

УДК 574::539.1.04:574.41.5:539.163

## ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАКОПЛЕНИЯ $^{137}\text{Cs}$ И $^{90}\text{Sr}$ РЫБОЙ ОТ СОДЕРЖАНИЯ КАЛИЯ И КАЛЬЦИЯ В ВОДЕ ПРЭСНОВОДНОГО ВОДОЕМА

© 2011 г. Ю. В. Хомутинин, В. А. Кашпаров\*, А. В. Кузьменко

Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии (УкрНИИСХР),  
Чабаны, Украина

Национального университета биоресурсов и природопользования Украины (НУБиП Украины), Киев, Украина

В закрытых и полужакрытых водоемах Украины, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС, измерено содержание  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , ионов калия и кальция в воде, а также накопление радионуклидов в организме различных пресноводных рыб. На основании многочисленных экспериментальных данных для разных регионов получены параметры статистических зависимостей коэффициентов накопления мышечной тканью различных видов рыб  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  от концентрации в воде водоемов калия и кальция, соответственно.

*Радиоэкология, рыба, радионуклиды, коэффициенты накопления, Чернобыльская авария, радиоактивное загрязнение, допустимые уровни.*

Рыба является важным и ценным продуктом питания человека, а для отдельных категорий населения, например рыбаков, ее доля в рационе питания может быть определяющей. В последних Публикациях МКРЗ [1] при радиационной защите населения рекомендуется рассматривать референтного человека (Representative Person), в связи с этим, прогнозирование содержания радионуклидов в рыбе для защиты определенных критических групп населения является актуальным [2]. Кроме этого, 5-м комитетом МКРЗ в число референтных организмов для радиологической защиты окружающей среды были внесены хищные и мирные рыбы, для расчета внутренних доз облучения которых также необходимо прогнозирование содержания радионуклидов в отдельных органах и теле рыб [3]. После Чернобыльской катастрофы вплоть до настоящего времени и даже на больших удалениях от места аварии (более 200–300 км) продолжают наблюдаться превышения национальных допустимых уровней содержания радионуклидов в рыбе [4]. Это требует уточнения методов прогнозирования радиоактивного загрязнения рыбы с целью ранжирования водоемов по вероятности возможного превышения допустимых гигиенических нормативов содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в рыбе.

Для характеристики накопления радионуклидов в организме рыб на поздних стадиях радиаци-

онных аварий в период установившейся (медленно меняющейся) фазы радиоактивного загрязнения пресноводных водоемов одним из наиболее важных радиологических параметров является коэффициент накопления, который также называют концентрационным отношением (concentration ratio (CR)) или коэффициентом биоаккумуляции (bioaccumulation factor (BAF)):

$$\text{CR} = C_f / C_w,$$

где  $C_f$  – удельная массовая активность радионуклида в рыбе при естественной влажности, обусловленная всеми путями поступления радионуклида в организм рыбы: вода, корм, донные отложения (Бк/кг),  $C_w$  – удельная объемная активность радионуклида в воде водоема, в котором обитает рыба (Бк/л). Величина этого коэффициента для конкретного радионуклида зависит от вида рыбы и времени (сезона) года, размера (массы) рыбы, характеристик конкретного водоема, включая концентрацию в воде ионов макроаналогов и т. д. [4–59].

В последние годы под эгидой МАГАТЭ была проведена огромная работа по обобщению имеющихся экспериментальных данных с целью параметризации моделей для прогнозирования радиоактивного загрязнения различных объектов окружающей среды [5–7]. В рамках этой работы были сгруппированы, статистически обработаны и табулированы значения коэффициентов биоаккумуляции разных радионуклидов различными видами рыб (среднее и среднегеометрическое, а также стандартные отклонения этих величин). При этом не проводилось обобщение экспериментальных результатов с целью получения парамет-

\* Адресат для корреспонденции: Украина, 08162, Киевская обл., Киево-Святошинский р-н, Чабаны, ул. Машиностроителей, 7, УкрНИИСХР; тел.: (38 044) 526-12-46, факс: (38 044) 526-07-90; e-mail: vak@uiar.kiev.ua.

ров зависимостей коэффициентов накопления рыбой разных видов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  от содержания ионов калия и кальция в воде для пресноводных водоемов. В качестве таких зависимостей коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  ( $CR_{\text{Cs}}$ ) в выпотрошенной тушке рыбы без головы и хвоста при естественной влажности от содержания в воде калия в публикациях МАГАТЭ [5, 6] рекомендованы результаты работы [57]: для хищной (всеядной) рыбы:

$$CR_{\text{Cs}} = \quad (1)$$

$$= 4880 \text{ (диапазон изменения: } 1780\text{--}7590\text{)}/[\text{K}^+],$$

и для нехищной рыбы:

$$CR_{\text{Cs}} = \quad (2)$$

$$= 2390 \text{ (диапазон изменения: } 1740\text{--}3280\text{)}/[\text{K}^+],$$

где  $[\text{K}^+]$  – концентрация растворенных в воде ионов калия, мг/л.

Для  $^{90}\text{Sr}$  в зависимости от содержания в воде кальция рекомендованы следующие зависимости коэффициентов накопления рыбой ( $CR_{\text{Sr}}$ ) из работ [7, 10]:

$$CR_{\text{Sr}} \text{ (для мышечной ткани)} = \quad (3)$$

$$= \exp(5.2 - 1.2 \ln[\text{Ca}^{++}]),$$

$$CR_{\text{Sr}} \text{ (для костей)} = \exp(9.7 - 1.2 \ln[\text{Ca}^{++}]), \quad (4)$$

$$CR_{\text{Sr}} \text{ (для целой тушки рыбы)} = \quad (5)$$

$$= \exp(9.13 - 1.2 \ln[\text{Ca}^{++}]),$$

где  $[\text{Ca}^{++}]$  – концентрация растворенных в воде ионов кальция, мг/л.

Цель настоящей работы – получение на основании собственных и литературных экспериментальных данных параметров статистических зависимостей коэффициентов накопления промышленной рыбой разных видов  $^{137}\text{Cs}$  от содержания ионов калия и  $^{90}\text{Sr}$  от содержания ионов кальция в воде для закрытых и полужакрытых пресноводных водоемов. Эти зависимости необходимы для практического хозяйственного использования водоемов и системы радиационного контроля продуктов питания на территории Украины, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС в 1986 г.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА.

Определение содержания  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , ионов калия и кальция в воде, а также накопление радионуклидов в организме различных пресноводных рыб проводили в 2006–2007 гг. в 15 закрытых и полужакрытых тестовых водоемах Киевской, Житомирской, Ровенской и Черниговской областей, а также в 30-километровой зоне отчуждения

ЧАЭС на территории Украины (табл. 1, 2). Плотность загрязнения прилегающих к тестовым водоемам территорий  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  изменялась в широком диапазоне 50–10000 и 5–4000 кБк/м<sup>2</sup> соответственно. В зоне отчуждения ЧАЭС Усовский затон был отгорожен от протоки р. Припять намытым песком в начале 1990-х годов во время строительства новой правобережной дамбы и соединялся с рекой только во время весенних паводков. Все остальные тестовые водоемы являются закрытыми.

Одновременно с отловом рыбы из водоемов проводился отбор проб воды объемом 20–200 л с глубины 1–2 м на удалении не менее 10 м от берега. Во время пробоотбора вода фильтровалась через фильтр 1 мкм, после чего проводилось осаждение из нее  $^{137}\text{Cs}$  на катионит КУ-8 (Украина) и радиохимическое выделение  $^{90}\text{Sr}$  стандартными методами [60]. Часть пробы воды объемом около 1 л подкислялась и использовалась для измерения стандартными методами концентрации растворенных в ней ионов калия  $[\text{K}^+]$  и кальция  $[\text{Ca}^{++}]$  в лабораторных условиях.

Как химический аналог калия  $^{137}\text{Cs}$  в основном равномерно накапливается в мышцах рыб, а  $^{90}\text{Sr}$  как аналог кальция – в костях, плавниках, хвосте и чешуе рыб. Государственные гигиенические нормативы [61] определяют допустимое содержание  $^{137}\text{Cs}$  (<150 Бк/кг) и  $^{90}\text{Sr}$  (<35 Бк/кг) в целом для свежей рыбы, рыбных полуфабрикатов и рыбных продуктов. Поэтому наиболее уместно рассматривать усредненные коэффициенты накопления этих радионуклидов в очищенной рыбе (рыба с головой без внутренностей, плавников, чешуи и жабр).

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  измерялось в мышечной ткани рыб, для чего от каждой особи отбирались пробы мяса без кожи и чешуи. Мышцы по различным оценкам составляют ~60–70% веса рыбы [62–64]. Полученные результаты являются верхней оценкой содержания  $^{137}\text{Cs}$  в очищенной рыбе.

Измерения активности  $^{137}\text{Cs}$  в отобранных образцах проводили в пластиковых емкостях (объемом около 100 см<sup>3</sup> для мышечной ткани и сосудах Маринели объемом 1 л для катионита после выделения из воды  $^{137}\text{Cs}$ ) на низкофономом  $\gamma$ -спектрометрическом комплексе ADCAM-300 с детектором из высокочистого германия GEM-30185 фирмы “EG & G ORTEC” (США) с энергетическим разрешением 1.78 кэВ по линии  $^{60}\text{Co}$  1.33 МэВ.

Содержание  $^{90}\text{Sr}$  измеряли в костях рыб. Для этого отделяли кости черепа и скелета рыб и озоляли в муфельной печи при температуре 600°C. Активность  $^{90}\text{Sr}$  в золе определялась либо прямыми измерениями образцов на бета-спектрометре СЕБ-001 фирмы “АКП” (Украина), либо, в случае малой активности  $^{90}\text{Sr}$  (ниже минимально детектируемой активности), после его радиохимиче-

**Таблица 1.** Средние значения содержания в воде водоемов  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , ионов калия и кальция в 2006–2007 гг.

№ тестового водоема	Водоем/его географическая координата: северная широта–восточная долгота	Содержание в воде			
		K <sup>+</sup> , мг/л	Ca <sup>++</sup> , мг/л	$^{137}\text{Cs}$ , Бк/л	$^{90}\text{Sr}$ , Бк/л
1	о. Доброе (Зона отчуждения ЧАЭС, левобережная пойма р. Припять)/51°17'32"–30°15'49"	0.273	40	0.08	1.2
2	о. Ивановское (Зона отчуждения ЧАЭС, правобережная пойма р. Припять)/51°15'11"–30°16'25"	1.17	50	0.12	2.8
3	Усовский затон (Зона отчуждения ЧАЭС, левобережная пойма р. Припять)/51°28'20"–30°00'48"	0.39	60	0.13	1.9
4	о. Белое (Володимирецкий р-н, н.п. Белое)/51°39'14"–26°01'48"	10.7	20	0.8	0.046
5	Пруд №1 предприятия “Виктория” (Володимирецкий р-н, н.п. Волчица)/51°43'35"–26°02'05"	1.98	46	0.014	0.004
6	о. Сириус (Дубровицкий р-н, н.п. Переброды)/51°44'47"–27°01'43"	0.59	12	0.028	
7	Лиман (Киевское водохранилище)/50°50'20"–30°33'33"	2.75	40	0.002	
8	Пруд н.п. Верховня ( Руженский р-н)/49°48'59"–29°17'45"	4.0	68	0.026	0.008
9	Пруд н.п. Калиновка ( Народичевский р-н)/51°01'16"–29°04'59"	3.0	47	0.014	0.029
10	Пруд н.п. В. Дерезня (Новгород-Волынский р-н)/50°36'48"–27°15'35"	4.5	106	0.015	0.059
11	Пруд н.п. Заречье ( Овручский р-н)/51°18'50"–28°47'11"	2.5	42	0.031	0.076
12	Пруд н.п. Любарка (Народичевский р-н)/51°05'29"–29°03'47"	1.4	42	0.06	0.06
13	Пруд н.п. Дергановка (Руженский р-н)/49°41'48"–29°07'08"	3.4	84	0.008	0.002
14	Пруд №6 н.п. Мнёв (Черниговский р-н)/51°25'33"–30°39'17"	1.7	36	0.026	0.017
15	Пруд №8 н.п. Мнёв (Черниговский р-н) /51°26'22"–30°39'58"	1.3	32	0.026	0.017

ского выделения [60]. Измерение удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в воде тестовых водоемов после его радиохимического выделения проводили также на бета-спектрометре СЕБ-001. При радиохимическом выделении  $^{90}\text{Sr}$  в качестве метки для определения его химического выхода использовали  $^{85}\text{Sr}$ .

Для получения обобщенных параметров статистических зависимостей коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  мышечной тканью и коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  для очищенной рыбы от концентрации в воде водоемов калия и кальция экспериментальные результаты Украинского научно-исследовательского института сельскохозяйственной радиологии были дополнены литературными данными, полученными в разные годы различными авторами в Украине, России, Казахстане, Швеции, странах Прибалтики. Литературные данные по накоплению  $^{137}\text{Cs}$  рыбой были представлены как для мышечной ткани рыб, так и для других тканей и органов, например [26–29]. При радиологическом контроле содержание  $^{137}\text{Cs}$ , как правило, измеряется только в мышечной ткани рыб, поскольку оно определяет загряз-

нение съедобной части очищенной рыбы. В настоящей работе были использованы только экспериментальные результаты по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани рыб. Соответствующие коэффициенты накопления  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани рыб будут верхней оценкой коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  в очищенной рыбе.

Литературные данные по содержанию  $^{90}\text{Sr}$  и его коэффициентам накопления в рыбе можно разделить условно на три категории: данные по распределению  $^{90}\text{Sr}$  в органах рыб [29, 44]; данные по содержанию  $^{90}\text{Sr}$  только в костях рыб [13, 14]; данные по содержанию  $^{90}\text{Sr}$  в тушках и в целом в очищенной рыбе [34–36]. Удельное содержание (коэффициент накопления)  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе в целом значительно ниже, чем в костях, плавниках и чешуе. Для того чтобы сопоставить данные, полученные разными авторами и дополнить ими полученные нами экспериментальные результаты, все данные по коэффициентам накопления  $^{90}\text{Sr}$  в органах и тканях рыб были проанализированы и пересчитаны на очищенную рыбу с учетом информации о весовом составе органов и тканей разных видов рыб [62–64]. Для этого были ис-

**Таблица 2.** Значения коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах и  $^{90}\text{Sr}$  в тушках рыб, полученные в Украинском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной радиологии Национального университета биоресурсов и природопользования Украины для тестовых водоемов

Вид рыбы	№ тестового водоема	<i>N</i>	<i>GM</i>	<i>GSD</i>	<i>AM</i>	<i>SD</i>	Min	Max
<i>CR<sub>Cs</sub></i> , л/кг								
Щука	1	6	10760	1.26	11010	2660	8340	15380
	2	16	1830	1.25	1870	410	1230	2570
	3	111	7750	1.75	9130	5800	2580	33900
Окунь	1	2	10480	1.11	10500	1020	9780	11220
	2	33	2420	1.36	2540	850	1360	5670
	3	60	4280	1.70	4930	2870	940	16920
	4	5	690	1.30	700	190	570	910
	7	12	7500	1.30	7500	1950	6400	8900
Судак	3	5	5150	1.67	5670	2620	2770	8970
Жерех	3	5	4440	1.73	5070	3180	2340	10490
Плотва	3	2	1650	1.57	1740	760	1200	2280
	4	5	400	1.35	400	120	350	510
	7	10	3000	1.49	3000	1200	2300	4100
Густера	3	8	1460	1.09	1470	120	1290	1600
Красноперка	1	2	2650	1.49	2750	1060	2000	3500
	2	12	630	1.45	670	280	450	1200
	3	32	2390	2.16	3230	2820	770	9790
	7	5	3000	1.57	3000	1350	2100	4100
Карп	5	2	960	1.16	970	140	870	1070
	6	7	2310	1.06	2320	150	2210	2540
	7	2	3500	1.49	3500	1400	2500	4500
Карась	1	52	2300	1.46	2480	1200	720	7590
<i>CR<sub>Sr</sub></i> , л/кг								
Окунь	2	6	840	1.36	870	270	580	1190
Красноперка	2	1	570	—	570	—	570	570
Карась	1	3	120	5.21	240	290	20	570

Примечание. *N* – число проб, *GM* – среднее геометрическое, *GSD* – стандартное геометрическое отклонение, *AM* – среднее арифметическое, *SD* – стандартное отклонение, Min – минимальное значение, Max – максимальное значение.

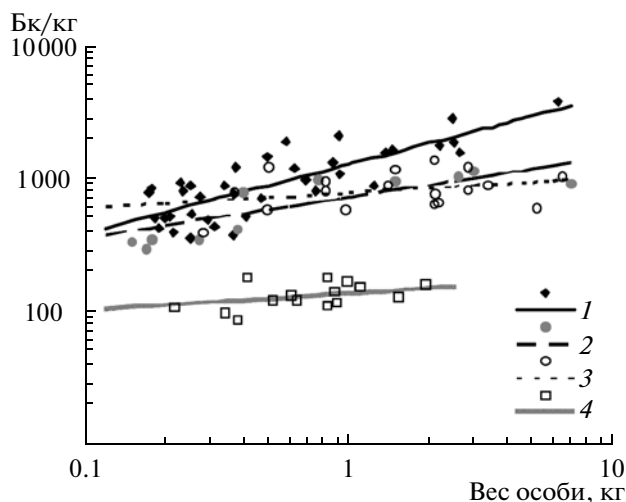
пользованы литературные данные по отношению удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в костях различных рыб к удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в мышцах, тушках и в очищенной рыбе.

Совокупность собранной информации по коэффициентам накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  рыбой была систематизирована и подвергнута статистическому анализу. Были обработаны данные для 16 видов рыб: щука (*Esox lucius*); окунь (*Perca fluviatilis*); судак (*Stizostedion lucioperca*); жерех (*Aspius aspius*); сом (*Silurus glanis*); плотва (*Rutilus rutilus*); лещ (*Abramis brama*); красноперка (*Scardinius erythrophthalmus*); густера (*Blicca bjoerkna*); голавль

(*Leuciscus cephalus*); синец (*Abramis ballerus*); язь (*Leuciscus idus*); линь (*Tinca tinca*); карась золотой (*Carassius carassius*); сазан и карп (*Cyprinus carpio*) – это один биологический вид, дикая форма “сазан” и культурная “карп”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Накопление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе представляет сложный стохастический процесс, который обусловливается экологическими и физиологическими процессами, происходящими в водоеме после поступления в него радиоактивных веществ и в организме рыб на протяжении рассмат-



**Рис. 1.** “Размерный эффект” – зависимость удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани щук от их веса для водоемов зоны отчуждения ЧАЭС: Усовский затон (1 – 10.2000 г.; 2 – 09.2001 г.; 3 – 09–12.2006 г.) и оз. Ивановка (4 – 09–12.2006 г.).

риваемого периода, а также вероятностными особенностями процесса питания рыбы неоднородно загрязненным радионуклидами кормом. К тому же на величину накопления радионуклидов в организме даже одного вида рыб влияет их рацион питания, связанный с временем года (сезоном) и возрастом (весом и размером) особи, а также интенсивность метаболизма радионуклидов. Это явление получило в литературе название “размерный эффект” [46, 52, 55], который наиболее ярко выражен у хищных рыб. В работе [52] по-

казано, что размерный тренд удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах различных рыб удовлетворительно описывается зависимостью

$$C_f(g) = C_0 g^\alpha, \quad (6)$$

где  $g$  – вес особи, кг;  $C_0$  – удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах рыбы весом 1кг;  $\alpha$  – параметр модели. Характерные размерные тренды удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  для щук, выловленных в различное время в двух тестовых водоемах, находящихся в зоне отчуждения ЧАЭС, показаны на рис. 1. Наблюдается увеличение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани хищной рыбы с увеличением ее размера (массы). Полученные на основании массива экспериментальных данных УкрНИИСХР в тестовых водоемах параметры и их характеристики зависимости (6) удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в мясе щуки и окуня приведены в табл. 3.

Еще в 60–70-х годах прошлого века в первых работах по радиоэкологии водных организмов было установлено, что содержание в органах и тканях рыбы  $^{137}\text{Cs}$  обратно пропорционально содержанию ионов калия, а содержание  $^{90}\text{Sr}$  обратно пропорционально содержанию ионов кальция в воде водоема [53, 54, 59].

Дальнейшее изучение этого вопроса показало, что такое накопление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  организмом рыб обуславливается обратно пропорциональной зависимостью соответствующих коэффициентов накопления от содержания соответственно ионов калия или кальция в воде водоема [14, 38, 56–58]. В общем виде зависимость коэффициента накопления  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{90}\text{Sr}$ ) рыбой имеет вид

**Таблица 3.** Параметры и характеристики размерного тренда удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (уравнение 6) в мышцах щуки и окуня от их веса

Водоем и дата отлова рыбы	$C_0$ , Бк/кг	Погрешность $C_0$ , Бк/кг	$\alpha$	Погрешность, $\sigma_\alpha$	Остаточное стандартное отклонение $s_{oc}$	Число проб, $n$
Щука						
Усовский затон, 10.2000	1256	+92 –86	0.521	0.063	0.35	37
Усовский затон, 04–06.2001	1024	+82 –76	0.355	0.072	0.39	31
Усовский затон, 06.2001	707	+71 –65	0.306	0.077	0.29	11
Усовский затон, 06–12.2006	765	+64 –59	0.116	0.084	0.31	18
Оз. в н.п. Ивановка, 06–12.2006	137	±8	0.13	0.063	0.198	16
Окунь						
Усовский затон, 2001 г.	855	+283 –213	0.155	0.096	0.490	60
Оз. в н.п. Ивановка, 05–08.2006	483	+116 –93	0.465	0.094	0.236	34

Таблица 4. Перечень источников экспериментальных данных

Расположение и название водоемов	Источники
Тестовые водоемы на территории Украины, загрязненной радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС (озера в зоне отчуждения ЧАЭС; о. Белое н.п. Белое, о. Сириус н.п. Переброды и пруд № 1 н.п. Волчица Ровен. обл.; пруды в н.п. Любарка, Заречное, Верховня, Дергановка, Калиновка, Дерезня Жит. обл.; пруды в н.п. Мнїв Черн. обл.)	Данные авторов и результаты [22, 33]
Территория Украины, Белоруссии и России после аварии на ЧАЭС (о. Глубокое и водоем-охладитель зона отчуждения ЧАЭС; Киевское и Каневское водохранилища; озера Святое(Костюковичи), Святое (Чечерск), Святское, Кажановское, Глубокое, Тюменское, Колпино, Стоячие)	[24–29, 31], [46, 55, 57, 58]
Территории России, Прибалтики и Украины до аварии на ЧАЭС (озера Валдайское, Едрово, Пелино, Лива, Залесье, Нетятгы, Черное, Веленское, Ладожское, Островенское, Колодно, Окунево, Шучье, Медвежье, Большое, Веленское, Буро-Белое, Ловецкое, Илза-Гаранимовас, Рушонус, Пителю, Черно-стес, Алаукетс, Энгурес, Кегумское, Плявинское и Запорожское водохранилища; Дунай у г. Вилково)	[16–18, 20, 38], [42–44, 48, 51]
Казахстан (о. Балхаш)	[13–15]
Белоярское водохранилище и озера Южного Урала (озера Б. Миассово, Алабуга, Калды, Агряш, Теренкуль, Иртяш, Б. Таткуль, Кажаккуль, Карагайкуль, Киреты Урефты, Б. Касли, Шелкунское, Касарги)	[34–37, 40, 41], [49]
Кольский п-ов (Серебряное и Верхнетулумское водохранилище, Левоозеро)	[12, 16–18]
Швеция (о. Улкешен), Финляндия (о. Пяйянне)	[30, 47]

$$CR_{Cs} = \frac{a_{Cs}}{(K^+)^{b_{Cs}}}; \quad CR_{Sr} = \frac{a_{Sr}}{(Ca^{++})^{b_{Sr}}}; \quad (7)$$

где  $a_{Cs}(a_{Sr})$  и  $b_{Cs}(b_{Sr})$  – соответствующие параметры модели, которые связывают  $CR_{Cs}$  с концентрацией ионов калия  $[K^+]$  в (мг/л) и  $CR_{Sr}$  с концентрацией ионов кальция  $[Ca^{++}]$  в (мг/л) в воде водоема..

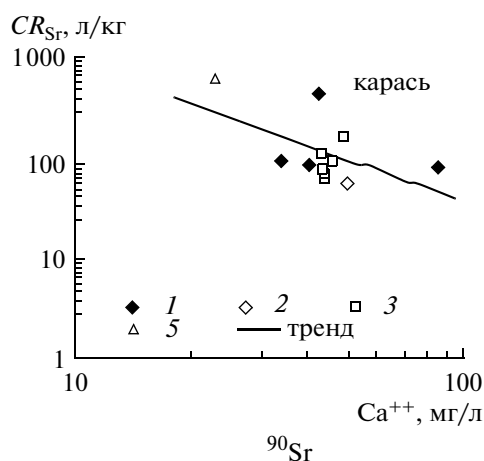
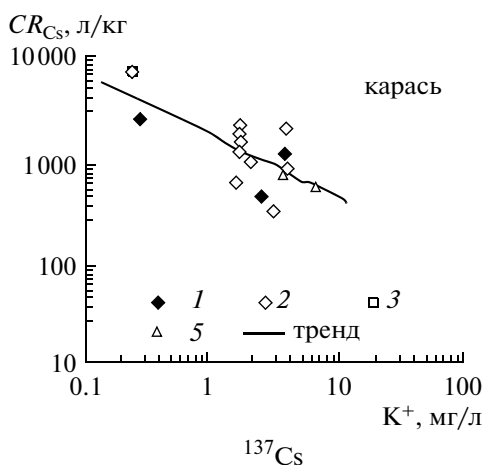
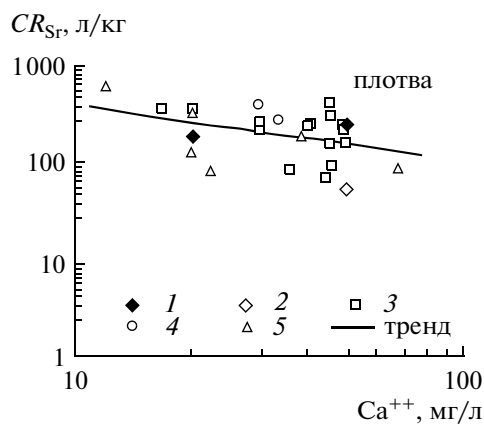
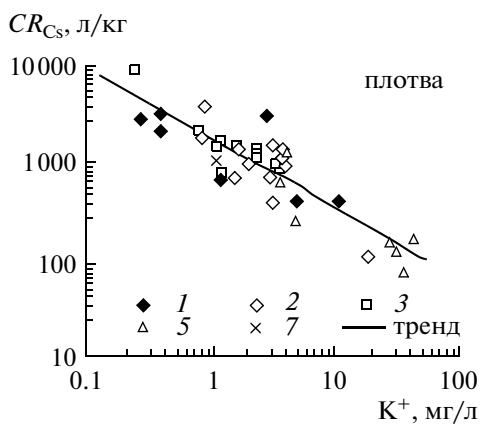
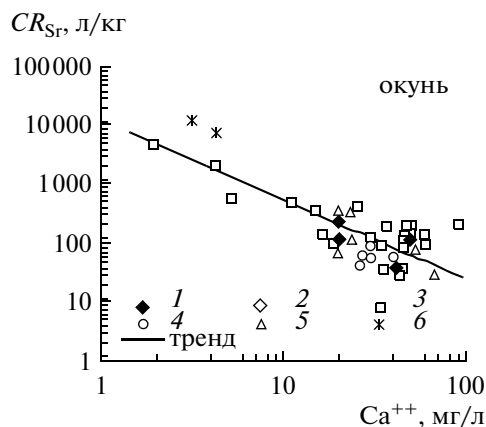
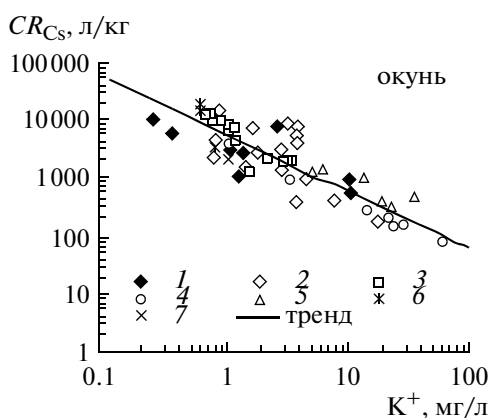
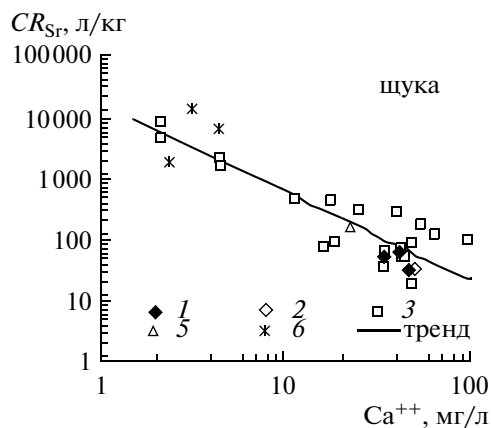
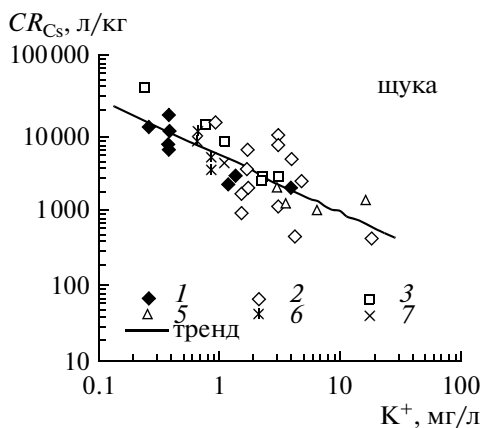
Параметр  $a_{Cs}(a_{Sr})$  имеет физическое значение. Это коэффициент накопления радионуклида рыбой в водоеме, в котором вода содержит 1 мг/л ионов калия (кальция).

Для практического использования приведенных зависимостей коэффициентов накопления  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  в рыбе необходимо знать параметры  $a_{Cs}(a_{Sr})$  и  $b_{Cs}(b_{Sr})$  или их оценки. Авторы работ [57, 58] показали, что модель (7) хорошо описывает коэффициенты накопления  $^{137}Cs$  в мышцах щуки и окуня, которые наблюдаются в 10 водоемах Белоруссии, России и Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. Авторами утверждается, что для коэффициентов накопления  $^{137}Cs$  рыбой влияние “размерного эффекта” на остаточную дисперсию модели (7) намного меньше, чем влияние содержания в воде озер ионов калия  $[K^+]$ . Это позволяет пренебречь влиянием “размерного эффекта” (рис.1) при обобщении результатов по наблюдаемым коэффициентам накопления  $^{137}Cs$  рыбой, приведенных в разных публикациях без указания веса и размера рыб, для которых они были получены.

Следует отметить, что до аварии на ЧАЭС в литературе в основном анализировались зависимости содержания  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  в тканях и органах рыб от концентрации ионов калия и кальция в воде водоема. После аварии значительно большее внимание стало уделяться анализу зависимостей именно коэффициентов накопления  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  рыбой от концентрации соответственно ионов калия и кальция в воде водоемов [13–15, 38, 40, 48, 51, 58]. Это направление исследований наиболее удобно для практического применения полученных результатов – прогнозирования содержания  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  в рыбе различных водоемов.

Использованное здесь обобщение эмпирических коэффициентов накопления, полученных различными авторами, позволяет существенно повысить достоверность оценок параметров модели (7), выбранной для описания зависимости коэффициентов накопления  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  в организме рыб от содержания в воде водоема соответственно ионов калия и кальция. Результаты статистической обработки всей собранной нами совокупности экспериментальных данных (как собственных, так и литературных) (табл. 4) для характерных видов хищной и мирной рыбы приведены на рис. 2, из которого видно, что полученные авторами значения коэффициента накопления (темные точки) и литературные данные дополняют друг друга и хорошо описываются общепринятыми моделями (7).

Оценки параметров зависимостей (7) для коэффициентов накопления  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  в организме



← **Рис. 2.** Зависимость коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах рыб и  $^{90}\text{Sr}$  в выпотрошенной и очищенной рыбе от содержания в воде соответственно ионов калия и кальция (расшифровка водоемов приведена в табл. 4).

различных видов рыб и соответствующие статистические характеристики параметров моделей приведены в табл. 5 и 6 соответственно. Поскольку при избранном типе модели (7) зависимости коэффициентов накопления ( $CR$ ) в логарифмических координатах имеют линейный вид, то в табл. 5 и 6 остаточное стандартное отклонение модели приведено для логарифма ( $SD_{\text{Ln}(CR)}$ ).

Зависимости коэффициента накопления  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани рыб от содержания ионов калия в воде и коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  для очищенной рыбы (выпотрошенной тушке без жабр, плавников, чешуи и внутренностей) от содержания ионов кальция в воде носят статистический характер. При фиксированном значении концентрации ионов калия (кальция) в воде

**Таблица 5.** Параметры и статистические характеристики зависимостей (7) коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах рыбы от содержания в воде ионов  $\text{K}^+$  рыбой

Название рыбы	N	$a_{\text{Cs}}$ , л/кг		$b_{\text{Cs}}$		r	Стандартное отклонение, $SD_{\text{Ln}(CR)}$
		GM	GSD	AM	SD		
Щука ( <i>Esox lucius</i> )	38	4915	1.12	0.75	0.10	0.77	0.64
Окунь ( <i>Perca fluviatilis</i> )	61	5808	1.12	0.99	0.06	0.90	0.67
Судак ( <i>Stizostedion lucioperca</i> )	9	4404	1.55	0.81	0.24	0.78	0.85
Жерех ( <i>Aspius aspius</i> )	6	3160	1.70	0.59	0.30	0.70	0.86
Сом ( <i>Silurus glanis</i> )	4	90599	1.72	2.24	0.27	0.99	0.35
Плотва ( <i>Rutilus rutilus</i> )	45	1803	1.11	0.73	0.06	0.88	0.49
Лещ ( <i>Abramis brama</i> )	19	1106	1.31	0.73	0.15	0.75	0.61
Красноперка ( <i>Scardinius erythrophthalmus</i> )	11	1954	1.20	0.43	0.20	0.57	0.57
Густера, голавль, синец ( <i>Blicca bjoerkna</i> , <i>Leuciscus cephalus</i> , <i>Abramis ballerus</i> )	9	1405	1.36	0.29	0.24	0.42	0.55
Линь ( <i>Tinca tinca</i> )	6	979	1.86	0.48	0.43	0.49	0.54
Карась золотой ( <i>Carassius carassius</i> )	16	1687	1.20	0.62	0.16	0.71	0.57
Карп, Сазан ( <i>Cyprinus carpio</i> )	42	1701	1.15	0.72	0.07	0.85	0.69

Примечание. Здесь и в табл. 6: GM – среднее геометрическое, GSD – стандартное геометрическое отклонение, AM – среднее арифметическое, SD – стандартное отклонение, r – коэффициент корреляции.

**Таблица 6.** Параметры и статистические характеристики зависимостей коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  для очищенной рыбы от содержания в воде ионов  $\text{Ca}^{++}$

Название рыбы	N	$a_{\text{Sr}}$ , л/кг		$b_{\text{Sr}}$		r	Стандартное отклонение $SD_{\text{Ln}(CR)}$
		GM	GSD	AM	SD		
Щука ( <i>Esox lucius</i> )	30	18485	1.54	1.45	0.13	0.90	0.83
Окунь ( <i>Perca fluviatilis</i> )	48	11812	1.60	1.35	0.14	0.82	0.77
Судак ( <i>Stizostedion lucioperca</i> )	8	27146	5.37	1.80	0.48	0.83	0.35
Жерех ( <i>Aspius aspius</i> )	12	152970	6.11	2.0	0.51	0.78	0.47
Сом ( <i>Silurus glanis</i> )	9	6445	2.61	1.28	0.27	0.87	0.22
Лещ ( <i>Abramis brama</i> )	16	4599	2.20	0.94	0.23	0.74	0.51
Плотва, красноперка, густера, язь ( <i>Rutilus rutilus</i> , <i>Scardinius erythrophthalmus</i> , <i>Blicca bjoerkna</i> , <i>Leuciscus Indus</i> )	28	1238	2.39	0.55	0.25	0.40	0.55
Карась золотой ( <i>Carassius carassius</i> )	13	22170	14.59	1.39	0.71	0.55	0.69
Карп, Сазан ( <i>Cyprinus carpio</i> )	23	4639	1.37	0.89	0.08	0.93	0.31

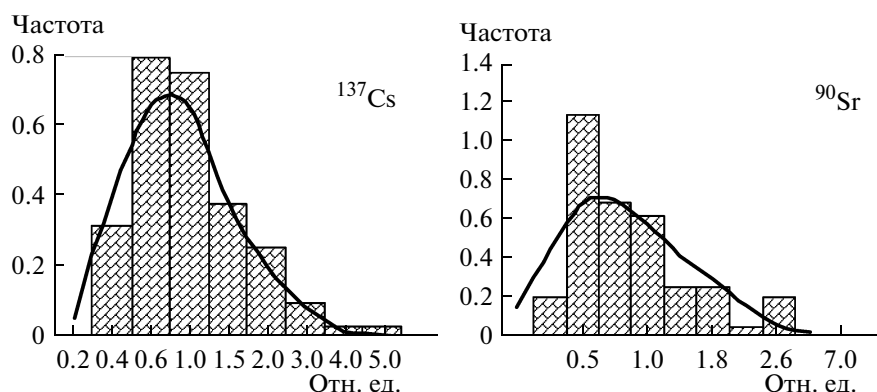


Рис. 3. Распределение нормированных коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для окуня относительно соответствующих трендов вида (7).

(конкретно взятый водоем) распределение вероятностей, соответствующих коэффициенту накопления, близко к логнормальному закону распределения, что иллюстрирует рис. 3, на котором приведены гистограммы нормированных на тренд вида (7) значений коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для окуня, а также их аппроксимация логнормальным законом распределения вероятностей. Полученный вывод хорошо согласуется с результатами, полученными в работах [65, 66], где показано, что удельное содержание  $^{137}\text{Cs}$  в рыбах одного вида в конкретном водоеме удовлетворительно описывается логнормальным распределением.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для рыб разных видов, полученных при обследовании водоемов, расположенных на территории Украины и подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, а также литературных данных, показал, что они хорошо согласуются и дополняют друг друга. Результаты проведенного статистического анализа всех доступных авторам данных о коэффициентах накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для различных видов рыб позволили уточнить и конкретизировать известные в научной литературе выводы по накоплению радионуклидов в организме рыб. В частности, в работах [32, 56–58] утверждается, что параметр  $b$  модели (7) как для коэффициента накопления  $^{137}\text{Cs}$ , так и для  $^{90}\text{Sr}$  необходимо принимать равным 1. Нам кажется, что это не совсем обоснованно. Во-первых, приведенные здесь результаты говорят о том, что параметр  $b$  для коэффициента накопления  $^{137}\text{Cs}$  в рыбе в целом отличается от такового для коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе. Во-вторых, для каждого вида рыб этот параметр свой, несмотря на то, что для отдельных видов рыб значения параметра  $b$  близки. Следует

отметить, что резкое отличие этого параметра для сома от значений, полученных для других хищных рыб, возможно связано с недостаточным объемом данных (всего 4 различных значения по содержанию ионов калия в воде) или специфическим всеядным рационом его питания.

В целом, полученные нами усредненные по разным видам рыб параметры  $a_{\text{Cs}}$  и  $a_{\text{Sr}}$  зависимостей (7) для коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  хищной рыбой (за исключением сома) от содержания в воде ионов калия  $[\text{K}^+]$ :  $a_{\text{Cs}} = 4570 \pm 600$  л/кг;  $b_{\text{Cs}} = 0.78 \pm 0.08$  и для мирной рыбы:  $a_{\text{Cs}} = 1800 \pm 3000$  л/кг;  $b_{\text{Cs}} = 0.63 \pm 0.09$ , а также для  $^{90}\text{Sr}$  в тушке всех видов рыб (за исключением жереха) от содержания в воде ионов кальция  $[\text{Ca}^{++}]$ :  $a_{\text{Sr}} = 16000 \pm 5000$  л/кг и  $b_{\text{Sr}} = 1.2 \pm 0.1$  не противоречат рекомендованным МАГАТЭ [5, 6] зависимостям (1, 2 и 5) из работы [7, 10, 57], но при этом параметры  $b_{\text{Cs}}$  и  $b_{\text{Sr}}$  отличаются друг от друга и от единицы.

## ВЫВОДЫ

Результаты данной работы позволяют сделать следующие выводы.

Получены обобщенные статистические зависимости коэффициентов накопления в организме пресноводных рыб  $^{137}\text{Cs}$  от концентрации ионов калия и  $^{90}\text{Sr}$  от концентрации ионов кальция в воде водоема, а также параметры и характеристики размерного тренда удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах щуки и окуня.

Для зависимости коэффициента накопления  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах рыб от концентрации в воде ионов калия усредненная оценка параметра  $b$  уравнения (7) равна: рыба в целом (без сома) –  $0.68 \pm 0.07$ , хищные рыбы (щука, окунь, судак, жерех) –  $0.78 \pm 0.08$ , мирные рыбы –  $0.63 \pm 0.09$ .

Для зависимости коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе от концентрации в воде ионов кальция усредненная оценка параметра  $b$  уравнения (7)

равна: рыба в целом —  $1.32 \pm 0.14$ , хищные рыбы —  $1.58 \pm 0.14$ , мирные рыбы —  $1.05 \pm 0.18$ .

Утверждение, что содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах хищной рыбы превосходит аналогичные показатели для мирных рыб, справедливо не для любого водоема и не для всех видов рыб. При концентрации калия в воде водоема больше 50 мг/л может наблюдаться обратная картина (см., например, рис. 2 “окунь”, “плотва”).

Утверждение, что содержание  $^{90}\text{Sr}$  в хищной рыбе всегда меньше аналогичного показателя для мирных рыб, справедливо не для любого водоема и не для всех видов рыб. При концентрации кальция в воде водоема меньше 10 мг/л может наблюдаться обратная картина (см., например, рис. 2 “окунь”, “плотва”).

Показано, что в конкретном водоеме при одинаковом содержании ионов калия (кальция) в воде распределение вероятностей соответствующих коэффициентов накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе одного вида близко к логнормальному закону.

Авторы выражают благодарность НУБиП Украины и Государственному департаменту — Администрации Зоны отчуждения МЧС Украины за поддержку данной работы, а также заведующему лабораторией ядерно-физических методов анализа и радиохимии УкрНИИСХР канд. биол. наук Левчуку С.Е. и сотрудникам лаборатории за проведение измерений активности радионуклидов в образцах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ICRP Publication 103 / Ed. J. Valentin. ELSEVIER: Published by Elsevier Ltd., 2007. 332 p.
- Smith J.T., Voitsekhoivitch O.V., Hilton J. // J. Environ. Radioactiv. 2001. V. 56. P. 11–32.
- Sazykina T.G., Kryshev A.I. // J. Environ. Radioactiv. 2003. V. 68. P. 65–87.
- Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group “Environment”. Vienna: IAEA, 2006. 166 p.
- Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Vienna: IAEA-TRS-462, 2010. 194 p.
- Yankovich T. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. Vienna: IAEA-TECDOC-1616, 2009. P. 473–545.
- Yankovich T.L., Beaton D. Concentration ratios of stable elements measured in organs of terrestrial, freshwater and marine non-human biota for input into internal dose assessment for PSL-2: A literature review. COG-99-106-I, 2000.
- Koulikov A., Meili M. // J. Environ. Radioactiv. 2003. V. 66. P. 309–326.
- Kryshev A.I. // J. Environ. Radioactiv. 2003. V. 64. P. 67–84.
- Blaylock B.G. // Nucl. Safety. 1992. V. 23. P. 427–433.
- Saxén R, Sundell J. // J. Environ. Radioactiv. 2006. V. 87. № 1. P. 62–76.
- Бакунов Н.А., Дричко В.Ф., Панасенкова О.И. // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38. Вып. 5. С. 754–762.
- Брагин Б.И. // Экология гидробионтов водоемов Казахстана. Алма-Ата, 1973. С. 99–110.
- Брагин Б.И. Накопление стронция-90 гидробионтами оз. Балхаш: Автореф. ... канд. биол. наук. Алма-Ата: Академия наук Казахской ССР; Ин-т зоологии и экспериментальной биологии, 1974. 21 с.
- Брагин Б.И., Матмуратов С.А. // Радиология водных организмов. Рига, 1973. № 2. С. 123–128.
- Буянов Н.И., Антонечко Т.М. // Вопр. ихтиологии. 1975. Т. 15. № 1. С. 176–179.
- Буянов Н.И., Лаптев М.И., Осолкова Н.М. // Взаимодействие между водой и живым веществом: Тр. Междунар. симп. Т. 1. М.: Наука, 1979. С. 248–251.
- Буянов Н.И., Лаптев М.И., Прудников Л.В., Осолкова Н.М. // Радиоэкология животных: Матер. I Всесоюз. конф. М., 1977. С. 36–37.
- Staven L.H., Napier B.A., Rhoads K., Strenge D.L.A. // Compendium of Transfer Factors for Agricultural and Animal Products. Washington: PNNL-13421, 2003. 31 p.
- Вадзис Д.Р., Ленерте М.П., Сейсума З.К., Слока Я.Я. Стронций и кальций в природных пресноводных экосистемах. Рига: Зинатне, 1979. 196 с.
- Волкова Е.Н., Беляев В.В., Зарубин О.Л., Гудков Д.И. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49. № 2. С. 207–211.
- Волкова Е.Н., Беляев В.В., Широкая З.О. и др. // 36. науч. праць Ін-ту ядерних досліджень. 2002. № 1. С. 150–154.
- Гудков Д.И., Каглян А.Е., Куреев С.И. и др. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 1. С. 48–58.
- Гудков Д.И. Радіонукліди в компонентах водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС: розподіл, міграція, дозові навантаження, біологічні ефекти: Автореф. ... д-ра біол. наук. Київ: КДУ, 2006. 34 с.
- Жукова О.М., Герменчук М.Г., Шагалова Э.Д. и др. // Природные ресурсы. 2003. № 1. С. 82–85.
- Зарубин О.Л. Динамика вмісту  $^{137}\text{Cs}$  у рибах (на прикладі водойма-охолоджувача Чорнобильської АЕС): Автореф. ... канд. біол. наук. Київ: ІЯД, 2003. 17 с.
- Зарубин О.Л., Канивец В.В., Волкова Е.Н. и др. // Гидробиол. журн. 2007. Т. 43. № 2. С. 71–79.
- Зарубин О.Л., Канивец В.В., Волкова Е.Н. и др. // Гидробиол. журн. 2007. Т. 43. № 4. С. 109–119.
- Каглян А.Е. // Гидробиол. журн. 2007. Т. 43. № 5. С. 93–109.
- Карлсон С., Лиден К. // Экология. 1977. № 6. С. 27–31.
- Коноплев А.В., Булгаков А.А., Журнов В.Г. и др. // Метеорология и гидрология. 1998. № 11. С. 78–87.
- Крышев А.И. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 3. С. 364–369.
- Кузьменко М.І., Романеско В.Д., Деревец В.В. Радіонукліди в водних екосистемах України. Вплив радіоактивного забруднення на гідробіоси зони відчуження. Київ: “Чорнобильінтерінформ”, 2001. 318 с.
- Куликов Н.В., Куликова В.Г. // Экология. 1977. № 5. С. 45.

35. Куликов Н.В., Чеботина М.Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 128, 129.
36. Куликова В.Г., Куликов Н.В., Гусева В.П. // Проблемы радиоэкологии водоемов-охладителей атомных станций. Свердловск, 1978. С. 76–80.
37. Любимова С.А., Пискунов Л.И. // Влияние тепловых электростанций на гидрологию и биологию водоемов. Борок, 1974. 206 с.
38. Марей А.Н. Санитарная охрана водоемов от загрязнений радиоактивными веществами. М.: Атомиздат, 1976. 224 с.
39. Матмуратов С.А. // Экология гидробионтов водоемов Казахстана. Алма-Ата, 1973. С. 84–99.
40. Милакина Л.А., Смирнов А.Б., Антонова Т.А., Аксенов Г.М. // Гидробиол. журн. 1992. Т. 28. № 4. С. 82–87.
41. Пешков С.П., Шеханова И.А., Романов Г.Н. и др. // Проблемы радиологии водоемов-охладителей атомных станций. Свердловск, 1978. С. 47–55.
42. Поликарпов Г.Г. Морская радиохимическая экология и проблема загрязнений. Киев: Наук. думка, 1984. 184 с.
43. Поликарпов Г.Г. Морская радиоэкология. Киев: Наук. думка, 1970. 276 с.
44. Радиология водных организмов. Рига: Зинатне, 1972. 126 с.
45. Романенко В.Д., Кузьменко М.И., Евтушенко Н.Ю. и др. Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС. Киев: Наук. думка, 1992. 196 с.
46. 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.
47. Саксен Р., Яаккола Т., Раттаваара А. // Радиохимия. 1996. Т. 38. № 3. С. 365–370.
48. Солюс А.А., Флейшман Д.Г., Леонтьев В.Г. // Вопр. ихтиологии. 1970. Т. 10. № 6 (65). С. 1091–1097.
49. Трапезникова В.Н. Накопление, распределение и миграций  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах Белоярского водохранилища: Автореф. ... канд. биол. наук. Екатеринбург: Уро РАН, Ин-т экологии растений и животных, 1994. 17 с.
50. Трапезникова В.Н., Трапезников А.В., Куликов Н.В. // Экология. 1984. № 6. С. 36–40.
51. Флейшман Д.Г. Щелочные элементы и их радиоактивные изотопы в водных экосистемах. М.: Наука, 1982. 160 с.
52. Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.О., Лундин С.М. и др. // Вісн. аграр. науки. 2007. № 11. С. 427–438.
53. Bryun J.W., Preston A., Templeton W.L. // Disposal of radioactivity wastes into seas, oceans and surface waters. Vienna: IAEA, 1966. P. 623–637.
54. Kolehmainen S., Hästönen E., Miettinen J.K. // Health Phys. 1966. V. 12. № 7. P. 917–922.
55. Onishi Y., Voitsekhovsch O., Zhelezniak M. // Environ. Pollut. 2006. V. 12. 230 p.
56. Rowan D.J., Rasmussen J. B. // Can. J. Fisheries and Aquatic Sci. 1994. V. 51. P. 2388–2410.
57. Smith J.T., Kudelsky A.V., Ryabov I.N., Haddingh R.H. // J. Environ. Radioactiv. 2000. V. 48. P. 359–369.
58. Smith J.T., Kudelsky A.V., Ryabov I.N. et al. // J. Environ. Radioactiv. 2002. V. 62. P. 145–164.
59. Whicker F.W., Schultz V. // Radioecology: Nuclear Energy and Environmental. 1982. V. 1. P. 212–232.
60. Павлоцкая Ф.И. // Журн. аналит. химии. 1997. Т. 52. № 2. С. 126–143.
61. Державні гігієнічні нормативи ГН 6.6.1.1-130-2006. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питної води // Офіц. вісн. України. 2006. № 29. С. 142–155.
62. Клейменов И.Я. Химический и весовой состав основных промысловых рыб. М.: ПИЩЕПРОМИЗДАТ, 1952. 60 с.
63. Шеханова А.И. Радиоэкология рыб. М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1983. 208 с.
64. Yankovich T.L. // J. Environ. Radioactiv. 2009. V. 100. P. 795–801.
65. Хомутинин Ю.В. Оптимизация радиоэкологического мониторинга загрязненных искусственными радионуклидами территорий и сельскохозяйственной продукции. Автореф. .... д-ра с/х наук. Киев: УкрНИИКСХР, 2008.
66. Oleksyk T.K., Gashchak S. P., Glenna T.C. et al. // J. Environ. Radioactiv. 2002. V. 61. P. 55–74.

Поступила в редакцию  
16.03.2010

## Dependences of $^{137}\text{Cs}$ and $^{90}\text{Sr}$ Concentration Ratios in Fish on the Potassium and Calcium Concentrations in the Freshwater Reservoirs

Yu. V. Khomutinin, V. A. Kashparov, A. V. Kuz'menko

Ukrainian Institute of Agricultural Radiology (UIAR) of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (NUBiP of Ukraine), Kiev, Ukraina;

e-mail: vak@uiar.kiev.ua

Activities of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ , concentrations of the potassium and calcium ions in water and accumulation of the radionuclides in the organisms of various freshwater fish have been measured in the stagnant and semi-stagnant water reservoirs of Ukraine contaminated as a result of the Chernobyl accident. On the basis of the numerous experimental data for different regions the statistical parameters were derived describing the dependences of the  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  concentration ratios in the muscle tissue of various fish species on the potassium and calcium concentrations in water, respectively.