси риб) може бути також ефективним, проте це потребує окремих експериментальних досліджень.

Метою цієї роботи було наукове обґрунтування використання оптимальних з точки зору радіологічної ефективності та ціни концентрацій KFCF у кормах для зменшення радіоактивного забруднення  $^{137}\text{Cs}$  риби для вирішення проблеми отримання нормативно «чистої» продукції для радіаційного захисту населення на радіоактивно забруднених територіях.

## 2. Матеріали і методи досліджень

Акваріумні експерименти з кормом, який містить 0–1 % KFCF, проводилися протягом 24.06.2024 р. - 23.08.2024 р. у шести 27-літрових акваріумах при температурі води  $24 \pm 2$  °С. Етичне схвалення дослідів надано Біоетичною комісією НУБіП України № 003/2023 відповідно до вимог Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» від 21.02.2006 № 3447-IV.

*Виготовлення корму для риби.* Для підготовки акваріумних експериментів щодо оптимізації застосування корму з різним вмістом KFCF при хронічному надходженні  $^{137}\text{Cs}$  в рибу, корм «Nutra Olymric» 1,5 мм попередньо був забруднений  $^{137}\text{Cs}$  згідно з методикою, яка була нами розроблена раніше [13]. До 35 мл 96 % етанолу додавали 5 мл розчину  $^{137}\text{CsCl}$  з питомою активністю  $0,38 \pm 0,04$  кБк·мл<sup>-1</sup>. Отриманий розчин рівномірно додавали до 20 г корму (1:2) і сушили на чашці Петрі в сушильній шафі при температурі 45 °С з періодичним перемішуванням протягом 3 год. Середня питома активність  $^{137}\text{Cs}$  у сухому кормі, усереднена за результатами вимірювань 30 аліквот масою  $10,0 \pm 0,1$  г, становила  $94 \pm 5$  Бк·г<sup>-1</sup>.

В якості контролю та базового корму було використано промисловий гранульований тунційний корм для коропових риб фірми «Скалярія» з

розміром гранул 3 мм, що містить 30 % білка, 10 % жиру, 3 % клітковини та вітаміни А, D3, Е і С (<https://skaliaria.rv.ua/>). Корм було виготовлено в промислових умовах методом екструзії – сухого гранулювання [11–13]. Корм з різним змістом залізо-гексаціаноферату калію (KFCF -  $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ) виготовлявся у лабораторних умовах методом мокрого гранулювання, починаючи від мінімальної концентрації БЛ до максимальної, а також все обладнання ретельно очищалося після кожного етапу приготування корму для запобігання перехресному надходженню гексаціаноферату в корм [15].

Для цього 100 г базового корму для коропових риб фірми «Скалярія» протягом 100 с подрібнювали в дробарці ІКА Model M 20 S000 (Німеччина, <https://www.ika.com/en>) для отримання контрольної партії корму, в якому не міститься KFCF. До 99 г перемішаного корму додавали 1 г KFCF і знову перемішували в дробарці протягом 100 с для отримання корму із вмістом KFCF 1 %. З перемішаного корму з 1 % KFCF відбирали наважки 10, 5, 2,5 і 1 г, в які додавали базовий корм у кількості 90, 95, 97,5 і 99 г відповідно, і знову перемішували протягом 100 с для отримання суміші із вмістом KFCF 0,1, 0,05, 0,025 та 0,01 %. Для мокрого гранулювання до суміші корму (100 г) з різним вмістом KFCF додавали 60 % дистильованої води і ретельно перемішували до досягнення однорідної пластичної маси [15]. Мокре гранулювання корму проводили за допомогою ручної м'ясорубки. Потім корм сушили в сушильній шафі при температурі 105 °С протягом 1 год [15].

У результаті виконаної роботи був приготовлений корм, що містить 1, 0,1, 0,05, 0,025, 0,01 та 0 % залізо-гексаціаноферату калію (рис. 1).

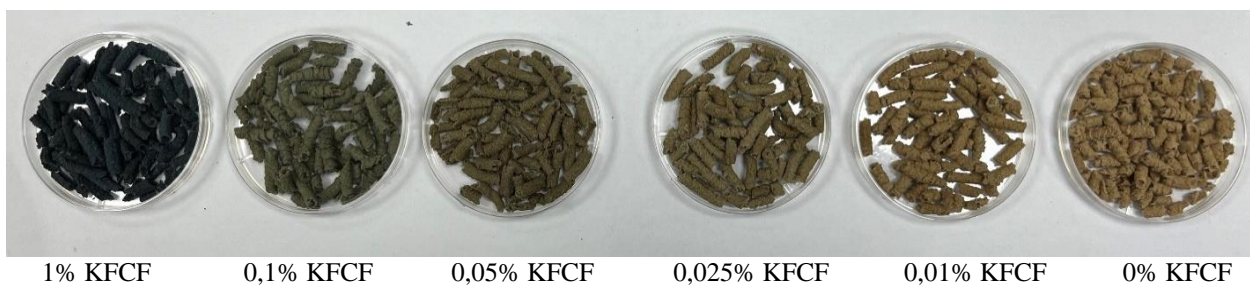


Рис. 1. Корм, що містить 1, 0,1, 0,05, 0,025, 0,01 та 0 % залізо-гексаціаноферату калію (KFCF) -  $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ . (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

*Об'єкти дослідження.* Як і в попередніх наших експериментах [11–14], використовували карасів сріблястих (*Carassius gibelio*, Bloch, 1782), які належать до родини коропових (Cyprinidae), із середньою живою масою  $20 \pm 1$  г. «Чиста» риба була виловлена з озера поблизу Києва з питомою активністю  $^{137}\text{Cs}$  в рибі менше

10 Бк·кг<sup>-1</sup>. Перед початком експериментів було проведено вимірювання маси карасів сріблястих для розподілу їх на однорідні групи по шість карасів в кожному із шести акваріумів об'ємом 27 л (табл. 1) залежно від маси риб (щоб загальна маса в акваріумі всіх шести риб була близько 120 г).

Таблиця 1. Середня маса риб в експерименті  $m \pm SE$ 

Акваріум	1	2	3	4	5	6
Вміст KFCF у кормі, %	1	0,1	0,05	0,025	0,01	0 Контроль
<i>t</i> , доба	Середня маса риб					
0	19,6 ± 1,3	19,6 ± 0,9	19,5 ± 1,5	19,8 ± 1,3	19,5 ± 1,4	19,9 ± 1,2
15	20,9 ± 1,4	21,3 ± 1,2	21,4 ± 1,6	21,4 ± 1,2	21,2 ± 1,2	21,4 ± 1,3
30	20,7 ± 1,4	21,2 ± 1,3	21,6 ± 1,7	21,6 ± 1,3	21,0 ± 1,3	21,1 ± 1,4
45	21,3 ± 1,4	21,8 ± 1,4	22,4 ± 1,8	22,5 ± 1,3	21,8 ± 1,2	21,7 ± 1,5
60	21,7 ± 1,5	22,2 ± 1,4	23,0 ± 1,9	22,9 ± 1,2	22,2 ± 1,2	22,3 ± 1,6

*Метод дослідження.* Риба була забруднена внаслідок хронічного надходження <sup>137</sup>Cs з кормом «Nutra Olympic» 1,5 мм (0,2 г·доба<sup>-1</sup> у кожен акваріум), який містив <sup>137</sup>Cs і поїдався рибою менше, ніж за 30 с. Порцію 0,200 ± 0,005 г (19 ± 2 Бк·доба<sup>-1</sup>) корму давали риbam у кожному акваріумі щодня о 9:00 протягом 60 діб, як і в попередніх наших експериментах [13, 15]. Протягом години (15:00–16:00) риби отримували раніше виготовлений корм – по 1,0 г у кожен акваріум з різним вмістом KFCF (1 % (акваріум № 1), 0,1 % (акваріум № 2), 0,05 % (акваріум № 3), 0,025 % (акваріум № 4), 0,01 % (акваріум № 5), а також корм без KFCF (акваріум № 6 – контроль)), який риби поїдали протягом 30 хв. Усього 1,2 г корму щодня – близько 1 % від маси риб в акваріумі. Таким чином, за середньої сумарної маси риб в акваріумах 125 ± 5 г протягом 60 діб, риби отримували щодня по 1,0 г корму, що містив 0,01–1 % KFCF. Така доза відповідала споживанню 0,8–80 мг KFCF на 1 кг живої маси риб на добу. Таке споживання гексаціанофератів узгоджується з нормами, рекомендованими для сільськогосподарських жуйних тварин [5].

В експерименті було використано артезіанську воду зі свердловини локальної водопровідної системи Українського науково-дослідного інституту сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України із вмістом K<sup>+</sup> – 11 ± 1 мг·L<sup>-1</sup> та Ca<sup>2+</sup> – 155 ± 5 мг·L<sup>-1</sup>. Вода в акваріумах фільтрувалася зануреними фільтрами (AquaEl Fan Plus, Польща), також у воду подавалося повітря за допомогою компресорів (Tetra Tetrates APS 50, Німеччина) і розпилювачів (Tetra AS50, Німеччина). Один раз на тиждень в акваріумах проводили 30 % заміну води, а кожні 15 діб – повну (100 %) заміну на попередньо підготовлену воду під час вимірювання маси та активності <sup>137</sup>Cs у риб.

Під час експерименту через кожні 15 діб проводили прижиттєві вимірювання у динаміці активності <sup>137</sup>Cs в рибі, а також наприкінці експерименту була проведена камеральна обробка і лабораторний аналіз відібраних зразків та вимірювання питомої активності <sup>137</sup>Cs у зразках

методами напівпровідникової гамма-спектрометрії.

*Відбір зразків.* Індивідуальні зразки від кожної риби та композитні зразки групи риб (N = 6) з кожного акваріума були відібрані наприкінці експерименту 23.08.2024 р. Визначалася маса і загальна довжина кожної риби. Періодично відбирали зразки води (1 л) з кожного акваріума для вимірювання питомої активності <sup>137</sup>Cs та хімічного складу води. Вимірювання концентрації у воді акваріумів іонів K<sup>+</sup> і Ca<sup>2+</sup> проводили за допомогою іонметрів Horiba LAQUAtwin K-11 Compact Potassium Ion Meter Waterproof та Horiba LAQUAtwin Ca-11 Compact Calcium Ion Meter Waterproof, Японія.

Зразки тканини риб зберігали в морозильній камері при температурі –20 °C до аналізу [13]. Активність <sup>137</sup>Cs у кожній рибині та групі риб (N = 6) з кожного акваріума регулярно вимірювали впродовж експериментів за допомогою живого моніторингу, щоб оцінити динаміку питомої активності <sup>137</sup>Cs. І маса, і довжина кожної риби реєструвалися під час кожного живого моніторингу та відбору проб. Масу риби вимірювали на вагах KERN (pfb, Німеччина) з точністю 0,1 г.

*Вимірювання активності <sup>137</sup>Cs.* Як і в попередніх наших експериментах [13–15], вимірювання активності <sup>137</sup>Cs у живій рибі та воді проводили в лабораторних умовах. Для вимірювання активності <sup>137</sup>Cs у кожній живій рибі індивідуально та у шести риб разом, рибу з кожного акваріума поміщали в ємність Марінеллі (1 л) з «чистою» водою, загальну масу якої доводили до 500 г (для однієї риби) або 1000 г (для групи із шести риб). Вимірювання активності <sup>137</sup>Cs проводили протягом 600–1000 с на сцинтиляційному гамма-спектрометрі (СЕГ-05, Україна; програмне забезпечення ЛСРМ) з детектором NaI(Tl) 63 × 63 мм у пасивному захисті (5 см). Коефіцієнт варіації вимірювань за рахунок різних положень риби в посудині Марінеллі та випадкова статистична похибка вимірювання не перевищувала 10 %. Фізіологічний вплив вимірювання риби на прискорене дихання та аномальну плавальну поведінку не спостерігалось [13–15].

Визначення питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  у пробах води та риби проводили на основі вимірювань за допомогою низькофонового гамма-спектрометричного комплексу з багатоканальним аналізатором ASPEC-927 (програмне забезпечення GammaVision 32) та детектором з високочистого германію GEM-30185 “EG & G”, ORTEC” (США) з енергетичною роздільною здатністю 1,78 кеВ при лінії  $^{60}\text{Co}$  1,33 МеВ у низькофоновому пасивному захисті [13, 14]. Мінімально детектована активність  $^{137}\text{Cs}$  у геометрії вимірювання становила 0,1 Бк. Для вимірювання активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді та зразках риби використовували ємності Маріселлі (1 л) та пластикові контейнери 110 см<sup>3</sup>.

Наприкінці експериментального періоду рибу, виміряну *in vivo* в ємності Маріселлі 1 л, заморожували при температурі  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ , препарували і гомогенізували. Отриману пробу поміщали в пластикові контейнери 110 см<sup>3</sup> та вимірювали активність  $^{137}\text{Cs}$  за допомогою каліброваного гамма-спектрометра [13, 14].

Коефіцієнт поправки на геометрію ( $0,8 \pm 0,1$  для кожної живої риби в індивідуальних вимірюваннях та  $0,9 \pm 0,1$  для групи із шести риб відносно ємності Маріселлі 1 л) було розраховано для порівняння швидкості підрахунку для піка 661,7 кеВ, виміряного на групі живих риб різної маси, з лабораторними вимірюваннями  $^{137}\text{Cs}$  у тих самих рибах, препаративаних у кінці експерименту [12–15].

Усі результати вимірювання питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  в риби наведено для природної вологості зразків (wet mass – WM).

*Математичний аналіз результатів.* Залежність зміни активності  $^{137}\text{Cs}$   $A(t)$  в організмі риб від часу  $t$  можна описати лінійним диференціальним рівнянням [13, 14]:

$$\frac{dA(t)}{dt} = A_{feed} - (k_b + \lambda)A(t), \quad (1)$$

де  $A(t)$  – активність  $^{137}\text{Cs}$  у рибі (Бк) у момент часу  $t$  (добі);  $A_{feed}$  – швидкість надходження  $^{137}\text{Cs}$  з корму (Бк·доба<sup>-1</sup>);  $k_b$  – швидкість виведення  $^{137}\text{Cs}$  (доба<sup>-1</sup>);  $\lambda$  – константа радіоактивного розпаду  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\lambda = 6,3 \cdot 10^{-5}$  доба<sup>-1</sup>. Біологічний період напіввиведення  $^{137}\text{Cs}$   $T_{1/2} = \ln(2)/k_b$  (добі).

При вмісті радіонукліда в рибі в початковий момент  $A(t=0) = 0$  та  $k_b \gg \lambda$  [11–15] розв’язання рівняння (1) буде мати вигляд [11, 15]:

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{A_{feed}}{(k_b + \lambda)} (1 - \exp(-(k_b + \lambda)t)) \cong \\ &\cong \frac{A_{feed}}{k_b} (1 - \exp(-k_b t)). \end{aligned} \quad (2)$$

При  $t \rightarrow \infty$   $\frac{dA_f}{dt} \approx 0$  рівноважна активність  $^{137}\text{Cs}$  в рибі дорівнюватиме:

$$A(t \rightarrow \infty) = \frac{A_{feed}}{k_b}. \quad (3)$$

Питома активність  $^{137}\text{Cs}$  в рибі ( $C(t)$ , Бк·кг<sup>-1</sup>), в будь-який момент часу  $t$  дорівнюватиме:

$$C(t) = \frac{A(t)}{M(t)} = \frac{A(t)}{(M(t=0) + mt)}, \quad (4)$$

де  $M(t=0)$  і  $M(t)$  – маса риб на початок експерименту при  $t=0$  і в момент часу  $t$ , кг;  $m$  – швидкість зміни маси риб, кг·доба<sup>-1</sup>.

*Статистичний аналіз даних.* Для аналізу експериментальних даних – отримання середніх значень, стандартних відхилень і коефіцієнтів кореляції використовувався стандартний набір інструментів MS Excel і STATISTICA. Достовірність відмінностей між вибірками аналізували за допомогою непараметричного критерія Крускала – Уолліса. Параметри динамічних моделей були отримані з експериментальних даних методом найменших квадратів. На рисунках наведено середні значення  $m \pm SE$  і стандартне відхилення для  $N = 6$ . Статистична значимість встановлена на рівні  $p < 0,05$ .

### 3. Результати дослідження та їх обговорення

Зміну середньої маси риб в ході експериментів з використанням корму з різним вмістом KFCF наведено в табл. 1. Спостерігалось монотонне збільшення маси риб. Не було встановлено статистично значущого впливу KFCF у кормі (0–1 %) на збільшення маси риб ( $p > 0,05$ ).

У табл. 2 наведено параметри лінійної залежності (4) зміни середньої маси риб в експерименті. Швидкість приросту маси риб ( $m$ ) змінилася від 0,031 до 0,053 г·доба<sup>-1</sup> і не корелювала із вмістом KFCF у кормі риб (див. табл. 1 і 2). Це підтверджує відсутність впливу KFCF на зростання риб.

Результати вимірювання активності та питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  у живій рибі наведено на рис. 2. Застосування KFCF у кормах (акваріуми № 1–5) призводить до статистично достовірного зменшення надходження  $^{137}\text{Cs}$  у рибу (акваріум № 6). При цьому спостерігається зменшення ефективності застосування корму з мінімальним вмістом 0,01 % KFCF (акваріум № 5) порівняно з іншими концентраціями, в яких містилося 0,025–1 % KFCF (акваріуми № 1–4) (див. рис. 2).

Таблиця 2. Параметри лінійної залежності (4) зміни середньої маси риб та зміни активності <sup>137</sup>Cs в рибі (2) в експерименті

Акваріум	1	2	3	4	5	6
Вміст KFCF у кормі, %	1	0,1	0,05	0,025	0,01	0 Контроль
Параметри залежності зміни маси риб (4)						
$M(t=0)$ , г	19,9 ± 0,1	20,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	20,2 ± 0,1	19,9 ± 0,1	20,3 ± 0,1
$m$ , г·доба <sup>-1</sup>	0,031 ± 0,003	0,040 ± 0,003	0,053 ± 0,004	0,049 ± 0,003	0,041 ± 0,003	0,033 ± 0,003
$R^2$	0,84	0,84	0,92	0,92	0,84	0,81
Параметри залежності зміни активності <sup>137</sup> Cs в рибі (2) у цьому експерименті						
$A_{feed}$ , Бк·доба <sup>-1</sup>	3,5 ± 1,0	4,5 ± 0,6	3,3 ± 0,5	5,0 ± 0,8	4,6 ± 0,9	6,0 ± 0,5
$k_b$ , доба <sup>-1</sup>	0,03 ± 0,02	0,022 ± 0,007	0,005 ± 0,004	0,020 ± 0,008	0,008 ± 0,007	0,004 ± 0,003
$R^2$	0,94	0,99	0,98	0,98	0,98	0,996
$A_{feed}^i / A_{feed}^6$	0,6 ± 0,2	0,8 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,8 ± 0,2	0,8 ± 0,2	1,0 ± 0,1
$T_{1/2}$ , доба	20 ± 10	32 ± 10	133 ± 130	35 ± 14	87 ± 80	172 ± 130
$A(t \rightarrow \infty) = A_{feed} / k_b$ , Бк	103 ± 58	209 ± 70	638 ± 600	255 ± 112	582 ± 550	1646 ± 1550
Параметри залежності зміни активності <sup>137</sup> Cs в рибі (2) в аналогічному експерименті [15]						
$A_{feed}$ , Бк·доба <sup>-1</sup>	4,7 ± 0,3	6,0 ± 0,3	–	–	–	8,4 ± 0,3
$k_b$ , доба <sup>-1</sup>	0,037 ± 0,004	0,027 ± 0,003	–	–	–	0,007 ± 0,001
$R^2$	0,997	0,998	–	–	–	0,999
$A_{feed}^i / A_{feed}^6$	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1	–	–	–	1,0 ± 0,1
$T_{1/2}$ , доба	18,5 ± 2,1	26,0 ± 2,5	–	–	–	97 ± 20
$A(t \rightarrow \infty) = A_{feed} / k_b$ , Бк	126 ± 17	224 ± 24	–	–	–	1180 ± 244

Слід також зазначити, що не було статистично значимих відмінностей при використанні кормів, виготовлених методом мокрого гранулювання, з вмістом KFCF 0,025 і 0,05 % (акваріуми № 2 і 4). Радіологічна ефективність (кратність зниження активності <sup>137</sup>Cs в рибі) застосування KFCF зростає зі збільшенням його вмісту в кормі (див. рис. 2) і досягає протягом 60 діб максимуму – 2,1 і 3,5 рази при концентрації 0,1 і 1 % KFCF (акваріуми № 2 і № 1), що узгоджується з раніше отриманими результатами [12–15]. Коли вміст KFCF у кормі знижувався до менше 0,1 %, його вплив на зменшення вмісту цезію в рибі становив менше, ніж у 2 рази (див. рис. 2, а).

Протягом 60 діб активність та питома активність <sup>137</sup>Cs в рибі при застосуванні корму з різним вмістом залізо-гексаціаноферату калію не встигала досягати стаціонарного рівня, особливо це стосується кормів, які не містили KFCF (див. рис. 2). Для визначення радіологічної ефективності контрзаходу була проведена статистична обробка експериментальних даних. Тимчасова динаміка активності <sup>137</sup>Cs в рибі була описана загальновідомою залежністю (2) (див. рис. 2, а). Параметри залежності для опису активності <sup>137</sup>Cs в рибі (2) були отримані методом найменших квадратів за допомогою програми STATISTICA та наведені у табл. 2. У цілому, радіологічна ефективність (Reduction Factor) використання корму

$$RF = A^6(t \rightarrow \infty) / A^i(t \rightarrow \infty) = \frac{(A_{feed}^6 / k_b^6)}{(A_{feed}^i / k_b^i)}$$

який містив 0,1 і 1 % KFCF була досить високою і досягала 8 та 16 разів (див. табл. 2), що добре узгоджується з раніше отриманими результатами [12, 13, 15]. Корм із вмістом 0,01–0,05 % KFCF мав найменшу радіологічну ефективність – 3–6 разів.

Висока ефективність застосування 0,1 і 1 % KFCF в кормі була зумовлена більшою мірою зменшення періоду напівзменшення вмісту <sup>137</sup>Cs у риб ( $T_{1/2} = 20\text{--}30$  діб порівняно з контролем – близько 100 діб [13–15]) і меншою мірою зменшення всмоктування радіоцезію у шлунково-кишковому тракті  $A_{feed}^i / A_{feed}^6 = 0,6\text{--}0,8$  (див. табл. 2), що добре узгоджується з раніше отриманими результатами [13, 15].

При комерційній вартості корму для коропових риб близько 50–100 грн·кг<sup>-1</sup> і вартості KFCF близько 2–5 грн·г<sup>-1</sup>, додавання 0,1 % KFCF призводить до підвищення вартості корму на 2–10 %. При збільшенні вмісту KFCF до 1 % вартість корму може зрости майже вдвічі, що робить таку добавку економічно малорентабельною, незважаючи на вищу радіологічну ефективність (у 1,5–2 рази).

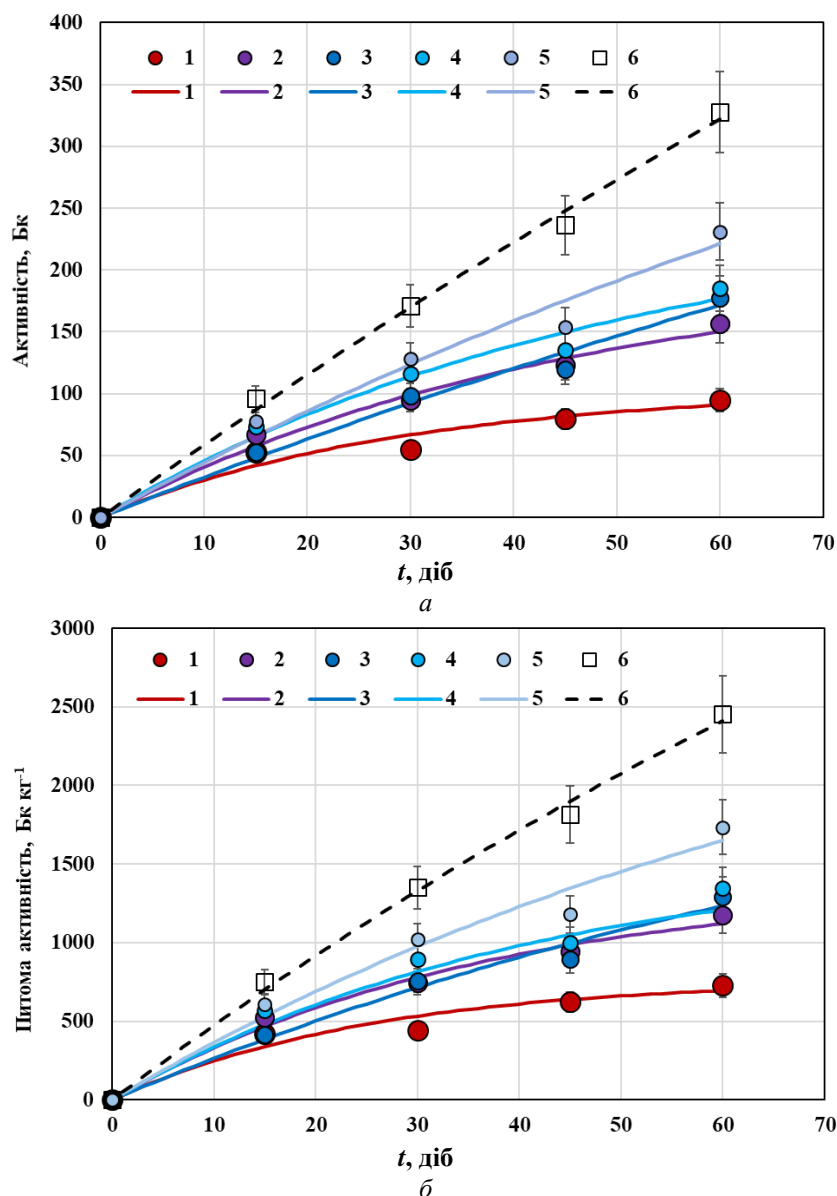


Рис. 2. Динаміка активності (а) та питомої активності (б)  $^{137}\text{Cs}$  в рибі при застосуванні кормів виготовлених методом мокрого гранулювання з 1 % KFCF (акваріум № 1), 0,1 % KFCF (акваріум № 2), 0,05 % KFCF (акваріум № 3), 0,025 % KFCF (акваріум № 4), 0,01 % KFCF (акваріум № 5), а також контрольного корму без KFCF (акваріум № 6). Лініями наведено екстраполяцію залежностей (2) і (4), отриманих методом найменших квадратів. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

У ході експерименту періодично відбиралися проби води для вимірювання питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  ( $C_w$ ,  $\text{Bq}\cdot\text{л}^{-1}$ ). Було встановлено, що в акваріумах де риб годували кормом з KFCF, питома активність  $^{137}\text{Cs}$  у воді була суттєво меншою порівняно з акваріумом № 6, в якому корм не містив KFCF (табл. 3). Це зумовлено абсорбцією  $^{137}\text{Cs}$  з води на занурюваних фільтрах, які містили фекалії риб з KFCF. При вмісті в кормі 1 % KFCF (акваріум № 1) близько 90 % активності  $^{137}\text{Cs}$  було на фільтрах, у той час як при використанні корму без KFCF (акваріум № 6) основна частина  $^{137}\text{Cs}$  була у воді та рибі (див. табл. 3). При максимальній питомій активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді контрольного акваріума № 6 близько 12  $\text{Bq}\cdot\text{л}^{-1}$  (див.

табл. 3), безпосереднє надходження  $^{137}\text{Cs}$  в рибу з води не перевищувало  $0,1 \text{ Bq}\cdot\text{доба}^{-1}$  [14], що набагато менше надходження з кормом  $A_{\text{feed}} = 6,0 \pm 0,5 \text{ Bq}\cdot\text{доба}^{-1}$  (див. табл. 2). Тому безпосереднім надходженням  $^{137}\text{Cs}$  у рибу з води порівняно з кормом можна знехтувати.

За допомогою методики, яка раніше нами вже використовувалася [12, 16], було оцінено можливість забруднення корму за рахунок абсорбції  $^{137}\text{Cs}$  KFCF з води. Для цього 5 г сухого корму з різним вмістом KFCF на різний час поміщали у пластиковій ємності об'ємом  $30 \text{ cm}^3$  з отворами в 1 л розчину  $^{137}\text{Cs}$  у воді з питомою активністю  $C_w = 1 \text{ kBq}\cdot\text{л}^{-1}$ . Після цього вимірювали масу та питому активність  $^{137}\text{Cs}$  у кормі ( $C_{\text{feed}}$ ,  $\text{Bq}\cdot\text{кг}^{-1}$ ).

Таблиця 3. Результати вимірювання активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді акваріумів ( $A_w = 27 \text{ л} \cdot \text{С}_w, \text{ Бк}$ ), надходження активності з кормом у воду акваріума за 30 діб ( $19 \text{ Бк} \cdot \text{доба}^{-1} \cdot 30 \text{ діб} = 570 \text{ Бк}$ ), зміни вмісту  $^{137}\text{Cs}$  в рибі за 30 діб ( $\Delta A = A(t_{i+1}) - A(t_i), \text{ Бк}$ ) та балансової оцінки активності  $^{137}\text{Cs}$  на фільтрах ( $A_s(t_{i+1} - t_i) = 570 \text{ Бк} - A_w - \Delta A, \text{ Бк}$ ), а також відносного вмісту активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді ( $W = A_w / (570 \text{ Бк}) \cdot 100, \%$ ), рибі ( $A = (\Delta A / (570 \text{ Бк})) \cdot 100, \%$ ) і на фільтрах ( $F = (A_s(t_{i+1} - t_i) / (570 \text{ Бк})) \cdot 100, \%$ )

Дата	Акваріум	1	2	3	4	5	6
	Вміст KFСF у кормі, %	1	0,1	0,05	0,025	0,01	0
08.08.2024 ( $t_{i+1} - t_i = 30$ діб)	19 Бк·д <sup>-1</sup> ·30 д, Бк	570 ± 250	570 ± 250	570 ± 250	570 ± 250	570 ± 250	570 ± 250
	$A_w, \text{ Бк}$	39 ± 11	54 ± 24	54 ± 16	90 ± 33	125 ± 30	313 ± 43
	$\Delta A, \text{ Бк}$	27 ± 5	57 ± 11	67 ± 14	62 ± 13	76 ± 15	140 ± 28
	$A_s(t_{i+1} - t_i), \text{ Бк}$	504 ± 51	4599 ± 57	449 ± 54	418 ± 61	369 ± 60	117 ± 72
	$W, \%$	6,8 ± 2,0	9,5 ± 4,3	9,5 ± 2,9	15,8 ± 6,0	21,9 ± 5,6	54,9 ± 9,0
	$A, \%$	4,7 ± 1,0	10,0 ± 2,1	11,8 ± 2,7	10,9 ± 2,5	13,3 ± 2,9	24,6 ± 5,4
	$F, \%$	88,4 ± 11,9	80,5 ± 12,2	78,8 ± 11,8	73,3 ± 12,5	64,7 ± 12,0	20,5 ± 12,7

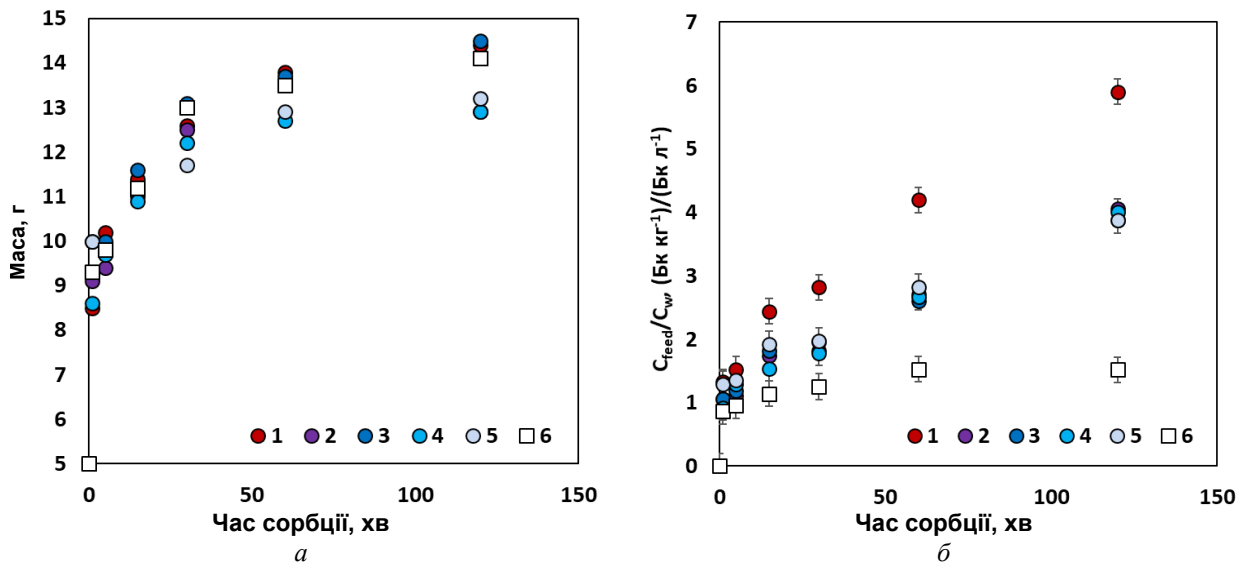


Рис. 3. Динаміка маси корму (*a*) та сорбції кормом  $^{137}\text{Cs}$  (*б*) з розчину при вмісті 1 % KFСF (акваріум № 1), 0,1 % KFСF (акваріум № 2), 0,05 % KFСF (акваріум № 3), 0,025 % KFСF (акваріум № 4), 0,01 % KFСF (акваріум № 5), а також контрольного корму без KFСF (акваріум № 6). (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Отримані результати показали (рис. 3), що через 1–2 год маса корму за рахунок змочування розчином збільшується в 2,5–3 рази, незалежно від вмісту в ньому KFСF (див. рис. 3, *a*). При цьому спостерігається збільшення абсорбції  $^{137}\text{Cs}$  кормом з води (коефіцієнта розподілу – solid-liquid distribution coefficient ( $K_d$ ), тобто відношення питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  у кормі ( $C_{\text{feed}}, \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ ) до питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  у розчині ( $C_w, \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$ ) зі збільшенням вмісту в ньому KFСF, яке через 120 хв досягає максимального значення  $K_d = 6 (\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}) / (\text{Бк} \cdot \text{л}^{-1})$  при 1 % KFСF (див. рис. 3, *б*).

Оскільки в експерименті питома активність  $^{137}\text{Cs}$  у воді акваріумів, де використовувався корм з KFСF, не перевищувала  $5 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$  (див. табл. 3), то і забруднення 1 г корму  $^{137}\text{Cs}$  від води було менше 0,005 Бк, що істотно менше добового хронічного надходження  $^{137}\text{Cs}$  з кормом «Nutra Olympic»

( $19 \pm 2 \text{ Бк} \cdot \text{доба}^{-1}$ ) і жодним чином не вплинуло на результати експерименту.

#### 4. Висновки

Експерименти показали, що використання корму із вмістом 0,1–1 % залізо-гексаціаноферату калію, виготовленого методом мокрого гранулювання, є ефективним і відносно недорогим контрзаходом для зменшення забруднення  $^{137}\text{Cs}$  риб. При концентрації в кормі 0,1 та 1 % радіологічна ефективність використання KFСF була досить високою і досягала 8 та 16 разів.

Було підтверджено висновок наших попередніх досліджень про те, що на відміну від ссавців, застосування KFСF у кормі для риб призводить до незначного зменшення швидкості всмоктування радіоцезію в шлунково-кишковому тракті риб (в 1,3–1,7 раза), але при цьому суттєво зменшує період його напіввиведення з організму до 20–30 діб.

Використовувати високі концентрації KFCF близько 1 % порівняно з 0,1–0,2 %, на наш погляд, є недоцільним через непропорційність збільшення радіологічної ефективності (до 2 разів) та ціни добавки KFCF до корму (до 10 разів), а також можливого психологічного чинника його застосування через радикально синє забарвлення корму (див. рис. 1). Слід також зазначити, що використання корму із вмістом 0,1–0,2 % KFCF при рекомендованому щоденному споживанні корму 1–2 % від маси риб відповідає найбільшому значенню надходження AFCF згідно з офіційним постійним дозволом ЄС від 14 жовтня 2001 р. (від 1 до 15 мг на 1 кг живої маси) на використання БЛ з метою зв'язування і виведення радіоактивного

цезію з організму сільськогосподарських тварин (Постанова 2013/2001) [17].

У деяких випадках високі рівні вмісту радіоактивних ізотопів цезію в прісноводній рибі є основним джерелом надходження радіонуклідів до організму людини та її внутрішнього опромінення [2], а також високих рівнів опромінення самої риби [18]. У зв'язку з цим, додавання KFCF до корму для риб є надзвичайно ефективним і водночас недорогим засобом радіаційного захисту як населення, так і навколишнього середовища.

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. А.Н. Марей и др. *Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека*. Под ред. А.Н. Марей (Москва: Атомиздат, 1980) 188 с. / A.N. Marey et al. *Global Fallout of Nuclear Explosion Products as a Factor in Human Irradiation*. A.N. Marey (Ed.) (Moskva: Atomizdat, 1980) 188 p. (Rus)
2. STI/PUB/1239. *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.
3. M. Balonov et al. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident. *J. Radiol. Prot.* 38 (2018) 854.
4. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді (ДР-2006). Гігієнічний норматив ГН 6.6.1.1-130-2006. / Permissible levels of radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in food and drinking water (DR-2006). Hygienic standard of the State Sanitary and Epidemiological Service. HS 6.6.1.1-130-2006. (Ukr)
5. IAEA-TRS-475. *Guidelines for Remediation Strategies to Reduce the Radiological Consequences of Environmental Contamination*. S. Fesenko, B.J. Howard (Eds.) (Vienna, IAEA, 2012). 183 p.
6. B.J. Howard, N.A. Beresford, G. Voigt. Countermeasures for animal products: a review of effectiveness and potential usefulness after an accident. *J. Environ. Radioact.* 56(1-2) (2001) 115.
7. A. Ulanovsky et al. ReSCA: decision support tool for remediation planning after the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.* 50 (2011) 67.
8. T. Wada et al. Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima. *J. Environ. Radioact.* 204 (2019) 132.
9. О.Є. Каглян та ін. Динаміка питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  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  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in representatives of ichthyofauna of Chernobyl exclusion zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(1) (2021) 62. (Ukr)
10. В.О. Кашпаров та ін. Радіоактивне забруднення риби у заплавному озері Старуха Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика* 26(2) (2025) 183. / V.O. Kashparov et al. Radioactive contamination of fish in the flooding lake Starukha in the Chernobyl Exclusion Zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 26(2) (2025) 183. (Ukr)
11. O. Kashparova et al. Effects of clean feed as countermeasure to reduce the  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  levels in fish from contaminated lakes. *J. Environ. Radioact.* 258 (2023) 107091.
12. P. Pavlenko et al. Prussian Blue to reduce radiocesium accumulation in fish in lakes affected by the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioact.* 270 (2023) 107282.
13. V. Kashparov et al. Effect of potassium ferric hexacyanoferrate in feed on  $^{137}\text{Cs}$  uptake and excretion by silver Prussian carp. *J. Environ. Radioact.* 278 (2024) 107502.
14. V. Kashparov et al. Uptake from water and depuration of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  by silver Prussian carp (*Carassius gibelio*). *J. Environ. Radioact.* 276 (2024) 107443.
15. V. Kashparov et al. Effect of different Prussian Blue compounds in feed on  $^{137}\text{Cs}$  uptake and excretion by silver Prussian carp. *J. Environ. Radioact.* 289 (2025) 107771.
16. V. Kashparov et al. The dependence of  $^{137}\text{Cs}$  absorption by carp fish feed on the content of various types of Prussian Blue. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine* 21(3) (2025) 49.
17. European Commission. Directorate-General for Research and Innovation. EURANOS: recovery handbooks for radiation incidents. Publications Office. EUR 24457 EN (2011).
18. V.V. Belyaev et al. Radiation dose reconstruction for higher aquatic plants and fish in Glyboke Lake during the early phase of the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioact.* 263 (2023) 107169.

V. Kashparov<sup>1,\*</sup>, S. Levchuk<sup>1</sup>, Yu. Khomutinin<sup>1</sup>,  
D. Kondratiuk<sup>2</sup>, M. Zhurba<sup>1</sup>, D. M. Holiaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ukrainian Institute of Agricultural Radiology,  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<sup>2</sup> Drevlianskyi Nature Reserve, Narodychi, Ukraine

\*Corresponding author: [kashparov@nubip.edu.ua](mailto:kashparov@nubip.edu.ua)

**THE EFFECT OF POTASSIUM FERRIC HEXACYANOFERRATE  
ON THE INTAKE AND EXCRETION OF  $^{137}\text{Cs}$   
FROM THE SILVER CARP (*CARASSIUS GIBELIO*)**

The influence of different concentrations (0, 0.01, 0.025, 0.05, 0.1 and 1 %) of potassium ferric hexacyanoferrate (KFCF -  $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ) in the feed on the intake and excretion of  $^{137}\text{Cs}$  the body of silver Prussian carp (*Carassius gibelio*) was studied in laboratory aquarium experiments at a water temperature of  $24 \pm 2$  °C. Industrial feed for carp fish containing 30 % protein, 10 % fat, 3 % fiber, and vitamins A, D3, E, and C from the company “Scalaria” with a granule size of 3 mm was used as a base for the production of feed with different KFCF contents. Every day at 3 p.m., six fish with a total mass of about 120 g in each of six aquariums consumed 1 g of feed with 0 - 1 % KFCF, which corresponds to the consumption of 0.8 - 80 mg KFCF per 1 kg of live weight of fish. Chronic intake of  $^{137}\text{Cs}$  in fish was carried out by feeding the fish daily at 9:00 a.m. 0.200  $\pm$  0.005 g of Nutra Olympic 1.5 mm feed ( $19 \pm 2$  Bq·day<sup>-1</sup>), which was contaminated with  $^{137}\text{Cs}$  ( $94 \pm 5$  Bq·g<sup>-1</sup>).

Measurement of the  $^{137}\text{Cs}$  activity in each live individual fish and in six fish together from each aquarium was carried out for 600 - 1000 s on a scintillation gamma spectrometer (SEG-05, Ukraine). Fish were placed in a Marinelli container (1 L) with “clean” water, and the total mass of which was adjusted to 500 g (for one fish) or 1000 g (for a group of six fish). At the end of the experiment, in vivo measurements of  $^{137}\text{Cs}$  activity in fish were duplicated by measurements of fish samples on a semiconductor gamma spectrometer.

During the 60 days of the experiment, a monotonic increase in fish mass (0.03 - 0.05 g·day<sup>-1</sup>) without a statistically significant effect of KFCF in the feed (0 - 1 %) was observed. It was established that the use of KFCF in feed leads to a statistically significant decrease in the intake of  $^{137}\text{Cs}$  in fish. The radiological efficiency of KFCF application increases by increasing its concentration in the feed and reaches a maximum of 2.1 and 3.5 times within 60 days at concentrations of 0.1 and 1 % KFCF, respectively. The result is consistent with our previous findings. Statistical processing of the experimental data showed that, in general, the radiological efficiency of using feed containing 0.1 and 1% KFCF was quite high and amounted to 8 and 16 times when reaching a stationary level of  $^{137}\text{Cs}$  contamination of fish. Feed containing 0.01 - 0.05 % KFCF had the lowest radiological efficiency, 3 - 6 times.

The conclusions of our previous studies confirmed that, unlike mammals, the use of KFCF in fish feed leads to a slight decrease in the rate of absorption of radiocesium in the gastrointestinal tract of fish (1.3 - 1.7 times), but at the same time, significantly reduces its biological half-life in the body to 20 - 30 days.

Overall, the experiment showed that the use of feed containing 0.1 and 1 % KFCF is an effective and relatively inexpensive countermeasure to reduce  $^{137}\text{Cs}$  contamination of fish.

**Keywords:**  $^{137}\text{Cs}$ , hexacyanoferrate, countermeasure, activity, Prussian blue, radioactive contamination, freshwater fish, reduction factor, potassium ferric hexacyanoferrate.

Надійшла / Received 01.08.2025