

Ю. В. Хомутінін

Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України, КиївОЦІНКА РАДІОЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРІСНОВОДНИХ ВОДОЙМ УКРАЇНИ
НА ПІЗНІЙ СТАДІЇ АВАРІЇ НА ЧАЕС

Розглянуто питання радіологічної безпеки забруднених ^{137}Cs і ^{90}Sr прісноводних водойм різних типів, які можуть використовуватися для розведення риби та промислового й аматорського рибальства на пізній стадії аварії на ЧАЕС. Наведено узагальнені статистичні залежності рівноважних коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs від концентрації калію та ^{90}Sr від концентрації кальцію у воді водойми. Запропонована методологія оцінки радіологічної безпеки прісноводних водойм як джерел риби та апробована її практична реалізація.

Ключові слова: вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді та рибі, коефіцієнти накопичення, радіологічна безпека прісноводних водойм.

Україна є країною, багатою на водні ресурси, - це моря, великі та малі річки, озера, штучні водосховища. На території України налічується близько 20 тисяч озер, з них понад 7 тисяч мають площу водної поверхні понад 0,1 км². Лише в басейні р. Прип'ять нараховується близько 2,3 тисяч озер [1]. До аварії на ЧАЕС ці водойми широко використовувалися для постачання населення водою, промислового виробництва і вилову риби, а також як місця відпочинку і спортивної рибалки.

У результаті ядерної аварії на ЧАЕС площа території України, забрудненої радіоізотопами цезію зі щільністю забруднення більше 37 кБк/м², становить близько 42 тис. км² [2]. На цій території розташовані великі і малі озера та річки, штучні водосховища та ставки, у тому числі частина Київського водосховища, які стали одним із джерел перорального надходження в організм людини основних дозоутворюючих радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr .

У водних організмах радіонукліди концентруються в значно більших кількостях, ніж є їхній вміст на таку ж одиницю об'єму води. Рівень концентрації радіонуклідів у тканинах і органах риби в десятки, а інколи й у тисячі разів вищий за їхній вміст у воді [3 - 5]. Відповідно до діючих в Україні державних гігієнічних нормативів ДР-2006 [6] вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr в питній воді не повинен перевищувати 2 Бк/л по кожному радіонукліду та задовольняти співвідношенню $^{137}\text{Cs}/2 + ^{90}\text{Sr}/2 < 1$. При таких рівнях забруднення ^{137}Cs і ^{90}Sr води у водоймі, вміст їх у свіжій рибі в цілому може значно перевищувати встановлені в ДР-2006 150 і 35 Бк/кг відповідно та не задовольняти співвідношення $^{137}\text{Cs}/150 + ^{90}\text{Sr}/35 < 1$. У даний момент на пізній стадії аварії на ЧАЕС вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді водойм, що розташовані за межами 30-кілометрової зони відчуження ЧАЕС,

відповідає вимогам ДР-2006. Проте це не можна сказати про вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у рибі. Прикладом цьому служить оз. Біле (Рівненська область, 280 км від ЧАЕС), де вміст ^{137}Cs в м'язах риб за результатами, отриманими у 2006 - 2007 рр., становить 320 - 420 Бк/кг [7]. Це порівняно із забрудненням риби ^{137}Cs в Усівському затоні (500 - 700 Бк/кг), що розташований в 30-кілометровій зоні ЧАЕС. Таким чином, в основу оцінки радіоекологічної безпеки прісноводних водойм для людини на пізній стадії аварії на ЧАЕС може бути покладено вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у рибі чи пов'язана з цими показниками величина.

Дослідження різних авторів показали [8 - 11], що вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у рибі - $C_f^{Cs}(t)$ і $C_f^{Sr}(t)$ відповідно - та їхня похідна величина $d(t) = ^{137}\text{Cs}(t)/150 + ^{90}\text{Sr}(t)/35$ для конкретного моменту часу t і середньорічні значення є випадковими величинами, які мають закон розподілу ймовірностей, близький до логнормального, а їхня динаміка описується відповідними випадковими процесами. У даній роботі $C_f^{Cs}(t)$ і $C_f^{Sr}(t)$ представляють середньорічний вміст ^{137}Cs і відповідно ^{90}Sr у рибі. Їхня величина для риб різного виду у водоймі визначається в цілому радіоактивним забрудненням середовища, в якому вони перебувають. Це, насамперед, вода та кормова база. Оскільки забруднення радіонуклідами кормової бази риб також обумовлено вмістом їх у воді, то прийнято розглядати вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у рибі в повільно мінливій фазі радіоактивного забруднення (пізня стадія аварії) як функцію питомої активності цих радіонуклідів у воді водойми

$$C_f^{Cs}(t) = CF_{^{137}\text{Cs}} \cdot C_w^{Cs}(t), \quad C_f^{Sr}(t) = CF_{^{90}\text{Sr}} \cdot C_w^{Sr}(t), \quad (1)$$

© Ю. В. Хомутінін, 2014

де CF_{137Cs} – середньорічний коефіцієнт накопичення ^{137}Cs рибою в цілому; CF_{90Sr} – середньорічний коефіцієнт накопичення ^{90}Sr рибою в цілому.

У роботі [8] показано, що на пізній стадії аварії на ЧАЕС, середньорічний вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді водойм різних типів описуються нестационарними логнормальними випадковими процесами, які можуть бути представлені мультиплікативною моделлю

$$C_w^{Cs}(t) = C_{w,0}^{Cs}(t) \cdot \Psi_w^{Cs}, \quad C_w^{Sr}(t) = C_{w,0}^{Sr}(t) \cdot \Psi_w^{Sr}, \quad (2)$$

де $C_{w,0}^{Cs(Sr)}(t)$ – тренд вмісту ^{137}Cs (^{90}Sr) у воді водойми, Бк/л; $\Psi_w^{Cs(Sr)}$ – безрозмірна випадкова величина з медіаною, рівною 1, яка обумовлена неконтрольованими чинниками.

Аналіз динаміки концентрації радіонуклідів у воді водойм різних типів показав, що тренди $C_{w,0}^{Cs(Sr)}(t)$ відповідних випадкових процесів, починаючи з моменту $t_0 = 2000$ р. або з іншого моменту $t_0 > 2000$ р. (пізня стадія аварії на ЧАЕС), задовільно описується моделлю

$$C_{w,0}^{Cs(Sr)}(t) = \exp(-\lambda_0^{Cs(Sr)} \cdot (t - t_0)) \times (A_1^{Cs(Sr)} \cdot \exp(-\lambda_{ек}^{Cs(Sr)} \cdot (t - t_0)) + A_0^{Cs(Sr)}), \quad (3)$$

де $\lambda_{ек}^{Cs(Sr)}$ – постійна екологічного очищення води для ^{137}Cs (^{90}Sr), 1/рік; $\lambda_0^{Cs(Sr)}$ – постійна розпаду ^{137}Cs (^{90}Sr), 1/рік; $A_0^{Cs(Sr)}$ – вміст ^{137}Cs (^{90}Sr) у воді водойми при $t = \infty$ і відсутності розпаду; $A_1^{Cs(Sr)} + A_0^{Cs(Sr)}$ – середньорічний вміст ^{137}Cs (^{90}Sr) у воді в момент (рік) t_0 , Бк/кл.

Ця модель є окремим випадком загальної багатоекспоненціальної моделі, що запропонована в роботах [12, 13].

Аналіз динаміки середньорічного вмісту іонів K^+ і Ca^{++} у воді різних водойм показав, що протягом принаймні 10 років ці показники не мають статистично значимих трендів. У даний період їх можна розглядати як логнормальні випадкові величини.

У багатьох роботах було показано, що коефіцієнти накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr в організмі риби зворотно пропорційно залежать від концентрації іонів калію або кальцію у воді водойми [7, 30, 36, 79 - 83]. У загальному вигляді цю залежність описують співвідношення

$$CF_{137Cs} = \frac{a_{Cs}}{(K_g^+)^{b_{Cs}}} \quad \text{і} \quad CF_{90Sr} = \frac{a_{Sr}}{(Ca_g^{++})^{b_{Sr}}}, \quad (4)$$

де K_w^+ , Ca_w^{++} – середньорічний вміст іонів K^+ , Ca^{++}

у воді водойми, мг/л; a_{Cs} (a_{Sr}) і b_{Cs} (b_{Sr}) – параметри співвідношення. Унаслідок наведених вище співвідношень значення CF_{137Cs} і CF_{90Sr} також повинні мати логнормальний закон розподілу ймовірностей. Це підтверджується статистичним аналізом коефіцієнтів накопичення, що спостерігалися [7].

Таким чином, у силу залежностей (1) середньорічний вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr у рибі кожного виду у водоймі на пізній стадії аварії на ЧАЕС повинен описуватися нестационарними логнормальними випадковими процесами $C_f^{Cs}(t)$ і $C_f^{Sr}(t)$. Статистичні характеристики цих процесів визначаються випадковими процесами $C_w^{Cs}(t)$, $C_w^{Sr}(t)$ та випадковими величинами CF_{137Cs} і CF_{90Sr} .

Мета досліджень цієї роботи – розробка та апробація мінімально затратної методології оцінки та прогнозу радіоекологічної безпеки прісноводних водойм різних типів, що можуть використовуватися для розведення риби та промислового й аматорського рибальства на пізній стадії аварії на ЧАЕС.

Матеріали та методи досліджень

Для виконання цієї роботи було використано дані щодо вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді та в основних видах промислових риб, а також дані про вміст у воді іонів K^+ і Ca^{++} , які були отримані в УкрНДІСГР упродовж 2001 - 2013 рр. у водоймах різних типів у зоні відчуження ЧАЕС і зоні безумовного (обов'язкового) відселення та на прилеглих територіях. Ці результати були доповнені літературними даними за динамікою середньорічного вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді водойм [21 - 29] та про вміст у воді іонів K^+ і Ca^{++} [14 - 20].

При оцінці параметрів залежності коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr від вмісту у воді відповідно іонів K^+ і Ca^{++} для основних промислових риб та їхніх статистичних характеристик були використані також літературні дані, що наведені в роботах [31, 33, 36 - 41, 48 - 51, 84].

Оскільки Державні гігієнічні нормативи (ДР-2006) [6] регламентують допустимий вміст ^{137}Cs та ^{90}Sr в цілому для свіжої риби, рибних напівфабрикатів і рибних продуктів, усі коефіцієнти накопичення (як літературні, так і власні) були перераховані на почищену рибу з головою і видаленими нутрошами, зябрами, лускою, плавниками з урахуванням інформації про ваговий склад м'язів і кісток риб (86 і 14 % відповідно) та співвідношення вмісту ^{137}Cs у м'язах і кістках (q_{Cs}^{M-K}) і ^{90}Sr у кістках і м'язах (q_{Sr}^{K-M}) різних видів риб, що отримані за результатами аналізу власних та літературних даних (табл. 1). Далі по тексту така риба іменується як риба, що відповідає ДР-2006.

Таблиця 1. Медіанні значення q_{Cs}^{M-K} і q_{Sr}^{K-M} для основних промислових риб

Види риб	q_{Cs}^{M-K}	q_{Sr}^{K-M}	Види риб	q_{Cs}^{M-K}	q_{Sr}^{K-M}
Карась	2,5	39	Лин	1,8	51
Сазан, короп	7,0	44	Щука	2,1	70
Плітка	1,9	44	Окунь	3,6	63
Лящ	2,8	46	Судак	3,1	27
Плоскирка		58	Білізна	2,1	30
Краснопірка	3,3	43	Сом	2,6	78

Питому активність ^{137}Cs у воді визначали після його концентрування за допомогою системи Анфеж® (розробка НПП «ЭКСОРБ» [53]), а розчинений ^{90}Sr переводився в карбонатний осад з додатком мітки стабільного стронцію. Вимірювання активності ^{137}Cs проводилося на γ -спектрометрі ADCAM-300 з напівпровідниковим детектором GEM-30185, а ^{90}Sr – стандартним радіохімічним методом [54]. Відносна похибка вимірювання вмісту ^{137}Cs становила $\pm 12\%$, а ^{90}Sr – $\pm 10\%$. Тут і далі відносна похибка представлена як $100 \cdot (\text{стандартне відхилення}) / (\text{середнє})$. Вміст K^+ і Ca^{++} у пробах води визначали в лабораторії якості і безпеки продукції АПК Українського навчально-наукового інституту якості біоресурсів та безпеки життя. Ca^{++} визначали об'ємним (трилонометричним) методом, K^+ – полум'яно-фотометричним методом. Похибка вимірювання вмісту іонів калію та іонів кальцію $< 10\%$.

Питому активність ^{137}Cs у пробах м'язів риб визначали на γ -спектрометрі ADCAM-300. Похибка вимірювання вмісту ^{137}Cs $\pm (5 - 25)\%$, залежно від активності проби. Вимірювання ^{90}Sr здійснювали у пробах кісток риб. Проби озолляли в муфельній печі при температурі 600°C . Активність ^{90}Sr у золі визначалася або прямими вимірюваннями зразків на β -спектрометрі СЕБ-0.1 (АКП, Україна) з урахуванням вкладу β -активності ^{40}K та ^{137}Cs , або після радіохімічного виділення. При радіохімічному виділенні ^{90}Sr в якості мітки для визначення його хімічного виходу використали ^{85}Sr . Результати, що були отримані на

β -спектрометрі СЕБ-0.1, перераховувалися з використанням калібровочного співвідношення між результатами визначення питомої активності ^{90}Sr в золі кісток на β -спектрометрі СЕБ-0.1 і результатами, отриманими радіохімічним методом. Похибка вимірювання вмісту ^{90}Sr була $\approx \pm 25\%$.

Для обробки результатів та оцінки статистичних характеристик випадкових величин і процесів (середньорічного вмісту у воді K^+ і Ca^{++} , ^{137}Cs і ^{90}Sr і коефіцієнтів накопичення), а також параметрів трендів вмісту у воді водойм, ^{137}Cs і ^{90}Sr і залежності коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr рибою від вмісту у воді відповідно іонів K^+ і Ca^{++} було використано методи статистичного аналізу і відновлення залежностей [55, 56].

Результати досліджень

Проведений аналіз динаміки середньорічного вмісту іонів K^+ і Ca^{++} у воді різних водойм показав, що вміст кожного з цих іонів може бути задовільно описано логнормальним випадковим процесом. Причому протягом принаймні 10 років випадкові процеси $K_w^+(t)$ і $Ca_w^{++}(t)$ можна розглядати як стаціонарні з математичним очікуванням, рівним середньому значенню за вказаний період (або як логнормальні випадкові величини). У табл. 2, з указаних джерел даних, наведено оцінки варіабельності цих процесів (величин) для водойм різних типів: s – стандартні відхилення логарифма середньорічного; GSD – пов'язані з s значення геометричного стандартного відхилення вмісту K^+ і Ca^{++} у воді водойм.

Таблиця 2. Усереднена варіабельність середньорічного вмісту K^+ і Ca^{++} у воді водойм різних типів відносно тренду

Водойма	K^+		Ca^{++}	
	s	GSD	s	GSD
Озера [40, 41, 57 - 67]				
Шацькі озера в середньому	$0,30^{+0,12}_{-0,05}$	$1,35^{+0,17}_{-0,07}$	$0,21^{+0,10}_{-0,05}$	$1,23^{+0,12}_{-0,05}$
озера Латвії			$0,16^{+0,03}_{-0,02}$	$1,17^{+0,03}_{-0,02}$
оз. Друкшяй (Литва, Інгалінська АЕС)	$0,23^{+0,15}_{-0,05}$	$1,26^{+0,21}_{-0,06}$	$0,04^{+0,03}_{-0,01}$	$1,17^{+0,03}_{-0,02}$
озера Кольського півострова	$0,20^{+0,05}_{-0,03}$	$1,22^{+0,06}_{-0,03}$	$0,17^{+0,04}_{-0,02}$	$1,04^{+0,03}_{-0,01}$
Середнє за озерами	0,24	1,28	0,15	1,16

Водойма	K ⁺		Ca ⁺⁺	
	s	GSD	s	GSD
Водосховища [15, 20, 68 - 70]				
Київське	0,11 ^{+0,05} _{-0,02}	1,12 ^{+0,06} _{-0,02}	0,09 ^{+0,04} _{-0,02}	1,09 ^{+0,04} _{-0,02}
Водосховища Дніпровського каскаду (Канівське, Кременчуцьке, Дніпровське, Запорізьке, Каховське)	0,12 ^{+0,05} _{-0,02}	1,13 ^{+0,06} _{-0,02}	0,05 ^{+0,01} _{-0,01}	1,05 ^{+0,01} _{-0,01}
Водосховища Латвії (Кегумське, Плявіньське)			0,06 ^{+0,03} _{-0,01}	1,06 ^{+0,03} _{-0,01}
Середнє за водосховищами	0,13	1,13	0,07	1,07
Водойми-охолоджувачі [72 - 74]				
Чорнобильська АЕС	0,07 ^{+0,06} _{-0,02}	1,07 ^{+0,07} _{-0,02}	0,03 ^{+0,03} _{-0,01}	1,03 ^{+0,03} _{-0,01}
Запорізька А	0,14 ^{+0,09} _{-0,03}	1,15 ^{+0,15} _{-0,04}	0,19 ^{+0,09} _{-0,04}	1,20 ^{+0,11} _{-0,04}
Хмельницька АЕС	0,21 ^{+0,11} _{-0,04}	1,24 ^{+0,16} _{-0,04}	0,20 ^{+0,11} _{-0,04}	1,22 ^{+0,15} _{-0,05}
Південноукраїнська АЕС			0,20 ^{+0,06} _{-0,03}	1,23 ^{+0,07} _{-0,04}
Смоленська АЕС	0,16 ^{+0,11} _{-0,04}	1,17 ^{+0,13} _{-0,04}	0,07 ^{+0,06} _{-0,02}	1,08 ^{+0,07} _{-0,02}
Середнє за водоймами-охолоджувачами	0,15	1,16	0,14	1,15
Річки [14, 18, 19, 70, 75 - 78]				
р. Дніпро (с. Неданчичі)	0,08 ^{+0,03} _{-0,02}	1,08 ^{+0,04} _{-0,02}	0,07 ^{+0,03} _{-0,01}	1,07 ^{+0,03} _{-0,01}
р. Прип'ять (ділянка 30-км зони ЧАЕС)	0,17 ^{+0,05} _{-0,03}	1,18 ^{+0,07} _{-0,03}	0,18 ^{+0,06} _{-0,03}	1,20 ^{+0,07} _{-0,04}
р. Тетерів (м. Житомир – с. Страхолісія)	0,20 ^{+0,11} _{-0,04}	1,23 ^{+0,15} _{-0,05}	0,17 ^{+0,07} _{-0,03}	1,19 ^{+0,09} _{-0,04}
р. Уж (ділянка м. Коростень – гирло річки)	0,17 ^{+0,15} _{-0,04}	1,18 ^{+0,19} _{-0,05}	0,13 ^{+0,08} _{-0,03}	1,14 ^{+0,08} _{-0,03}
р. Ірпінь (с. Мостище)	0,18 ^{+0,08} _{-0,03}	1,20 ^{+0,10} _{-0,04}	0,09 ^{+0,03} _{-0,02}	1,10 ^{+0,03} _{-0,02}
р. Дунай (українська ділянка)	0,43 ^{+0,21} _{-0,09}	1,54 ^{+0,36} _{-0,13}	0,10 ^{+0,02} _{-0,01}	1,11 ^{+0,02} _{-0,01}
р. Дністер			0,08 ^{+0,07} _{-0,02}	1,08 ^{+0,08} _{-0,02}
р. Південний Буг			0,16 ^{+0,08} _{-0,03}	1,18 ^{+0,10} _{-0,04}
Середнє за річками	0,21	1,23	0,12	1,13
Середнє за водоймами	0,18	1,20	0,12	1,13

Зібрані та систематизовані дані за середньорічним вмістом ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у воді водойм дали змогу оцінити параметри трендів виду (3) як для основних водойм зони відчуження ЧАЕС, так і для водойм прилеглих територій. Приклад відповідності спостережуваних середньорічних значень вмісту ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у воді деяких водойм моделі (3) показано на рис. 1. У табл. 3 наведено отримані оцінки параметрів моделі (3) для пізньої стадії аварії на ЧАЕС (після 2000 р.) з указівками похибок, відповідних коефіцієнтів кореляції r і варіабельності s – стандартного відхилення логарифму $\Psi_w^{Cs(Sr)}$.

Для оцінки та прогнозу середньорічного вмісту ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у рибі у водоймі на основі співвідношення (1) необхідно знати відповідні коефіцієнти накопичення CF_{137Cs} і CF_{90Sr} . Для закритих та напівзакритих водойм оцінки параметрів $a_{Cs}(a_{Sr})$ і $b_{Cs}(b_{Sr})$ залежностей (4) були отримані раніше [7]. У даній роботі для основних промис-

лових хижих і «мирних» почищених риб ці оцінки удосконалені, узагальнені та поширені на водойми різних типів. Отримані результати, а також відповідні залишкові стандартні відхилення ($s_{Ln(K_H)}$) наведено в табл. 4. Приклади відповідності спостережуваних значень указаних коефіцієнтів накопичення ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr обраної моделі (4) показано на рис. 2.

Статистичні характеристики випадкових процесів і параметри залежності коефіцієнтів накопичення від вмісту у воді K⁺ і Ca⁺⁺, що наведені в табл. 2 - 4, дають змогу на основі співвідношень (1) змодельовати випадкові процеси: $C_f^{Cs}(t)$ – середньорічний вміст ¹³⁷Cs в рибі; $C_f^{Sr}(t)$ – середньорічний вміст ⁹⁰Sr в рибі; $d(t) = {}^{137}Cs(t)/150 + {}^{90}Sr(t)/35$ – інтегральний показник радіоекологічної безпеки ДР-2006.

Це дає змогу використовувати прикладні методи теорії випадкових процесів [85 - 86] зроби-

ти ймовірнісний прогноз середньорічного вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr для риби, що відповідає ДР-2006, у водоймах з різними гідрохімічними характеристиками на пізній стадії аварії на ЧАЕС. На рис. 3, як приклад, наведено результати такого прогнозу

для щуки і плітки в Київському водосховищі, показано наявні в УкрНДІСГР результати моніторингу, пунктирними лініями показаний інтервал, в якому знаходиться 95 % значень вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr для усїєї популяції.

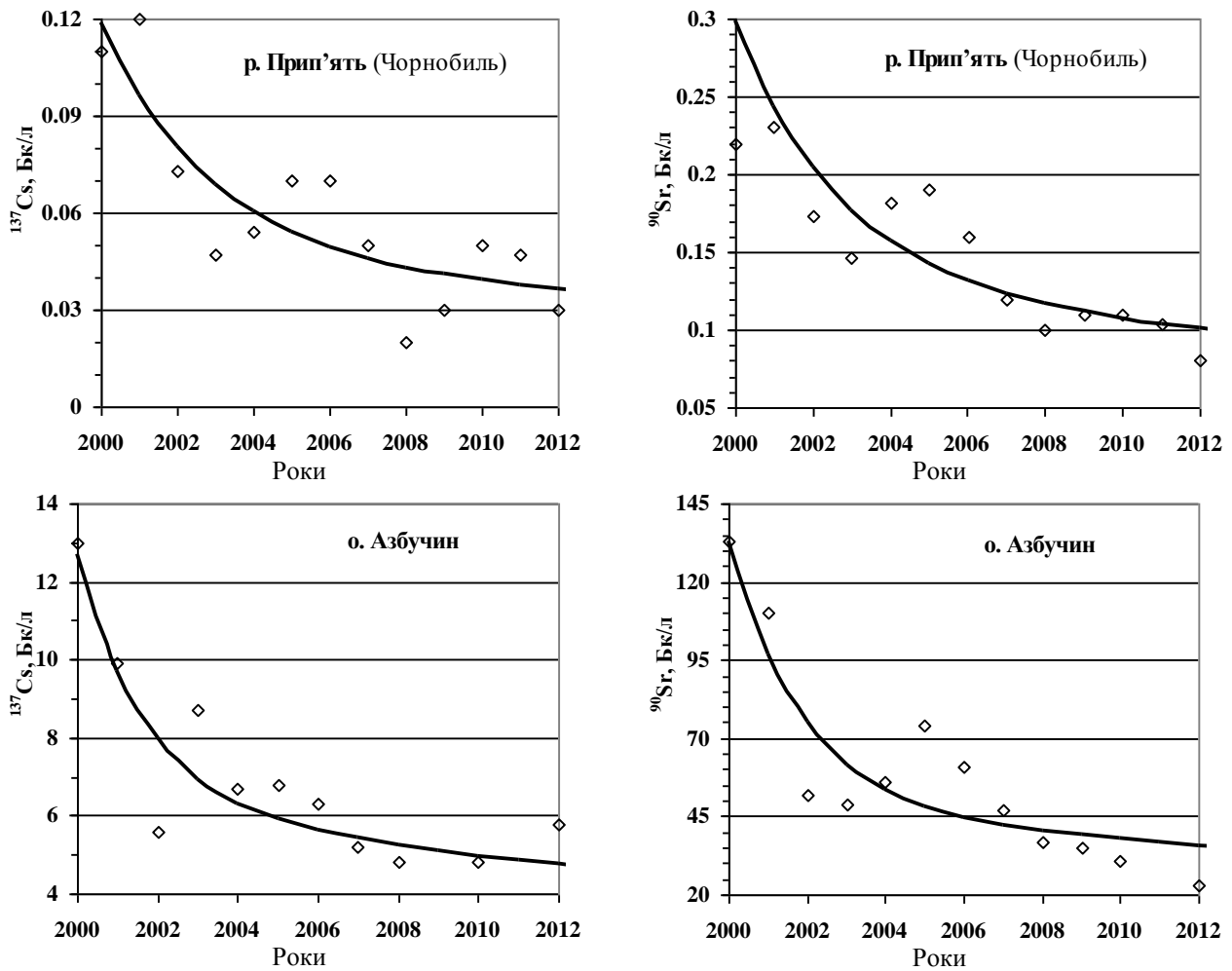


Рис. 1. Динаміка середньорічного вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді характерних водойм зони відчуження ЧАЕС.

Таблиця 3. Параметри трендів середньорічного вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді деяких водойм на пізній стадії аварії на ЧАЕС

Водойма	A_1	A_0	$\lambda_{ек}$	r	s
оз. Азбучин	$6,47 \pm 1,13$	$6,25 \pm 0,58$	$0,56 \pm 0,15$	0,94	0,21
оз. Глибоке	$6,73 \pm 1,34$	$2,76 \pm 1,13$	$0,11 \pm 0,10$	0,95	0,14
Семиходський затон	$0,36 \pm 0,26$	$1,48 \pm 0,09$	$0,60 \pm 0,20$	0,40	0,16
Яневський затон	$1,34 \pm 0,24$	$2,31 \pm 0,17$	$0,32 \pm 0,11$	0,92	0,09
р. Прип'ять (Чорнобиль)	$0,072 \pm 0,015$	$0,047 \pm 0,011$	$0,33 \pm 0,14$	0,87	0,31
р. Уж	$0,037 \pm 0,015$	$0,053 \pm 0,008$	$0,46 \pm 0,20$	0,84	0,29
р. Дніпро (с. Неданчичі)	$0,029 \pm 0,003$	$0,006 \pm 0,001$	$0,44 \pm 0,07$	0,97	0,21
р. Десна (Чернігів)	$0,0012 \pm 0,0003$	$0,0012 \pm 0,0002$	$0,35 \pm 0,25$	0,84	0,29
Київське водосховище ¹	$0,105 \pm 0,008$	$0,006 \pm 0,005$	$0,30 \pm 0,06$	0,94	0,37
Канівське водосховище	$0,004 \pm 0,001$	$0,008 \pm 0,001$	$0,21 \pm 0,12$	0,87	0,07
^{90}Sr					
оз. Азбучин	$86,0 \pm 16,7$	$47,1 \pm 8,3$	$0,50 \pm 0,23$	0,86	0,26
оз. Глибоке ²	$109,5 \pm 16,8$	$57,2 \pm 10,5$	$0,26 \pm 0,21$	0,95	0,08
Семиходський затон	$14,9 \pm 2,6$	$11,2 \pm 1,6$	$0,42 \pm 0,13$	0,92	0,22
Яневський затон	$22,6 \pm 4,3$	$11,5 \pm 3,4$	$0,31 \pm 0,12$	0,92	0,22

Водойма	A_1	A_0	$\lambda_{ек}$	r	s
	^{90}Sr				
р. Прип'ять (Чорнобиль)	$0,167 \pm 0,027$	$0,13 \pm 0,02$	$0,35 \pm 0,15$	0,88	0,17
р. Уж	$0,16 \pm 0,06$	$0,06 \pm 0,05$	$0,11 \pm 0,07$	0,95	0,10
р. Дніпро (с. Неданчичі)	$0,044 \pm 0,01$	$0,009 \pm 0,001$	$0,40 \pm 0,09$	0,97	0,14
р. Десна (Чернігів)	$0,025 \pm 0,008$	$0,007 \pm 0,002$	$0,33 \pm 0,14$	0,90	0,14
Київське водосховище	$0,05 \pm 0,02$	$0,068 \pm 0,007$	$0,73 \pm 0,34$	0,81	0,25
Канівське водосховище	$0,077 \pm 0,011$	$0,033 \pm 0,008$	$0,28 \pm 0,09$	0,87	0,27

¹ $t_0 = 2002$ р.; ² $t_0 = 2006$ р.

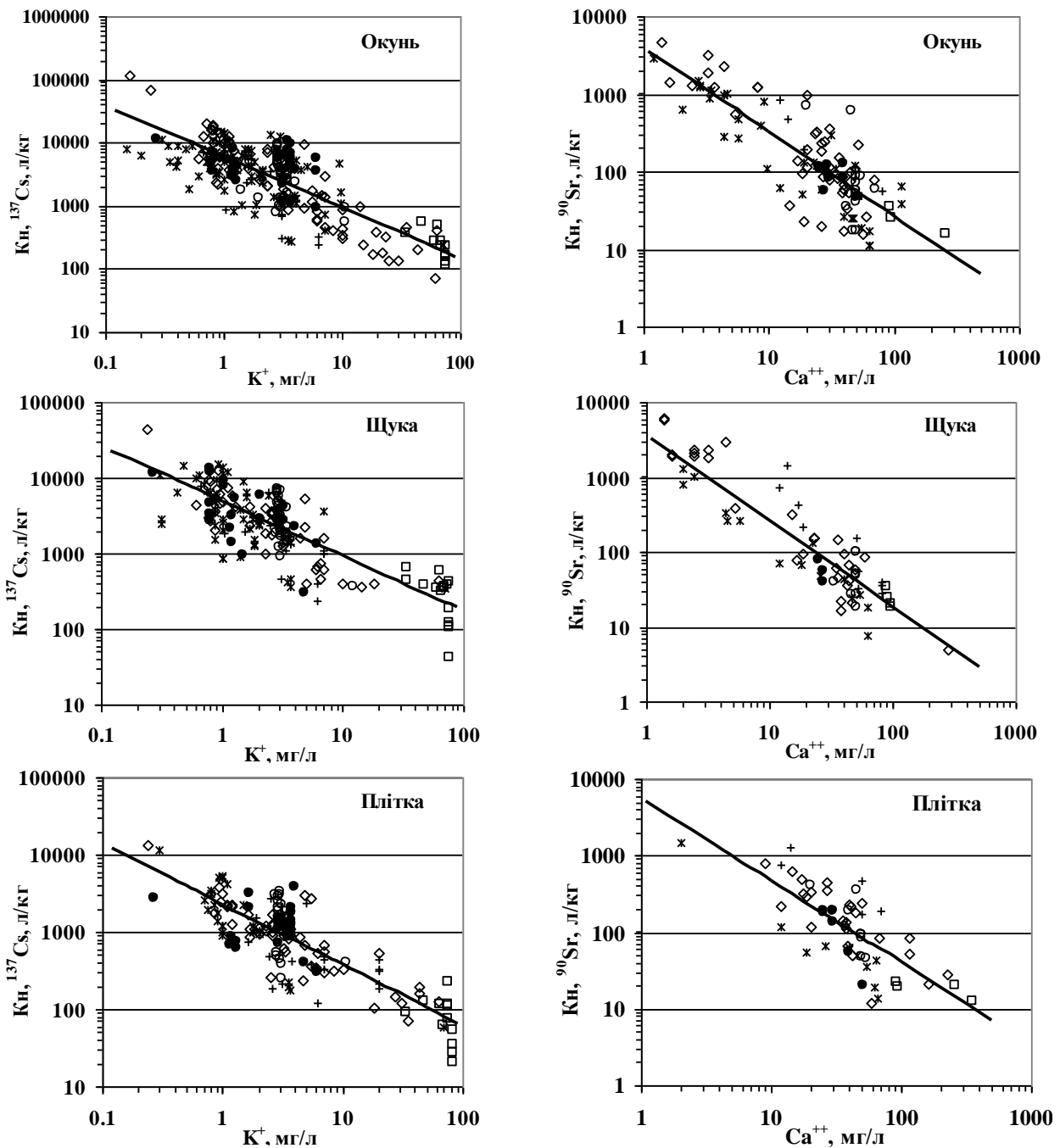


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr в перерахунку на рибу, що відповідає ДР-2006, від вмісту у воді іонів K^+ і Ca^{++} : • – озера в зоні відчуження ЧАЕС; ○ – водосховища дніпровського каскаду і озера, ставки поза зоною відчуження ЧАЕС; ◇ – озера Росії, Білорусії, Прибалтики, Казахстану; * – озера Фінляндії, Західної Європи, Північної Америки; + – річки України, Росії, Фінляндії, Західної Європи, Північної Америки; □ – моря Балтійське, Каспійське, Чорне.

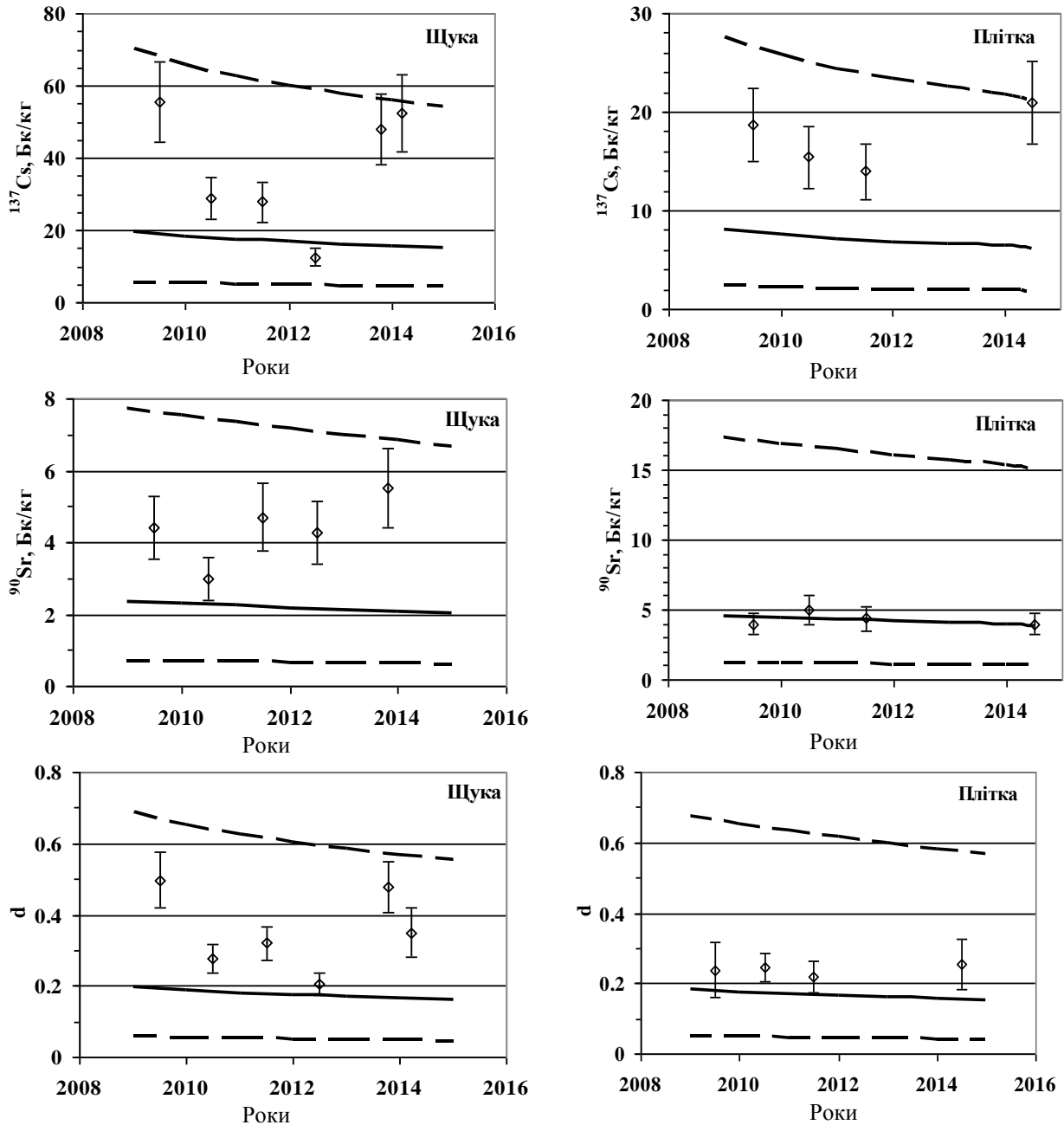


Рис. 3. Імовірнісний прогноз середньорічного вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr та інтегрального показника d для щуки і плітки з Київського водосховища.

Таблиця 4. Параметри та статистичні характеристики залежностей коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr від вмісту у воді іонів K^+ і Ca^{++} для риб у цілому

Назва риби	^{137}Cs			^{90}Sr		
	a_{Cs}	b_{Cs}	$s_{Lr(\text{K})}$	a_{Sr}	b_{Sr}	$s_{Lr(\text{K})}$
Щука (<i>Esox lucius</i>)	4900^{+330}_{-309}	$0,72 \pm 0,04$	0,68	3668^{+725}_{-605}	$1,14 \pm 0,06$	0,68
Окунь (<i>Perca fluviatilis</i>)	5965^{+377}_{-354}	$0,81 \pm 0,04$	0,77	3926^{+991}_{-791}	$1,08 \pm 0,07$	0,79
Судак (<i>Stizostedion lucioperca</i>)	6276^{+1286}_{-1068}	$0,83 \pm 0,13$	0,82	5061^{+5606}_{-2660}	$1,13 \pm 0,19$	0,65
Білезна (<i>Aspius aspius</i>)	11431^{+4075}_{-3004}	$1,37 \pm 0,19$	0,75	1288^{+1852}_{-760}	$0,62 \pm 0,22$	0,82
Сом (<i>Silurus glanis</i>)	25397^{+14318}_{-9156}	$1,84 \pm 0,30$	0,57	1150^{+1430}_{-670}	$0,75 \pm 0,21$	0,62
Лящ, плоскирка, синець (<i>Abramis brama</i> , <i>Blicca bjoerkna</i> , <i>Abramis ballerus</i>)	1741^{+231}_{-204}	$0,74 \pm 0,08$	0,86	1179^{+700}_{-439}	$0,66 \pm 0,12$	0,64

Назва риби	^{137}Cs			^{90}Sr		
	a_{Cs}	b_{Cs}	$S_{\text{Ln(KH)}}$	a_{Sr}	b_{Sr}	$S_{\text{Ln(KH)}}$
Плітка (<i>Rutilus rutilus</i>)	2313^{+177}_{-164}	$0,80 \pm 0,04$	0,65	5562^{+3137}_{-2006}	$1,07 \pm 0,12$	0,78
Карась (<i>Carassius carassius</i>)	3236^{+510}_{-441}	$1,2 \pm 0,11$	0,83	7357^{+9160}_{-4080}	$1,10 \pm 0,22$	0,47
Сазан (короп) (<i>Cyprinus carpio</i>)	2768^{+468}_{-400}	$0,72 \pm 0,07$	0,75	2174^{+1218}_{-781}	$0,83 \pm 0,11$	0,59

Висновки

Розроблено та апробовано методологію оцінки та прогнозу радіоекологічної безпеки прісноводних водойм різних типів на пізній стадії аварії на ЧАЕС як джерел риби в раціоні харчування людини. В основу цієї методології покладено випадкові процеси, що моделюють динаміку вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у воді водойми та статистичні залежності коефіцієнтів накопичення цих радіо-

нуклідів рибою від концентрації у воді іонів K^+ і Ca^{++} . Її практична реалізація не потребує спеціальних радіоекологічних обстежень водойм окремо стандартних даних за середньорічним вмістом у воді ^{137}Cs і ^{90}Sr та іонів K^+ і Ca^{++} і тому є мінімально затратною. Апробація методології на прикладі Київського водосховища показала задовільну відповідність вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr , що спостерігався в рибах різних видів, та прогнозованим значенням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Природа* Украинской ССР. Моря и внутренние воды. - К.: Наук. думка, 1987. - 224 с.
2. *Десять лет после аварии на Чернобыльской АЭС*. - К.: Минчернобыль Украины, 1996.
3. *Марей А.Н.* Водные организмы как санитарный показатель загрязнения водоемов радиоактивными веществами // Гигиена и санитария. - 1955. - Т. 20, № 7. - С. 3 - 9.
4. *Ильенко А.И., Крапивко Т.П.* Экология животных в радиационном биогеоценозе. - М.: Наука, 1989. - 224 с.
5. *Поликарпов Г.Г.* Морская радиоэкология. - К.: Наук. думка, 1970. - 276 с.
6. *Державні гігієнічні нормативи*. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді (ДР-2006). - К., 2006. - 13 с.
7. *Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Кузьменко А.В.* Зависимость коэффициентов накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr рыбой от содержания калия и кальция в воде пресноводного водоема // Рад. биология. Радиоекология. - 2011. - Т. 51, № 3. - С. 374 - 384.
8. *Хомутинин Ю.В.* Моделирование та прогноз вмісту ^{137}Cs та ^{90}Sr в компонентах водних екосистем на пізній стадії аварії на ЧАЕС // Вісн. Житомир. держ. ун-ту імені Івана Франка. - 2014. - Т. 3, № 1 (41). - С. 96 - 107.
9. *Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Кузьменко А.В., Павлюченко В.В.* Прогноз динамики и риска превышения допустимого содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в рыбе Киевского водохранилища на поздней фазе Чернобыльской аварии // Рад. биология. Радиоекология. - 2013. - Т. 53, № 4. - С. 411 - 427.
10. *Håkanson L.* A compilation of empirical data and variations in data concerning radiocesium in water, sediments and fish in European lakes after Chernobyl // J. of Envir. Radioec. - 1999. - Vol. 44. - P. 21 - 42.
11. *Oleksyk T.K., Gashchak S.P., Glenn T.C. et al.* Frequency distributions of ^{137}Cs in fish and mammal populations // J. of Envir. Radioec. - 2002. - Vol. 61. - P. 55 - 74.
12. *Pröhl G., Ehlken S., Fiedler I. et al.* Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems // J. of Envir. Radioec. - 2006. - Vol. 91. - P. 41 - 72.
13. *Smith J.T., Beresford N.A.* Chernobyl - Catastrophe and Consequences. - Springer: Praxis Publishing, 2005. - 310 p.
14. *Радиоэкологические последствия Чернобыльской аварии*. Проект № 2 // Франко-Германская-Чернобыльская инициатива. Заключ. отчет. - К., 2002. - 25 с.
15. *Ресурсы поверхностных вод СССР*. Основные гидрологические характеристики. Т. 6. Украина, Молдавия, среднее и нижнее Поднепровье. - Л., 1971. - Вып. 2. - 656 с.
16. *Environmental Monitoring Data Around the Chernobyl Nuclear Power Plant Used in the Cooperative Research Project between JAERI and CHESCIR (Ukraine)/Nippon Genshiryoku Kenkyujo JAER*, January 2003. - 409 p.
17. *Рябов И.Н.* Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС: по материалам экспедиционных исследований. - М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. - 215 с.
18. *Гідрохімія і радіогеохімія річок і боліт Житомирської області* / За ред. С. І. Сніжка і О. О. Орлова. - Житомир: Волинь, 2002. - 264 с.
19. *Васенко А.Г., Верниченко-Цветков Д.Ю., Коваленко М.С. и др.* Экологическая оценка состояния поверхностных вод Украины с учетом региональных гидрохимических особенностей // Зб. наук. праць УкрНДІЕП. - Харків, 2010. - С. 47 - 65.
20. *Лозовицький П.С., Пелешенко В.І.* Динаміка коливань стоку та хімічного складу води річки Ірпінь // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. - 2002. - Т. 3. - С. 166 - 173.

21. *Бюлетень* екологічного стану зони відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення. - К.: Чорнобильінтерінформ, 2000 - 2011. - № 15, № 19, № 21, № 23, № 25, № 27, № 29, № 31, № 33, № 37.
22. *Радиационная* обстановка на территории России и сопредельных государств: ежегодник. - Обнинск, 2013 - 2014.
23. *Зарубин О.Л.* Накопление ^{137}Cs сомом обыкновенным (*Silurus glanis L.*) в водоемах Киевской области после аварии на Чернобыльской АЭС // *Гидробиол. журнал.* - 2008. - Т. 47, № 1. - С. 91 - 104.
24. *Зарубин О.Л.* Накопление ^{137}Cs голавлем (*Leuciscus cephalus L.*) // *Гидробиол. журнал.* - 2010. - Т. 46, № 2. - С. 95 - 107.
25. *Зарубин О.Л., Канивец В.В., Волкова Е.Н. и др.* Динамика коэффициента накопления ^{137}Cs у рыб-ихтиофогов в водоемах с различным уровнем радионуклидного загрязнения // *Гидробиол. журнал.* - 2007. - Т. 43, № 4. - С. 109 - 119.
26. *Зарубин О.Л., Костюк В.А., Малюк И.А., Залисский А.А.* Накопление ^{137}Cs судаком (*Lucioperca lucioperca L.*) // *Ядерна фізика та енергетика.* - 2012. - Т. 13, № 2. - С. 175 - 181.
27. *Зарубин О.Л., Волкова Е.Н., Беляев В.В., Широкая З.О.* Радионуклиды в компонентах экосистемы Каневского водохранилища // *Гидробиол. журнал.* - 2003. - Т. 39, № 1. - С. 39 - 50.
28. *Національна доповідь* про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2003 році / Міністерство екології та природних ресурсів України, 2003. - 198 с.
29. *Радиоактивное* загрязнение поверхностных вод Украины в марте-мае 2014 года // *Электронный ресурс* <http://cgo.org.ua/index.php?dv=radiation-ukraine/>
30. *Smith Jim, Kudelsky A., Ryabov I. et al.* Application of potassium chloride to a Chernobyl contaminated lake: modelling the dynamics of radiocesium in an aquatic ecosystem and decontamination of fish // *Sc. of the Total Environment.* - 2003. - No. 305 (1 - 3). - P. 217 - 227.
31. *De Bortoli M., Gaglione P., Malvicini A., Polvani C.* Concentration factors for strontium and cesium in fish of the lakes in the region of Varese (Northern Italy). - *Minerva, Fisiconucleare*, 1967. - P. 324 - 331.
32. *David J. Rowan, J.B. Rasmussen.* Bioaccumulation of radiocesium by fish: the influence of physicochemical factors and trophic structure // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* - 1994. - Vol. 51. - P. 2388 - 2410.
33. *Kolehmainen S., Hasanen E., Miettinen J.K.* Cesium-137 levels in fish of different limnological types of lakes in Finland during 1963 // *Health Phys.* - 1966. - Vol. 12. - P. 917 - 922.
34. *Saxén R., Rask M., Ruuhijärvi J. et al.* ^{137}Cs in small forest lakes of Finland after the Chernobyl accident. - *Helsinki, Finland*, 2009. - 40 p.
35. *Saxén R., Koskelainen U., Alatalo M.* Transfer of Chernobyl-derived ^{137}Cs into fishes in some Finnish lakes. STUK-A170. - *Helsinki*, 2000. - 56 p.
36. *Agnedal P.O.* Calcium and strontium in Swedish waters and fish and accumulation of strontium-90 / *Proc. of the Int. Symp.*, April 25 - 29. 1966. - Stockholm, 1966.
37. *Ophel I.L., Fraser C.D., Judd J.M.* Strontium concentration factors in biota and bottom sediments of a freshwater lake, EUR-4800 (May 1972).
38. *EcoDoses* Improving radiological assessment of doses to man from terrestrial ecosystems / Ed. by Tone D. Bergan, Ali Hosseini, Astrid Liland, Øyvind G. Selnes and Håvard Thørring. - *Norway, NRPA*, 2005.
39. *Солюс А.А., Флейшман Д.Г., Леонтьев В.Г.* Накопления ^{137}Cs рыбами пресноводных озер // *Вопросы ихтиологии.* - 1970. - Т. 10, вып. 6(65). - С. 1091 - 1097.
40. *Слока Я.Я.* Радиология водных организмов. Радиологические исследования накопления стронция-90 в озерах различной трофности. - *Рига: Зинатне*, 1972. - 126 с.
41. *Вадзис Д.Р., Ленерте М.П., Сейсума З.К., Слока Я.Я.* Стронций и кальций в природных пресноводных экосистемах. - *Рига: Зинатне*, 1979. - 196 с.
42. *Буянов Н.И., Лаптев М.И., Осколкова Н.М.* Извлечение ^{90}Sr и ^{137}Cs гидробионтами различных трофических уровней пресноводных слабоминерализованных водоемов // *Взаимодействие между водой и живым веществом: Тр. Междунар. симп. Т. 1.* - *М.: Наука*, 1977. - С. 248 - 251.
43. *Бакунов Н.А., Саватюгин Л.М.* К вопросу устойчивости пресноводных водоемов Восточной Фенноскандии к отложению ^{137}Cs : радиологический аспект // *Арктика: экология и экономика.* - 2013. - № 1(9). - С. 24 - 35.
44. *Матмуратов С.А.* Накопление цезия-137 пресноводными рыбами в водоемах повышенной минерализации // *Экология гидробионтов водоемов Казахстана.* - *Алма-Ата*, 1973. - С. 84 - 99.
45. *Брагин Б.И., Матмуратов С.А.* К вопросу накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs некоторыми видами рыб в пресноводном водоеме // *Радиология водных организмов.* - *Рига*, 1973. - Вып. 2. - С. 123 - 128.
46. *Белова Н.В.* Радиационное воздействие на воспроизводительную систему костистых рыб - последствия чернобыльской катастрофы: Автореф. дис. д-ра ... биол. наук. - *М.*, 2008. - 46 с.
47. *Полякова Н.И., Пельгунова Л.А., Рябов И.Н., Рябцев А.А.* Особенности накопления ^{137}Cs у рыб высшего трофического уровня из водоемов, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная биология. Радиоэкология.* - 2009. - Т. 49, № 3. - С. 330 - 337.
48. *Каглян А.Е., Гудков Д.И., Кленус В.Г. и др.* Радионуклиды в аборигенных видах рыб Чернобыльской зоны отчуждения // *Ядерна фізика та енергетика.* - 2012. - Т. 13, № 3. - С. 306 - 315.
49. *Каглян О., Кленус В., Гудков Д. и др.* Рівні накопичення ^{137}Cs хижаками видами риб водойм зони відчуження Чернобыльської АЕС // *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз.* - 2010. - Вип. 53. - С. 100 - 105.
50. *Кузьменко М.І., Романенко В.Д., Деревец В.В. та ін.* Радіонукліди в водних екосистемах України. Вплив радіоактивного забруднення на гідробіоси зони відчуження. - *К.*: Чорнобильінтерінформ, 2001. - 318 с.

51. *Техногенні радіонукліди у прісноводних екосистемах*. - К.: Наук. думка, 2010. - 263 с.
52. *Pungkun V. Chronic Radiation Doses to Aquatic Biota: Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of Doctor of Philosophy of the University of Portsmouth*. - 2012. - 242 p.
53. *Определение радионуклидов цезия в водных растворах // Электронный ресурс*.
<http://www.eksorb.com/catalog/1/>.
54. *Павлоцкая Ф.И. Основные принципы радиохимического анализа объектов природной среды и методы определения радионуклидов стронция и трансурановых элементов // Журн. аналит. химии*. - 1997. - Т. 52, № 2. - С. 126 - 143.
55. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей*. - М.: Финансы и статистика, 1985. - 488 с.
56. *Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ*. - М.: Мир, 1992. - 488 с.
57. *Льїн Л.В., Мольча Я.О. Озера Волині: Лімно-географічна характеристика*. - Луцьк, 2000. - 140 с.
58. *Морозова А.А. Основные тенденции изменения качества воды озерных систем Шацкого национального природного парка // Гидробиол. журнал*. - 2006. - Т. 42, № 4. - С. 111 - 114.
59. *Веремчук Б.О. Гідрохімічний режим озера Світязь // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту*. - 2007. - № 11 (Ч.). - С. 87 - 90.
60. *Льїн Л.В., Ситник Ю.М., Морозова А.О. та ін. Гідрохімічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку: озеро Пулемцьке (1977 - 2009 рр.) // Електронний ресурс*. -
<http://esnuir.eenu.edu.ua/handle/123456789/216>
61. *Ситник Ю., Осадча Н., Шевченко П., Забитівські Ю. Еколого-токсикологічна оцінка спрямованості гідрохімічних процесів в озері Пісочне Шацького парку // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол.* - 2009. - Вип. 50. - С. 59 - 66.
62. *Льїн Л.В., Ситник Ю.М., Морозова А.О. та ін. Гідрохімічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку: озеро Пулемцьке (1977 - 2009 рр.) // Природа Західного Полісся та прилеглих територій*. - 2012. - № 9. - С. 35 - 41.
63. *Ситник Ю.М., Шевченко П.Г., Осадча Н.М. та ін. Гідрохімічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку: озеро Пулемцьке // Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного природного парку*. - Львів, 2010. - С. 87 - 96.
64. *Ситник Ю.М., Осадча Н.М., Шевченко П.Г. та ін. Гідрохімічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку // Заповідна справа в Україні*. - 2009. - Т. 15, вип. 2. - С. 104 - 105.
65. *Льїн Л.В., Ситник Ю.М., Шевченко П.Г. та ін. Гідрохімічні дослідження озерних екосистем Шацького національного природного парку: озеро Чорне Велике (1977 - 2009 рр.) // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту*. - 2010. - № 15. - С. 4 - 14.
66. *Nedveckaite T., Marciulioniene D., Mazeika J., Paskauskas R. Radiological and Environmental Effects in Ignalina Nuclear Power Plant Cooling Pond - Lake Druksiai: From Plant put in Operation to Shut Down Period of Time // Nuclear poweroperation, safety and environment / Ed. by Pavel V. Tsvetkov*. - 2011. - P. 261 - 286.
67. *Большие озера Кольского полуострова*. - Л.: Наука, 1976. - 349 с.
68. *Алмазов А.М., Денисова А.И., Майстренко Ю.Г., Нахшина Е.П. Гидрохимия Днепра, его водохранилищ и притоков*. - К.: Наук. думка, 1967. - 316 с.
69. *Киевское водохранилище. Гидрология, биология, продуктивность*. - К.: Наук. думка, 1972. - 460 с.
70. *Денисова А.И., Тимченко В.М., Нахшина Е.П. Гидрология и гидрохимия Днепра, его водохранилищ*. - К.: Наук. думка, 1989. - 216 с.
71. *Горпинич Н.М. Стан довкілля в Запорізькій області. Інформаційно-аналітичний огляд // Електронний ресурс*.
www.zdn.gov.ua/images/fck/file/2012_12.doc.
72. *Ромась М.І. Гідрохімія водних об'єктів атомної і теплової енергетики: монографія*. - К., 2002. - 531 с.
73. *Бабич О.В., Вовк Н.І. Особливості гідрохімічного та термічного режимів водойми-охолоджувача Запорізької АЕС // Зб. наук. праць. Проблеми зооінженерії та ветеринарної медицини*. - 2011. - Вип. 22, ч. 1, т. 1. - С. 313 - 318.
74. *Шевченко П.Г., Ситник Ю.М., Алексеенко М.В., Борбат Н.А. Гидрохимическое состояние Ташлыкского водоема-охладителя Южноукраинской АЭС // Рыбогосп. наука України*. - 2009. - № 2. - С. 43 - 50.
75. *Харченко Т.А., Тимченко В.М., Ковальчук А.А. и др. Гидроэкология украинского участка Дуная и сопредельных водоемов*. - К.: Наук. думка, 1993. - 328 с.
76. *Клебанов Д.О., Осадча Н.М., Осадчий В.І. Оцінка виносу хімічних елементів водами Дунаю в сучасний період // Наук. праці Українського наук.-дослід. гідромет. Ін-ту*. - 2003. - Вип. 251. - С. 119 - 134.
77. *Томілін Ю.А., Григорєва Л.І. Радіонукліди у водних екосистемах південного регіону України: міграція, розподіл, накопичення, доза опромінення людини і контрзаходи*. - Миколаїв, 2008. - 270 с.
78. *Дослідження Дністра: 10 років громадської екологічної експедиції «Дністер»*. - Львів - Київ, 1998. - 216 с.
79. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*. - Vienna: IAEA-TRS-462, 2010. - 194 p.
80. *Templeton W.L., Brown V.M. Accumulation of Calcium and Strontium by Brown Trout from Waters in the United Kingdom // Nature*. - 1963. - p. 198 - 200.
81. *De Bortoli M., Gaglione P., Malvicini A., Polvani C. Concentration factors for strontium and cesium in fish of the lakes in the region of Varese (Northern Italy) // Minerva Fisiconucl.* - 1968. - No. 12(4). - p. 24 - 31.
82. *Kolehmainen S. et al. Cesium -137 in fish plankton and plants in Finnish lakes during 1964 - 1965 // Radioecological Concentration Processes*. - Pergamon Press, 1966. - p. 913.

83. *Крушев А.И.* Моделирование загрязнения рыб ^{90}Sr в зависимости от концентрации кальция в воде // Рад. биология. Радиоэкология. - 2008. - Т. 48, № 3. - С. 364 - 369.
84. *Smith J.T., Kudelsky A.V., Ryabov I.N., Haddingh R.H.* Radiocesium concentration factors of Chernobyl-contaminated fish: a study of the influence of potassium, and "blind" testing of a previously developed model // J. of Envir. Radioac. - 2000. - Vol. 48. - P. 359 - 369.
85. *Свешников А.А.* Прикладные методы теории случайных функций. - М.: Наука, 1968. - 463 с.
86. *Крамер Г., Лидбеттер М.* Стационарные случайные процессы. - М.: Мир, 1969. - 399 с.

Ю. В. Хомутинин

*Український науково-дослідницький інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природопольовання України, Київ*

ОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЭСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ УКРАИНЫ НА ПОЗДНИХ СТАДИЯХ АВАРИИ НА ЧАЭС

Рассмотрены вопросы радиологической безопасности пресноводных водоемов, загрязненных ^{137}Cs и ^{90}Sr , которые могут использоваться для разведения рыбы, промышленного и любительского рыболовства на поздней стадии аварии на ЧАЭС. Приведены обобщенные статистические зависимости равновесных коэффициентов накопления ^{137}Cs от концентрации калия и ^{90}Sr от концентрации кальция в воде водоема. Предложена методология оценки радиологической безопасности пресноводных водоемов как источников рыбы и апробирована ее практическая реализация.

Ключевые слова: содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и рыбе, коэффициенты накопления, радиологическая безопасность пресноводных водоемов.

Yu. V. Khomutinin

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

EVALUATION OF RADIOECOLOGICAL SAFETY OF FRESHWATER RESERVOIRS IN UKRAINE DURING LATE PHASE OF ChNPP ACCIDENT

Problems of radioecological safety of freshwater reservoirs contaminated with ^{137}Cs and ^{90}Sr concerning the scenario of fish breeding, fishery and unprofessional anglers activity at the late phase of ChNPP accident has considered. Generalized statistical dependences of equilibrium accumulation coefficients of ^{137}Cs and ^{90}Sr depending on Calcium concentration in reservoirs water were shown. Methodology of estimation of radioecological safety of freshwater reservoirs as the source of fish for human diet has proposed, its practical realization has tested.

Keywords: ^{137}Cs and ^{90}Sr content in fish and water, accumulation coefficients, radioecological safety of freshwater reservoirs.

REFERENCES

- Nature of the Ukrainian SSR. Seas and inland waters.* - Kyiv: Nauk. dumka, 1987. - 224 p. (Rus)
- Ten years after the Chernobyl accident.* - Kyiv: Minchernobyl' Ukrainy, 1996. (Rus)
- Marej A.N.* // *Gigiena i sanitariya.* - 1955. - Vol. 20, No. 7. - P. 3 - 9. (Rus)
- Ilenko A.I., Krapivko T.P.* Animal Ecology in the radiation biogeocoenose. - Moskva: Nauka, 1989. - 224 p. (Rus)
- Polikarpov G.G.* Marine radioecology. - Kyiv: Nauk. dumka, 1970. - 276 p. (Rus)
- State hygiene standards. Acceptable levels of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides in food and water. (ДР-2006).* - Kyiv, 2006. - 13 p. (Ukr)
- Khomutinin Yu.V., Kashparov V.A., Kuz'menko A.V.* // *Rad. biologiya. Radioekologiya.* - 2011. - Vol. 51, No. 3. - P. 374 - 384. (Rus)
- Khomutinin Yu.V.* // *Visn. Zhytomyr. derzh. un-tu imeni Ivana Franka.* - 2014. - Vol. 3, No. 1 (41). - P. 96 - 107. (Ukr)
- Khomutinin Yu.V., Kashparov V.A., Kuz'menko A.V., Pavlyuchenko V.V.* // *Rad. biologiya. Radioekologiya.* - 2013. - Vol. 53, No. 4. - P. 411 - 427. (Rus)
- Håkanson L.* A compilation of empirical data and variations in data concerning radiocesium in water, sediments and fish in European lakes after Chernobyl // *J. of Envir. Radioec.* - 1999. - Vol. 44. - P. 21 - 42.
- Oleksyk T.K., Gashchak S.P., Glenn T.C. et al.* Frequency distributions of ^{137}Cs in fish and mammal populations // *J. of Envir. Radioec.* - 2002. - Vol. 61. - P. 55 - 74.
- Pröhl G., Ehlken S., Fiedler I. et al.* Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems // *J. of Envir. Radioec.* - 2006. - Vol. 91. - P. 41 - 72.
- Smith J.T., Beresford N.A.* Chernobyl - Catastrophe and Consequences. - Spriniger: Praxis Publishing, 2005. - 310 p.
- Radiological consequences of the Chernobyl accident. Project No. 2 // Franco-German Chernobyl Initiative. Final report.* - Kyiv, 2002. - 25 p. (Rus)
- Surface water resources of the USSR. The main hydrological characteristics.* Vol. 6. Ukraine, Moldova,

- the middle and lower Dnieper. - Ltnsgrad, 1971. - Iss. 2 - 656 p. (Rus)
16. *Environmental Monitoring Data Around the Chernobyl Nuclear Power Plant Used in the Cooperative Research Project between JAERI and CHESCIR (Ukraine)/Nippon Genshiryoku Kenkyujo JAER*, January 2003. - 409 p.
 17. *Ryabov I.N.* Radioecology of fish in ponds in the area under influence of the Chernobyl accident: Based on research expeditions. - Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2004. - 215 p. (Rus)
 18. *Hydrochemistry and radiological geochemistry of rivers and wetlands of Zhytomyr region* / Ed. by S. I. Snizhok and O. O. Orlov. - Zhytomyr: Volyn', 2002. - 264 p. (Ukr)
 19. *Vasenko A.G., Vernichenko-Tsvetkov D.Yu., Kovalenko M.S. et al.* // Zb. nauk. prats' UkrNDIEP. - Kharkiv, 2010. - P. 47 - 65. (Rus)
 20. *Lozovyts'kyi P.S., Peleshenko V.I.* // *Gidrologiya, gidrokimiya i gidroekologiya*. - 2002. - Vol. 3. - P. 166 - 173. (Ukr)
 21. *Bulletin of ecological condition of the Exclusion Zone and Zone of obligatory resettlement*. - Kyiv: Chernobyl'interinform, 2000 - 2011. - No. 15, No. 19, No. 21, No. 23, No. 25, No. 27, No. 29, No. 31, No. 33, No. 37. (Ukr)
 22. *Radiation situation in the territory of Russia and neighboring countries: Yearbook*. - Obninsk, 2013 - 2014. (Rus)
 23. *Zarubin O.L.* // *Gidrobiol. zhurnal*. - 2008. - Vol. 47, No. 1. - P. 91 - 104. (Rus)
 24. *Zarubin O.L.* // *Gidrobiol. zhurnal*. - 2010. - Vol. 46, No. 2. - P. 95 - 107. (Rus)
 25. *Zarubin O.L., Kanivets V.V., Volkova E.N. et al.* // *Gidrobiol. zhurnal*. - 2007. - Vol. 43, No. 4. - P. 109 - 119. (Rus)
 26. *Zarubin O.L., Kostyuk V.A., Malyuk I.A., Zalisskij A.A.* // *Nucl. Phys. At. Energy*. - 2012. - Vol. 13, No. 2. - P. 175 - 181. (Rus)
 27. *Zarubin O.L., Volkova E.N., Belyaev V.V., Shirokaya Z.O.* // *Gidrobiol. zhurnal*. - 2003. - Vol. 39, No. 1. - P. 39 - 50. (Rus)
 28. *National Report on the state of the environment in Ukraine in 2003* / Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, 2003. - 198 p. (Ukr)
 29. *Radioactive contamination of surface waters of Ukraine in March-May 2014* // <http://cgo.org.ua/index.php?dv=radiation-ukraine/> (Rus)
 30. *Smith Jim, Kudelsky A., Ryabov I. et al.* Application of potassium chloride to a Chernobyl contaminated lake: modelling the dynamics of radiocesium in an aquatic ecosystem and decontamination of fish // *Sc. of the Total Environment*. - 2003. - No. 305 (1 - 3). - P. 217 - 227.
 31. *De Bortoli M., Gaglione P., Malvicini A., Polvani C.* Concentration factors for strontium and cesium in fish of the lakes in the region of Varese (Northern Italy). - *Minerva, Fisiconucleare*, 1967. - P. 324 - 331.
 32. *David J. Rowan, J.B. Rasmussen.* Bioaccumulation of radiocesium by fish: the influence of physicochemical factors and trophic structure // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* - 1994. - Vol. 51. - P. 2388 - 2410.
 33. *Kolehmainen S., Hasanen E., Miettinen J.K.* Cesium-137 levels in fish of different limnological types of lakes in Finland during 1963 // *Health Phys.* - 1966. - Vol. 12. - P. 917 - 922.
 34. *Saxén R., Rask M., Ruuhijärvi J. et al.* ¹³⁷Cs in small forest lakes of Finland after the Chernobyl accident. - Helsinki, Finland, 2009. - 40 p.
 35. *Saxén R., Koskelainen U., Alatalo M.* Transfer of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs into fishes in some Finnish lakes. STUK-A170. - Helsinki, 2000. - 56 p.
 36. *Agnedal P.O.* Calcium and strontium in Swedish waters and fish and accumulation of strontium-90 / *Proc. of the Int. Symp.*, April 25 - 29. 1966. - Stockholm, 1966.
 37. *Ophel I.L., Fraser C.D., Judd J.M.* Strontium concentration factors in biota and bottom sediments of a freshwater lake, EUR-4800 (May 1972).
 38. *EcoDoses* Improving radiological assessment of doses to man from terrestrial ecosystems / Ed. by Tone D. Bergan, Ali Hosseini, Astrid Liland, Øyvind G. Selnæs and Håvard Thørring. - Norway, NRPA, 2005.
 39. *Solyus A.A., Flejshman D.G., Leont'ev V.G.* // *Voprosy ikhtiologii*. - 1970. - Vol. 10, Iss. 6(65). - P. 1091 - 1097. (Rus)
 40. *Sloka Ya.Ya.* Radiology of aquatic organisms. Radiological studies of strontium-90 accumulation in the lakes of different trophic status. - Riga: Zinatne, 1972. - 126 p. (Rus)
 41. *Vadzis D.R., Lenerte M.P., Sejsuma Z.K., Sloka Ya.Ya.* Strontium and calcium in natural fresh water ecosystems. - Riga: Zinatne, 1979. - 196 p. (Rus)
 42. *Buyanov N.I., Laptev M.I., Oskolkova N.M.* // The interaction between water and living matter: *Proc. Int. Symp.* Vol. 1. - M.: Nauka, 1977. - P. 248 - 251. (Rus)
 43. *Bakunov N.A., Savatyugin L.M.* // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. - 2013. - No. 1(9). - P. 24 - 35. (Rus)
 44. *Matmuratov S.A.* Cesium-137 accumulation by freshwater fish in the waters with high mineralization // *Ecology of aquatic reservoirs of Kazakhstan*. - Alma-Ata, 1973. - P. 84 - 99. (Rus)
 45. *Bragin B.I., Matmuratov S.A.* // *Radiologiya vodnykh organizmov*. - Riga, 1973. - Iss. 2. - S. 123 - 128. (Rus)
 46. *Belova N.V.* Radiation effects on the reproductive system of bony fish - the consequences of the Chernobyl disaster: Thesis. - Moskva, 2008. - 46 p. (Rus)
 47. *Polyakova N.I., Pel'gunova L.A., Ryabov I.N., Ryabtsev A.A.* // *Radiats. biologiya. Radioekologiya*. - 2009. - Vol. 49, No. 3. - P. 330 - 337. (Rus)
 48. *Kaglyan A.E., Gudkov D.I., Klenus V.G. et al.* // *Nucl. Phys. At. Energy*. - 2012. - Vol. 13, No. 3. - P. 306 - 315. (Rus)
 49. *Kaglyan O., Klenus V., Gudkov D. et al.* // *Visn. L'viv. un-tu. Ser. fiz.* - 2010. - Iss. 53. - P. 100 - 105. (Ukr)
 50. *Kuz'menko M.I., Romanenko V.D., Derevets V.V. et al.* Radionuclides in aquatic ecosystems of Ukraine. Radioactive contamination impact on hydrobiosis of Exclusion zone. - Kyiv: Chernobyl'interinform, 2001. - 318 p. (Ukr)
 51. *Technogenic radionuclides in freshwater ecosystems*. - Kyiv, Nauk. dumka, 2010. - 263 p. (Ukr)
 52. *Pungkun V.* Chronic Radiation Doses to Aquatic Biota: Thesis submitted in partial fulfillment of the require-

- ments for the award of the degree of Doctor of Philosophy of the University of Portsmouth. - 2012. - 242 p.
53. *Determination of cesium in aqueous solutions* // <http://www.eksorb.com/catalog/1/>. (Rus)
 54. *Pavlotskaya F.Y.* / Zhurn. analyt. khimii. - 1997. - Vol. 52, No. 2. - P. 126 - 143. (Rus)
 55. *Ajvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D.* Applied Statistics. Study of dependencies. - Moskva: Finansy i statistika, 1985. - 488 p. (Rus)
 56. *Ajifi A., Ejzen S.* Statistical analysis. The approach of computer using. - Moskva: Mir, 1992. - 488 p. (Rus)
 57. *Il'yin L.V., Mol'cha Ya.O.* Lakes of Volyn: Limni and geographic characteristics. - Lutsk, 2000. - 140 p. (Ukr)
 58. *Morozova A.A.* // *Gidrobiol. zhurnal.* - 2006. - Vol. 42, No. 4. - P. 111 - 114. (Rus)
 59. *Veremchuk B.O.* // *Nauk. visn. Volyns'kogo derzh. un-tu.* - 2007. - No. 11 (Ch. 1). - P. 87 - 90. (Ukr)
 60. *Il'yin L.V., Sytnyk Yu.M., Morozova A.O. et al.* // <http://esnuir.eenu.edu.ua/handle/123456789/216>
 61. *Sytnyk Yu., Osadcha N., Shevchenko P., Zabytivs'ky Yu.* // *Visn. L'viv. un-tu. Ser. biol.* - 2009. - Iss. 50. - P. 59 - 66. (Ukr)
 62. *Il'yin L.V., Sytnyk Yu.M., Morozova A.O. et al.* // *Pryroda Zakhidnogo Polissya ta pryleglykh terytorii.* - 2012. - No. 9. - P. 35 - 41. (Ukr)
 63. *Sytnyk Yu.M., Shevchenko P.G., Osadcha N.M. et al.* // *State of biodiversity of Shatsky National Park ecosystems.* - Lviv, 2010. - P. 87 - 96. (Ukr)
 64. *Sytnyk Yu.M., Osadcha N.M., Shevchenko P.G. et al.* // *Zapovidna sprava v Ukraini.* - 2009. - Vol. 15, Iss. 2. - P. 104 - 105. (Ukr)
 65. *Il'yin L.V., Sytnyk Yu.M., Shevchenko P.G. et al.* // *Nauk. visn. Volyns'kogo nats. un-tu.* - 2010. - No. 15. - P. 4 - 14. (Ukr)
 66. *Nedveckaite T., Marciulioniene D., Mazeika J., Paskauskas R.* Radiological and Environmental Effects in Ignalina Nuclear Power Plant Cooling Pond - Lake Druksiai: From Plant put in Operation to Shut Down Period of Time // *Nuclear poweroperation, safety and environment* / Ed. by Pavel V. Tsvetkov. - 2011. - P. 261 - 286.
 67. *Large lakes of the Kola Peninsula.* - Leningrad: Nauka, 1976. - 349 p. (Rus)
 68. *Almazov A.M., Denisova A.I., Majstrenko Yu.G., Nakhshina E.P.* Hydrochemistry of the Dnieper, its reservoirs and tributaries. - Kyiv: Nauk. dumka, 1967. - 316 p. (Rus)
 69. *Kyiv reservoir. Hydrology, biology, productivity.* - Kyiv: Nauk. dumka, 1972. - 460 p. (Rus)
 70. *Denisova A.I., Timchenko V.M., Nakhshina E.P.* Hydrology and hydrochemistry of the Dnieper, its reservoirs. - Kyiv: Nauk. dumka, 1989. - 216 p. (Rus)
 71. *Gorpynych N.M.* The environment in Zaporizhzhya region. Information-analytical review // www.zdn.gov.ua/images/fck/file/2012_12.doc. (Ukr)
 72. *Romas' M.I.* Hydrochemistry of water objects of nuclear and thermal energetics: Monograph. - Kyiv, 2002. - 531 p. (Ukr)
 73. *Babych O.V., Vovk N.I.* // *Zb. nauk. prats'. Problemy zoonzheneriyi ta veterynarnoyi medytsyny.* - 2011. - Iss. 22, ch. 1, vol. 1. - P. 313 - 318. (Ukr)
 74. *Shevchenko P.G., Sitnyk Yu.M., Olekseenko M.V., Borbat N.A.* // *Rybogosp. nauka Ukrayiny.* - 2009. - No. 2. - P. 43 - 50. (Rus)
 75. *Kharchenko T.A., Timchenko V.M., Koval'chuk A.A. et al.* Hydroecology Ukrainian section of the Danube and adjacent waters. - Kyiv: Nauk. dumka, 1993. - 328 p. (Rus)
 76. *Klebanov D.O., Osadcha N.M., Osadchyi V.I.* // *Naukovi pratsi Ukrayins'kogo naukovo-doslidnogo gidrometeorologichnogo instytutu.* - 2003. - Iss. 251. - P. 119 - 134. (Ukr)
 77. *Tomilin Yu.A., Grygoryeva L.I.* Radionuclides in aquatic ecosystems in Southern Ukraine: migration, distribution, storage, radiation dose and countermeasures. - Mykolayiv, 2008. - 270 p. (Ukr)
 78. *Research of Dniester: 10 years of public environmental expedition "Dniester".* - Lviv - Kyiv, 1998. - 216 p. (Ukr)
 79. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments.* - Vienna: IAEA-TRS-462, 2010. - 194 p.
 80. *Templeton W.L., Brown V.M.* Accumulation of Calcium and Strontium by Brown Trout from Waters in the United Kingdom // *Nature.* - 1963. - p. 198 - 200.
 81. *De Bortoli M., Gaglione P., Malvicini A., Polvani C.* Concentration factors for strontium and cesium in fish of the lakes in the region of Varese (Northern Italy) // *Minerva Fisiconucl.* - 1968. - No. 12(4). - p. 24 - 31.
 82. *Kolehmainen S. et al.* Cesium -137 in fish plankton and plants in Finnish lakes during 1964 - 1965 // *Radioecological Concentration Processes.* - Pergamon Press, 1966. - p. 913.
 83. *Krishev A.I.* // *Rad. biologiya. Radioekologiya.* - 2008. - Vol. 48, No. 3. - P. 364 - 369. (Rus)
 84. *Smith J.T., Kudelsky A.V., Ryabov I.N., Haddingh R.H.* Radiocesium concentration factors of Chernobyl-contaminated fish: a study of the influence of potassium, and "blind" testing of a previously developed model // *J. of Envir. Radioac.* - 2000. - Vol. 48. - P. 359 - 369.
 85. *Sveshnikov A.A.* Applied methods of random functions theory. - Moskva: Nauka, 1968. - 463 p. (Rus)
 86. *Kramer G., Lidbetter M.* Stationary random processes. - Moskva: Mir, 1969. - 399 p. (Rus)

Надійшла 04.08.2014
Received 04.08.2014