

УДК [577.34:597](285.2/3)

А. Е. Каглян¹, Д. И. Гудков¹, С. И. Киреев², Л. П. Юрчук¹,
Е. А. Гупало¹

РЫБЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ДОЗОВЫЕ НАГРУЗКИ

Приведены результаты оценки уровней радионуклидного загрязнения и мощности поглощенной дозы для рыб Чернобыльской зоны отчуждения в период 2010—2018 гг. Содержание ¹³⁷Cs у представителей ихтиофауны замкнутых водоемов в период исследований продолжало снижаться, в то время как удельная активность ⁹⁰Sr оставалась без изменений или увеличивалась. При оценке дозовых нагрузок на рыб применен модифицированный подход на основе программного обеспечения ERICA Assessment Tool, учитывающий миграционную активность рыб и гетерогенный характер радионуклидного загрязнения донных отложений в водоеме. Наибольшая годовая доза облучения (до 1,2 Гр) отмечена для придонных видов рыб. Удельная активность ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в рыбах замкнутых водоемов в десятки и тысячи раз превышает принятые в Украине допустимые уровни для рыбной продукции.

Ключевые слова: Чернобыльская зона отчуждения, водные экосистемы, рыбы, ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, мощность поглощенной дозы.

Радиоэкологические исследования рыб, включающие анализ уровней радионуклидного загрязнения и оценку мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения в водоемах, испытывающих влияние предприятий атомной энергетики, являются важной составляющей стратегии сохранения ихтиофауны, как одного из наиболее радиочувствительных компонентов водной экосистемы и ее биологического разнообразия, а также обеспечения безопасности для здоровья человека при потреблении загрязненной радионуклидами рыбы.

В соответствии с законом Украины «Об обеспечении санитарного и эпидемического благополучия населения», Министерством охраны здоровья Украины был принят указ об утверждении Государственных гигиенических нормативов «Допустимые уровни содержания ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в продуктах питания и питьевой воде», согласно которым допустимая удельная активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в рыбе была установлена, соответственно, на уровне 150 и 35 Бк/кг массы при естественной влажности [2].

Научным комитетом по действию атомной радиации ООН (UNSCEAR) и независимой неправительственной организацией Международной комис-

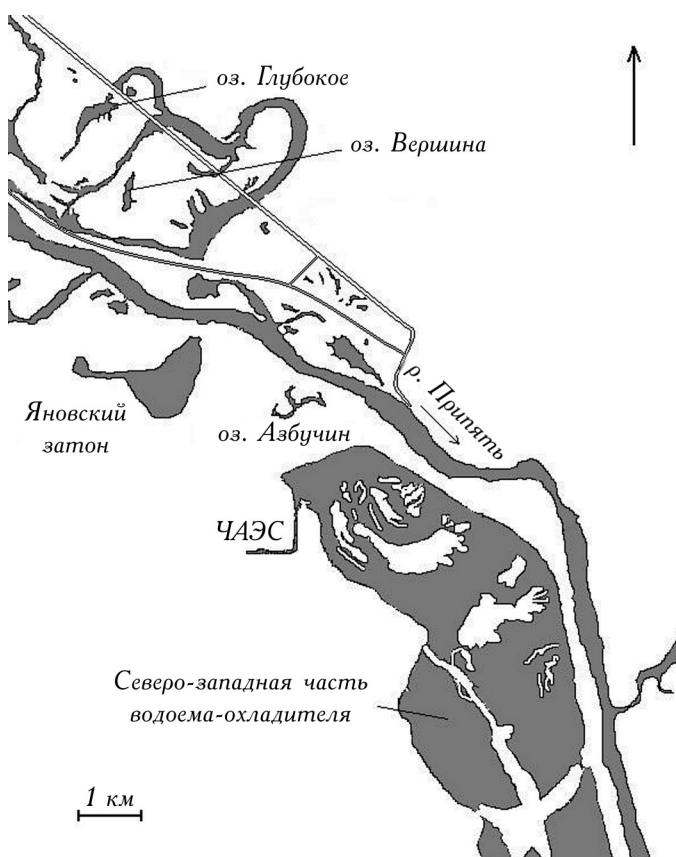
© А. Е. Каглян, Д. И. Гудков, С. И. Киреев, Л. П. Юрчук, Е. А. Гупало, 2019

сией по радиологической защите (ICRP) в качестве безопасного уровня радиационного воздействия на биоту предлагается использовать значения мощности поглощенной дозы в диапазоне 40—400 мкГр/ч [19, 23, 24]. При этом безопасным пороговым уровнем для позвоночных животных принято значение дозовой нагрузки 40 мкГр/час. В то же время в рамках проекта Европейской комиссии PROTECT (Protection of the Environment from Ionising Radiation in a Regulatory Context) величина безопасного порога облучения биоты была оценена методом анализа «распределения чувствительности видов» (SSD — species sensitivity distribution) [13]. Применение этого метода позволило определить нижнюю границу безопасного хронического облучения биоты (позвоночные, растения и беспозвоночные) на уровне 10 мкГр/ч. В качестве скрининговой мощности поглощенной дозы для позвоночных животных была рекомендована величина 2 мкГр/ч, которая предназначена для первичной оценки уровня безопасности биоты. Таким образом, если мощность поглощенной дозы для референтных представителей ихтиоценоза не превышает скринингового уровня, то радиационная ситуация является заведомо безопасной и не требует дальнейшего рассмотрения.

Главными задачами представленных исследований были анализ современных уровней радионуклидного загрязнения рыб различных экологических групп в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО); оценка дозовых нагрузок на представителей ихтиофауны за счет внешних и внутренних источников ионизирующего излучения; анализ влияния миграционного поведения различных видов рыб в условиях гетерогенного характера загрязнения радионуклидами донных отложений в различных экологических зонах водоемов на особенности формирования мощности поглощенной дозы; сопоставление уровней дозовых нагрузок на рыб ЧЗО с современными безопасными уровнями радиационного воздействия на позвоночных животных, предложенными международными организациями и структурами по нормированию, научному сопровождению и реализации мер радиационной защиты.

Материал и методика исследований. Исследования выполняли в период 2010—2018 гг. в водоемах ЧЗО — озерах Азбучин, Вершина, Глубоком, Яновском затоне, водоеме-охладителе (ВО) ЧАЭС и р. Припять в пределах ЧЗО (рис. 1). Ихтиологический материал для исследований отбирали в рамках регламента радиоэкологического мониторинга водных биоценозов ГСП «Экоцентр» ГАЗО Украины. Было проанализировано более 4500 экз. рыб, а также абиотические компоненты водных экосистем — вода и донные отложения. Анализ содержания радионуклидов в воде полигонных водоемов выполнен на основе сезонных отборов проб. Анализ удельной активности в донных отложениях выполняли для слоя 0—35 см.

Из хищных видов рыб исследовали сома европейского *Silurus glanis* L. (возраст 4—15 лет), щуку *Esox lucius* L. (1—11 лет), судака обыкновенного *Sander lucioperca* L. (3—9 лет), жереха обыкновенного *Aspius aspius* L. (2—9 лет) и окуня обыкновенного *Perca fluviatilis* L. (4—9 лет). Из «мирных» видов анализировали представителей эврифагов, склонных к хищничеству — голавля *Squalius cephalus* L. (4—10 лет) и чехонь *Pelecus cultratus* L. (2—8 лет); фитофагов — красноперку обыкновенную *Scardinius erythrophthalmus* L. (2—8 лет); зоопланктонофагов — синца *Ballerus ballerus* L. (3—9 лет) и уклейку *Alburnus alburnus* L. (2—4 года); бентофагов — карася серебряного *Carassius*



1. Карта-схема полигонных водоемов ЧЗО.

gibelio Bloch (2—12 лет), линя *Tinca tinca* L. (7—9 лет), лещ обыкновенного *Abramis brama* L. (возраст 2—9 лет), густеры *Blicca bjoerkna* L. (3—8 лет), сазана *Cyprinus carpio* L. (3—9 лет) и плотву *Rutilus rutilus* L. (4—7 лет). Классификация рыб по трофности приведена исходя из преобладающего для указанных возрастных групп согласно [4—6].

Определение удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях и рыбах выполняли на базе γ -спектрометрического комплекса в составе германий-литиевого детектора ДГДК-100В, амплитудного анализатора SBS-30, свинцовой пассивной защиты толщиной 5 см

(ПЯ А-1646, Латвия) и программного обеспечения «GreenStar» (РФ). Измерение содержания ^{137}Cs в воде и все измерения ^{90}Sr выполняли радиохимическими методами: в воде — с применением карбонатной, а в донных отложениях и рыбах — оксалатной методик с измерением на установке малого фона УМФ-2000 («Доза», РФ) дочернего продукта ^{90}Y [10], а для некоторых видов использовали методы [8, 9]. Погрешность измерений составляла 15—25%. Величины удельной активности радионуклидов в воде приведены в Бк/л, в донных отложениях — в Бк/кг воздушно-сухой массы, в рыбах — в Бк/кг массы при естественной влажности. Табличные данные приведены в виде диапазона минимальных и максимальных значений, а также стандартного (среднеквадратического) отклонения от среднего значения. Стандартное отклонение в полной мере характеризовало вариации выборки согласно [11]. Среднее количество рыб в годовой выборке для каждого вида составляло около 15 экземпляров.

Базовые расчеты мощности поглощенной дозы для рыб выполняли при помощи программного обеспечения ERICA Assessment Tool 1.0 [18]. При этом методика расчета мощности внешней дозы облучения была нами моди-

фицирована и выполнялась в несколько этапов, что позволило учесть изменения дозовой нагрузки, которую получают различные виды рыб во время сезонных, кормовых и нерестовых миграций в водоеме. Для этого на основе литературных и собственных данных [1, 3—7, 12, 14—17, 20—22] были проанализированы видовые особенности поведения рыб в водоеме, а также уровни радионуклидного загрязнения рыб и донных отложений различных экологических зон — зимовальных ям, прибрежных территорий, а также мест нереста и нагула рыб. Погрешность оценки дозы составляла 25—30%.

В рамках «Программы снятия с эксплуатации Чернобыльской АЭС», с ноября 2014 г. после прекращения подкачки воды в ВО из р. Припяти начался процесс естественного снижения уровня водоема, преимущественно за счет фильтрации воды через тело ограждающей дамбы. При этом уменьшение подпора вод ВО повлекло снижение уровня воды и в расположенных рядом водоемах, в частности в оз. Азбучин. В связи с тем, что изменение гидрологического режима ВО и оз. Азбучин, по всей вероятности, явилось причиной изменения процессов, влияющих на перераспределение радионуклидов в компонентах экосистем этих водоемов, в табличных материалах представлены усредненные концентрации радионуклидов для двух периодов — 2010—2014 гг. (до снижения уровня воды) и 2017—2018 гг. Приведенные для ВО данные относятся к наиболее изученной северо-западной части, являющейся в настоящее время изолированным водоемом.

Результаты исследований и их обсуждение

Дозовые нагрузки на рыб формируются за счет внешнего и внутреннего облучения — от радионуклидов, содержащихся, преимущественно, в донных отложениях и воде, а также инкорпорированных в тканях. Для оценки мощности поглощенной дозы годовой жизненный цикл рыб был условно разделен на четыре периода, в течение каждого из которых особое внимание уделялось пространственно-временной локализации рыбы относительно дна водоема. При этом учитывали удельную активность донных отложений в зимовальных ямах, местах подготовки к нересту, нагула и подготовки к зимовке. Таким образом, была рассчитана общая мощность поглощенной дозы для главных представителей ихтиоценозов водоемов ЧЗО с учетом сезонных миграций и видовых эколого-биологических особенностей. Диапазоны значений удельной активности радионуклидов в воде исследуемых водоемов представлены в таблице 1.

Поскольку удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях в пределах одного водоема существенно варьирует, нами были выполнены исследования радионуклидного загрязнения донных отложений в местах нереста, нагула рыб, а также в зимовальных ямах (табл. 2).

Так, в оз. Глубоком в зимовальных ямах средняя удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в слое донных отложений 0—35 см составляла, соответственно 94 000 и 1 117 900 Бк/кг, тогда, как в местах нереста на мелководье и прибрежной полосе эти величины были 2560 и 26 000 Бк/кг. В местах нагула удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в среднем была равна соответственно 20 059 и 200 380 Бк/кг.

1. Удельная активность радионуклидов в воде полигонных водоемов ЧЗО в 2010—2018 гг., Бк/л

Радио- нуклид	Оз. Глубокое	Оз. Вершина	Оз. Азбучин	Яновский затон	ВО ЧАЭС
⁹⁰ Sr	38,0 – 101,0	127,0 – 448,0	28,8 – 31,1 *	3,2 – 17,3	0,9 – 1,0 *
	58,1 ± 20,9	229,8 ± 59,3	27,1 ± 6,8	8,4 ± 1,7	0,9 ± 0,1
			152,8 – 252,4 **		2,4 – 2,9 **
			212,0 ± 56,6		2,5 ± 0,2
¹³⁷ Cs	1,3 – 6,3	1,2 – 10,5	3,6 – 8,3 *	0,6 – 1,2	0,4 – 1,2 *
	4,8 ± 1,1	2,4 ± 0,8	5,4 ± 2,2	0,9 ± 0,2	0,9 ± 0,2
			2,6 – 4,9 **		0,8 – 1,2 **
			3,4 ± 1,0		1,0 ± 0,2

П р и м е ч а н и е. Здесь и в табл. 2: над чертой — пределы колебаний, под чертой — среднее значение; здесь и в табл. 3: * до начала снижения уровня воды в ВО ЧАЭС (2010—2014 гг.); ** в 2017—2018 гг.

Результаты исследований радионуклидного загрязнения представителей ихтиофауны в водоемах ЧЗО с различным гидрологическим режимом свидетельствуют о том, что наибольшими величинами удельной активности радионуклидов характеризуются рыбы озерных экосистем: ⁹⁰Sr — 2030—148 570 Бк/кг; ¹³⁷Cs — 930—31 859 Бк/кг (табл. 3).

Несколько меньшие значения отмечены для рыб водоема с более высоким уровнем проточности — Яновского затона, отделенного от русловой части р. Припяти намывной дамбой: ⁹⁰Sr — 583—8220 Бк/кг; ¹³⁷Cs — 340—6040 Бк/кг. Минимальные значения содержания радионуклидов были зарегистрированы в рыбах речной экосистемы — р. Припяти в пределах ЧЗО: ⁹⁰Sr — 2—121 Бк/кг; ¹³⁷Cs — 5—293 Бк/кг.

Удельная активность радионуклидов в рыбе озер Глубокое, Вершина и Азбучин в период исследований во всех случаях многократно превышала допустимые уровни, согласно принятым в Украине нормативам для рыбной продукции [2] — в 58—4245 раз по ⁹⁰Sr и в 6—212 раз по ¹³⁷Cs. Наибольшие значения удельной активности ⁹⁰Sr отмеченные для карася оз. Вершина — 36 130—148 570 Бк/кг. В рыбах русловых участков р. Припяти в пределах ЧЗО за время исследований зарегистрированы случаи превышения допустимых уровней ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr как для «мирных», так и для хищных видов рыб.

Анализ данных, полученных за исследуемый период, свидетельствует о том, что удельная активность ¹³⁷Cs у представителей ихтиофауны практически всех водоемов ЧЗО продолжает закономерно снижаться с определенными колебаниями в пределах варьирования содержания радионуклида в различных выборках. Содержание ⁹⁰Sr у представителей ихтиофауны озер оставалось практически без изменений. Исключение составляют ВО и оз. Азбучин, в рыбах которых удельная активность ⁹⁰Sr имеет тенденцию к увеличению. На примере красноперки обыкновенной оз. Глубокое и

2. Удельная активность радионуклидов в донных отложениях различных экологических зон полигонных водоемов, Бк/кг

Водоемы	Зимовальные ямы	Нерестилища	Места нагула	
Оз. Глубокое	^{90}Sr	$20\ 100 - 124\ 000$ $94\ 000 \pm 23\ 500$	$170 - 5660$ 2560 ± 630	$1460 - 22\ 830$ $20\ 059 \pm 4800$
	^{137}Cs	$124\ 000 - 1\ 218\ 000$ $1\ 117\ 900 \pm 186\ 300$	$13\ 150 - 89\ 470$ $26\ 000 \pm 3700$	$13\ 150 - 359\ 800$ $200\ 380 \pm 28\ 600$
Оз. Вершина	^{90}Sr	$167\ 100 - 259\ 660$ $247\ 600 \pm 61\ 900$	$5280 - 15\ 970$ 8840 ± 1980	$6260 - 17\ 400$ $10\ 300 \pm 2570$
	^{137}Cs	$158\ 824 - 700\ 900$ $530\ 000 \pm 75\ 700$	$22\ 460 - 64\ 620$ $43\ 540 \pm 6200$	$42\ 050 - 59\ 970$ $52\ 450 \pm 7500$
Оз. Азбучин	^{90}Sr	$17\ 160 - 355\ 610$ $188\ 350 \pm 47\ 100$	$188 - 3940$ 2030 ± 510	$908 - 86\ 900$ $39\ 200 \pm 5500$
	^{137}Cs	$103\ 840 - 721\ 040$ $400\ 210 \pm 57\ 170$	$18\ 200 - 26\ 000$ $20\ 700 \pm 2960$	$17\ 940 - 78\ 780$ $48\ 360 \pm 6910$
ВО ЧАЭС	^{90}Sr	$5374 - 96\ 250$ $86\ 250 \pm 21\ 560$	$70 - 1440$ 700 ± 150	$577 - 21\ 400$ 1430 ± 350
	^{137}Cs	$41\ 760 - 386\ 760$ $286\ 760 \pm 40\ 960$	$2181 - 24\ 950$ $12\ 980 \pm 1850$	$7600 - 21\ 420$ $18\ 900 \pm 2650$
Яновский загон	^{90}Sr	$11\ 100 - 34\ 480$ $19\ 700 \pm 4930$	$108 - 1876$ 1230 ± 300	$370 - 11\ 917$ 1320 ± 330
	^{137}Cs	$69\ 660 - 171\ 470$ $109\ 300 \pm 15\ 610$	$3830 - 32\ 860$ $24\ 380 \pm 4060$	$8460 - 36\ 500$ $24\ 390 \pm 3480$

3. Удельная активность радионуклидов в рыбах полигонных водоемов ЧЗО, Бк/кг

Водоемы	Вид	^{90}Sr	^{137}Cs
Оз. Глубокое (2010—2018 гг.)	Красноперка	11 015—20 760 (15 330 ± 2664)	1018—31 859 (5859 ± 2873)
	Плотва	10 570—16 310 (12 390 ± 1600)	1594—3820 (2650 ± 546)
	Карась	13 260—20 140 (17 220 ± 3094)	2175—8390 (3450 ± 429)
	Линь	7370—11 422 (9790 ± 1384)	1460—2759 (1984 ± 559)
	Окунь	6460—15 750 (9620 ± 2012)	3800—22 044 (7870 ± 2522)
	Щука	5310—8710 (7860 ± 1078)	3340—18 035 (5430 ± 1479)
Оз. Азбучин (2010—2014 гг.)	Карась	5980—19 348 (10 284 ± 2659)	2072—5759 (4430 ± 359)
	Линь	4050—4840 (4410 ± 328)	2860—3580 (3350 ± 300)
	Окунь	2030—2440 (2230 ± 159)	4620—5600 (5100 ± 484)
	Щука	2960—9460 (6500 ± 2170)	5690—7720 (6510 ± 794)
	Карась	36 130—148 570 (79 870 ± 27 900)	930—25 907 (4650 ± 2684)
	Красноперка	118—295 (210 ± 59)	610—2025 (1030 ± 360)
ВО ЧАЭС (2010—2014 гг.)	Плотва	40—180 (110 ± 27)	890—2330 (1322 ± 218)
	Карась	86—140 (90 ± 25)	1530—1570 (1550 ± 250)
	Густера	67—140 (93 ± 27)	683—1317 (984 ± 218)
	Лещ	95—150 (120 ± 28)	540—1045 (900 ± 259)
	Сазан	68—78 (73 ± 15)	995—1231 (1100 ± 200)
	Окунь	60—160 (115 ± 49)	2460—10 900 (6650 ± 826)
Судак	60—77 (65 ± 9)	3183—11 270 (5860 ± 2700)	

Продолжение табл. 3

Водоемы	Вид	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
ВО ЧАЭС (2017—2018 гг.)	Сом	40—359 (159 ± 100)	1740—2474 (2100 ± 337)
	Жерех	130—175 (140 ± 33)	2340—6640 (4400 ± 1760)
	Голавль	127—160 (150 ± 15)	1259—1400 (1310 ± 47)
	Красноперка	465—959 (760 ± 114)	790—1072 (905 ± 36)
	Плотва	180—438 (329 ± 95)	670—1341 (960 ± 194)
	Карась	420—775 (634 ± 117)	984—1826 (1440 ± 130)
	Линь	100—120 (115 ± 15)	1000—1190 (1100 ± 134)
	Лещ	170—190 (171 ± 16)	500—1000 (850 ± 217)
	Сазан	312—1243 (777 ± 101)	530—831 (684 ± 121)
	Уклея	584—839 (721 ± 84)	1213—1760 (1577 ± 191)
	Окунь	130—350 (235 ± 59)	2060—5070 (3177 ± 319)
	Судак	117—298 (227 ± 41)	1684—4884 (2240 ± 364)
	Сом	70—338 (207 ± 84)	2159—4359 (2993 ± 501)
Яновский затон (2010—2018 гг.)	Чехонь	170—184 (181 ± 7)	1407—1659 (1529 ± 122)
	Голавль	200—300 (250 ± 67)	1000—1750 (1380 ± 520)
	Щука	50—65 (60 ± 11)	2770—3083 (2959 ± 220)
	Красноперка	1740—4580 (3260 ± 710)	580—3400 (1110 ± 450)
	Плотва	1520—3784 (2300 ± 600)	440—2210 (804 ± 290)
Густера	1745—2029 (1890 ± 140)	474—820 (501 ± 25)	

Продолжение табл. 3

Водоёмы	Вид	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
	Лещ	1004—1384 (1450 ± 245)	340—579 (390 ± 90)
	Синец	869—2473 (1260 ± 545)	518—969 (750 ± 180)
	Уклея	860—1560 (1240 ± 310)	910—1500 (1170 ± 240)
	Окунь	620—8220 (1460 ± 848)	1030—6040 (2684 ± 1186)
	Судак	583—1198 (920 ± 250)	1816—3383 (2610 ± 670)
	Сом	626—722 (670 ± 48)	1210—1780 (1530 ± 290)
	Жерех	1059—2183 (1540 ± 410)	1202—2484 (1800 ± 383)
	Щука	830—1940 (1390 ± 534)	1550—2590 (2130 ± 554)
	Чехонь	760—1683 (860 ± 400)	1260—2670 (1250 ± 700)

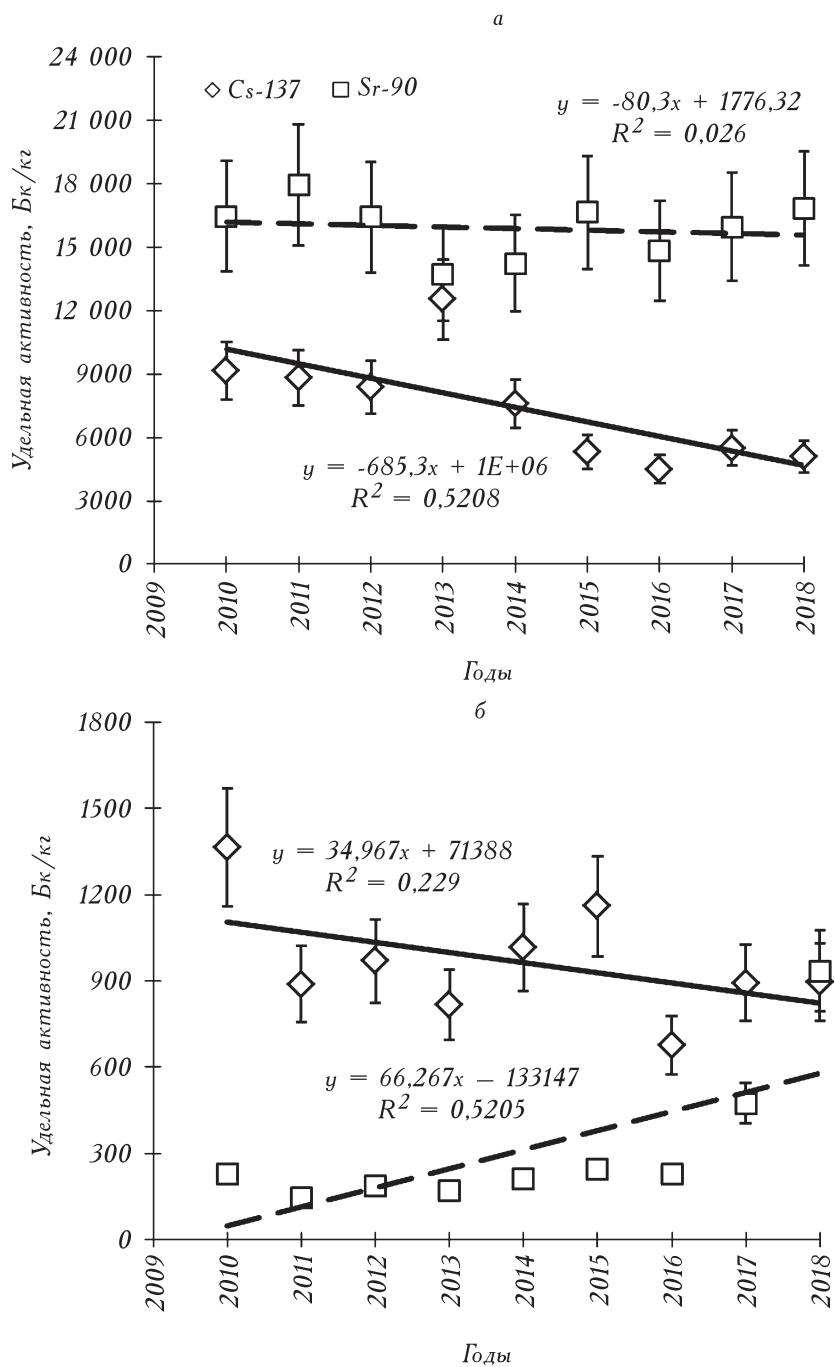
Примечание. В скобках — среднее значение.

ВО ЧАЭС (рис. 2) приведена динамика среднегодовой удельной активности радионуклидов в период 2010—2018 гг.

В ноябре 2014 г. после прекращения водоснабжения ВО началось снижение уровня воды также и в расположенном на расстоянии 400—500 м оз. Азбучин, имеющего гидравлическую связь с ВО. Предполагается, что снижение уровня воды в ВО и оз. Азбучин привело к изменению гидрохимического режима обоих водоемов, а также ремобилизации ⁹⁰Sr в донных отложениях и на осушенных территориях. Во всяком случае, в течение последних лет наблюдается увеличение удельной активности радионуклида в воде ВО (до 2—2,5 раза) и оз. Азбучин (до 7—8 раз), что привело к росту содержания радионуклида в рыбах и, соответственно, к увеличению внутренней дозы облучения в озере и водоемах, формирующихся на бывшей акватории ВО.

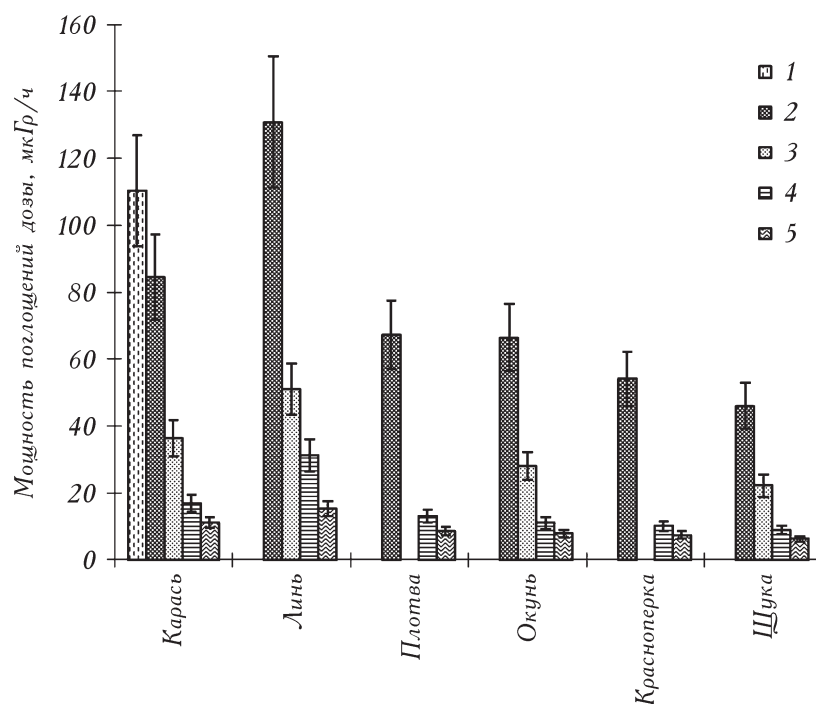
В настоящее время содержание ⁹⁰Sr у «мирных» видов рыб непроточных водоемов ЧЗО (за исключением рыб ВО) превышает содержание ¹³⁷Cs в 2—8 раз, а в некоторых случаях — в 15 и более раз. Для хищных видов этот показатель составляет не более 2, поскольку ассимиляция ⁹⁰Sr, находящегося в объектах питания преимущественно в плохо перевариваемых внутренних и покровных костных тканях, происходит не так эффективно, как ¹³⁷Cs.

Результаты расчета годовой мощности поглощенной дозы для рыб в водоемах ЧЗО приведены в таблице 4. Ряд уменьшения средних показателей мощ-



2. Динамика среднегодовой удельной активности радионуклидов у красноперки оз. Глубокого (а) и ВО ЧАЭС (б).

ности поглощенной дозы для различных видов на примере рыб ВО ЧАЭС выглядит следующим образом (мкГр/ч): линь ($31,3 \pm 7,8$) > сом европейский



3. Усредненная мощность поглощенной дозы для рыб ЧЗО за исследуемый период: 1 — оз. Вершина; 2 — оз. Глубокое; 3 — оз. Азбучин; 4 — ВО ЧАЭС; 5 — Яновский затон.

(22,6 ± 5,7) > карась (17,0 ± 4,3) > плотва (13,0 ± 3,2) > окунь (10,9 ± 2,7) > красноперка (10,0 ± 2,4) > синец (9,1 ± 2,3) > щука (8,8 ± 2,2) > уклея (6,0 ± 1,4). Таким образом, в первую тройку видов, получающих максимальные дозы облучения, входят рыбы, ведущие придонный образ жизни — линь, карась и сом европейский (рис. 3).

Мощность внешней поглощенной дозы за счет ^{90}Sr , содержащегося в воде и донных отложениях водоемов ЧЗО, составляет для рыб всего 0,02—1,18, а за счет ^{137}Cs — 1,32—124,57 мкГр/ч. Расчеты показали, что вклад ^{137}Cs во внешнюю дозу облучения для рыб исследуемых водоемов составляет 96,2—99,8%, а ^{90}Sr — 0,3—3,8% (табл. 5) Таким образом, главным радионуклидом, обуславливающим внешнее облучение рыб в водоемах ЧЗО, является ^{137}Cs .

Мощность поглощенной дозы для рыб ЧЗО в течение основных жизненных циклов может отличаться в 2—45 раз, преимущественно за счет различной интенсивности внешнего облучения от донных отложений. Минимальную дозу практически все виды рыб исследованных водоемов получают в периоды нереста и нагула, проходящих в литоральной зоне водных объектов (0,86—14,07% общей годовой дозы облучения), что объясняется сравнительно невысокой удельной активностью главных дозообразующих радионуклидов в прибрежных донных отложениях, а также непродолжительностью нерестового периода (рис. 4).

4. Мощность поглощенной дозы для рыб полигонных водоемов ЧЗО, Гр/год

Виды	Оз. Глубокое	Оз. Азбучин	Яновский затон	ВО ЧАЭС	Оз. Вершина
Линь	1,15 ± 0,28	0,46 ± 0,11	0,13 ± 0,03	0,27 ± 0,07	×
Карась	0,74 ± 0,18	0,32 ± 0,08	0,10 ± 0,03	0,15 ± 0,04	0,97 ± 0,24
Плотва	0,59 ± 0,15	×	0,07 ± 0,01	0,11 ± 0,03	×
Красноперка	0,47 ± 0,12	×	0,06 ± 0,01	0,09 ± 0,02	×
Синец	×	×	0,05 ± 0,01	0,08 ± 0,02	×
Уклея	×	×	0,02 ± 0,005	0,05 ± 0,01	×
Окунь	0,58 ± 0,14	0,24 ± 0,07	0,07 ± 0,01	0,10 ± 0,02	×
Щука	0,40 ± 0,11	0,19 ± 0,04	0,05 ± 0,01	0,08 ± 0,02	×
Сом	×	×	0,10 ± 0,2	0,20 ± 0,05	×

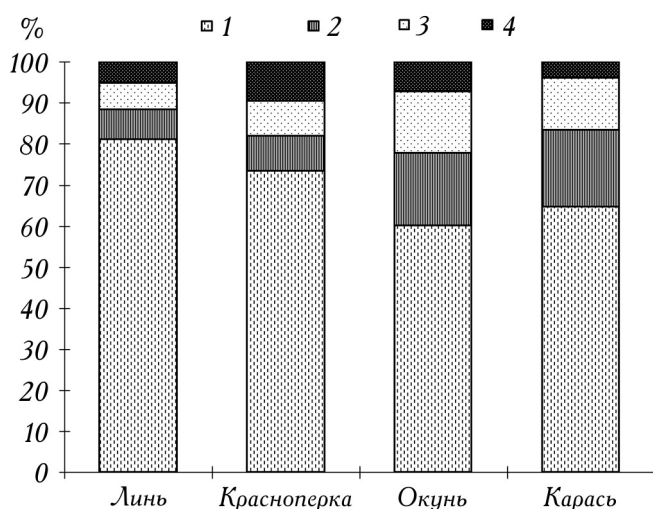
Примечание. Здесь и в табл. 5, 6: «×» — не определяли в связи с отсутствием или малочисленностью вида в водоеме.

5. Вклад ^{90}Sr и ^{137}Cs в мощность внешней поглощенной дозы для рыб ЧЗО, %

Виды	Оз. Глубокое		Оз. Азбучин		Яновский затон		ВО ЧАЭС	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Линь	0,65	99,35	2,37	97,63	3,79	96,21	1,64	98,36
Карась	0,72	99,28	2,11	97,89	0,74	99,26	1,03	98,97
Плотва	1,37	98,63	×	×	1,95	98,05	2,50	97,50
Красноперка	1,23	99,77	×	×	2,02	97,98	2,71	97,29
Уклея	×	×	×	×	1,49	98,51	2,19	97,81
Окунь	0,91	99,09	3,70	96,30	1,91	98,09	2,38	97,62
Щука	0,34	99,66	1,82	98,18	0,66	99,34	0,76	99,24
Сом	×	×	×	×	0,30	99,70	0,46	99,54

Посленерестовый и нагульный периоды приходятся на теплое время года и связаны с миграцией рыб в более глубоководные зоны с повышенным уровнем внешнего облучения, поэтому вклад в дозу, которую рыбы получают в течение этих периодов, более значителен и составляет 1,8—35,0%. На холодные осенние месяцы, проводимые рыбами на глубине, приходится 1,96—29,89% годовой дозы облучения, а в зимний период, когда подавляющее большинство представителей ихтиофауны находится в зимовальных ямах или вблизи дна, рыбы получают максимальные дозы облучения — до 43,0—92,0%.

Таким образом, в зависимости от экологической ниши, занимаемой различными видами рыб в водоеме, дозовые нагрузки могут различаться в 2,9—6,5 раз. Так линь, который практически весь жизненный цикл проводит



4. Формирование внешней дозы облучения для различных видов рыб оз. Глубокого на протяжении основных жизненных циклов: 1 — зимовка; 2 — предзимовальный период; 3 — нагул; 4 — нерест.

вблизи донных отложений, а поздней осенью зарывается глубоко в ил на весь зимний период, получает среднегодовую дозу в 5—7 раз выше по сравнению с пелагической уклейей.

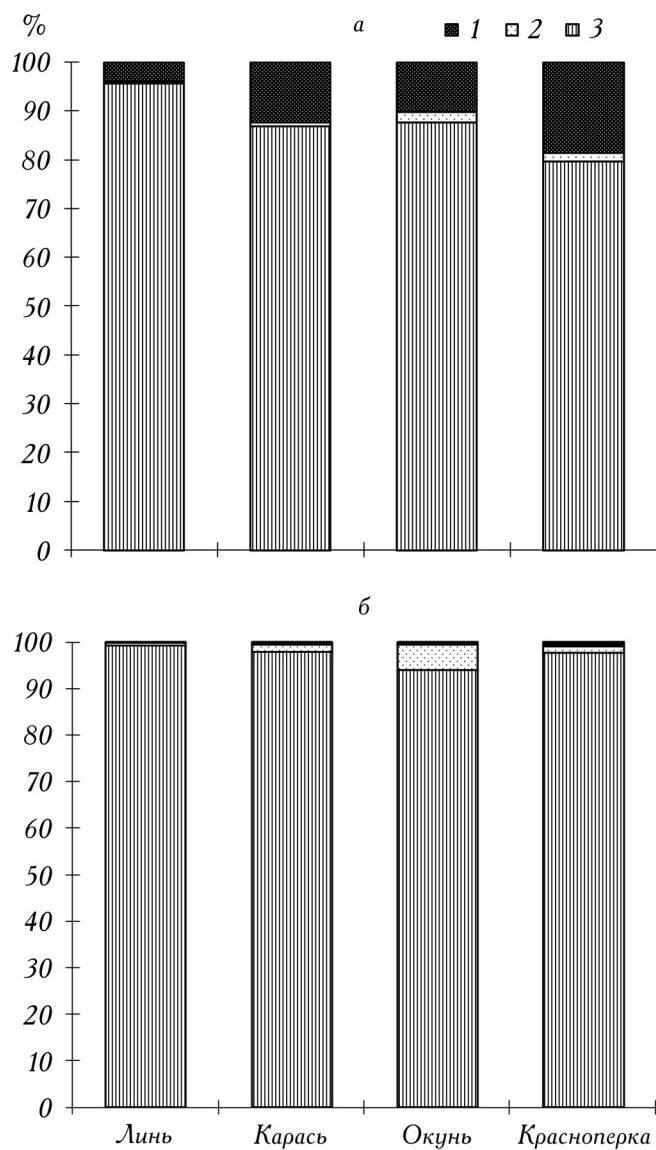
Вклад внутренней дозы для рыб замкнутых и условно непроточных водоемов в общую дозу облучения составляет 3—21% (рис. 5, а). Исключение составляет оз. Вершина, в котором вклад внутренней дозы в общую мощность поглощенной дозы, за счет аномально

высоких концентраций ^{90}Sr , инкорпорированного в тканях рыб (карась серебряный), составлял более 50% (55,4 мкГр/ч при общей дозе 110,3 мкГр/ч).

В целом вклад инкорпорированного ^{90}Sr во внутреннюю дозу облучения у исследованных видов рыб закрытых и условно непроточных водоемов составляет 55,1—95,5% мощности внутренней поглощенной дозы (табл. 6). Несколько иная ситуация наблюдается для представителей ихтиофауны ВО, в котором до 2014 г. происходил достаточно интенсивный водообмен, препятствующий увеличению активности ^{90}Sr в водных массах при его поступлении с территории водосбора и переходе из донных отложений. Гидрологические факторы, а также особенности загрязнения экосистемы ВО в период активной фазы аварии на ЧАЭС ^{137}Cs и специфический гидрохимический режим обуславливали крайне невысокую удельную активность ^{90}Sr в рыбах ВО до 2015 г. по сравнению с непроточными водоемами ЧЗО [1, 16].

На рисунке 5 (б) показано, что вклад внутренней дозы, получаемой рыбами ВО ЧАЭС от инкорпорированных радионуклидов, в общую дозу облучения сравнительно невысок и обусловлен преимущественно инкорпорированным ^{137}Cs . Долевое участие ^{90}Sr во внутреннюю дозу облучения рыб ВО составляет 6,04—45,6% общей внутренней дозы у исследованных рыб водоема (табл. 6). Однако, с 2016 г. удельная активность ^{90}Sr в рыбах ВО начала возрастать (особенно у представителей мирных видов), увеличив в 2018 г. вклад радионуклида во внутреннюю дозу облучения в 1,1—1,9 раза.

Расчет доз облучения рыб на базе программного обеспечения ERICA Assessment Tool 1.0 с использованием модифицированной поэтапной методики, включающей изменения дозовой нагрузки для рыб во время сезонных, кормовых и нерестовых миграций в водоеме, показал, что в результате уче-



5. Основные составляющие дозовой нагрузки для рыб оз. Глубокое (а) и ВО ЧАЭС (б): 1 — внутренняя доза от инкорпорированного ^{90}Sr ; 2 — внутренняя доза от инкорпорированного ^{137}Cs ; 3 — внешняя доза.

та видовых особенностей поведения рыб и уровней радионуклидного загрязнения донных отложений различных экологических зон водоемов (зимовальных ям, прибрежных территорий, мест нагула и нереста), внешняя доза облучения для бентосоядных рыб может возрастать в 1,2—1,7, а для рыб, ведущих преимущественно пелагический образ жизни, — в 2,0—2,5 раза по сравнению со стандартными методами расчета.

6. Вклад инкорпорированных радионуклидов в мощность внутренней дозы облучения рыб ЧЗО, мкГр/ч (%)

Виды	Оз. Глубокое		Оз. Азбучин		Яновский затон		ВО ЧАЭС (2010—2014 гг.)	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Линь	4,9 (90,6)	0,5 (9,4)	2,6 (79,5)	0,7 (20,5)	0,8 (85,6)	0,1 (14,4)	0,06 (23,0)	0,21 (77,0)
Карась	10,4 (94,6)	0,6 (5,4)	4,0 (88,6)	0,5 (11,4)	1,5 (90,1)	0,2 (9,9)	0,09 (23,8)	0,28 (76,2)
Плотва	7,6 (95,5)	0,4 (4,5)	×	×	1,4 (90,9)	0,1 (9,1)	0,07 (26,5)	0,20 (73,5)
Красноперка	10,1 (91,8)	0,9 (8,2)	×	×	2,6 (89,6)	0,3 (10,4)	0,10 (43,7)	0,13 (56,3)
Уклея	×	×	×	×	0,8 (78,1)	0,2 (21,9)	0,32 (45,7)	0,38 (54,3)
Окунь	6,7 (82,0)	1,5 (18,0)	1,4 (61,4)	0,9 (38,6)	1,0 (65,8)	0,5 (34,2)	0,06 (8,5)	0,60 (91,5)
Щука	3,6 (77,1)	1,1 (22,9)	2,3 (65,7)	1,2 (34,3)	1,1 (67,9)	0,5 (32,1)	0,04 (6,4)	0,59 (93,6)
Сом	×	×	×	×	0,4 (55,1)	0,4 (44,9)	0,13 (21,3)	0,48 (78,7)

Заключение

В результате выполненных исследований представителей ихтиофауны в водоемах ЧЗО с различными уровнями радионуклидного загрязнения и гидрологическим режимом в период 2010—2018 гг. наибольшие уровни удельной активности основных дозообразующих радионуклидов отмечены для рыб озер Азбучин, Вершина и Глубокое: ⁹⁰Sr — 2030—148 570 (15 959 ± 4384) Бк/кг; ¹³⁷Cs — 930—31 859 (4660 ± 1715) Бк/кг. В Яновском затоне содержание ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в рыбах находилось, соответственно, в пределах 583—8220 (1520 ± 704) и 340—6040 (1395 ± 774) Бк/кг. На примере северо-западной части ВО ЧАЭС (с 2015 г. является отдельным водоемом) установлено, что удельная активность ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в рыбах в период 2010—2014 гг. была, соответственно, 40—359 (119 ± 42) и 540—11 270 (2473 ± 1122) Бк/кг. Снижение уровня воды в ВО повлекло увеличение содержания ⁹⁰Sr в рыбах, достигшее к 2018 г. значений 50—1243 (494 ± 84) Бк/кг; при этом удельная активность ¹³⁷Cs была на уровне 500—5073 (1865 ± 960) Бк/кг. Наименьшее содержание радионуклидов среди исследованных водных объектов отмечено для рыб р. Припяти в пределах ЧЗО: ⁹⁰Sr — 2—121 (33 ± 29) Бк/кг; ¹³⁷Cs — 5—293 (71 ± 65) Бк/кг.

«Мирные» виды рыб исследованных озер ЧЗО характеризовались удельной активностью ⁹⁰Sr в пределах 4050—148 570 (21 328 ± 5753), а ¹³⁷Cs — 1018—31 859 (3749 ± 1370) Бк/кг, в то время как в хищных рыбах содержание ⁹⁰Sr было 2030—15 750 (7994 ± 1560), а ¹³⁷Cs — 3340—22044 (6228 ± 1249) Бк/кг. Удельная активность ⁹⁰Sr в рыбах Яновского затона не превышала для «мирных»

видов 860—4580 (1900 ± 783), а для хищных — 583—8220 (1140 ± 367) Бк/кг; содержание ^{137}Cs в мирных видах и рыбах-ихтиофагах находилось, соответственно, в пределах 340—3400 (784 ± 314) и 1030—6040 (2001 ± 580) Бк/кг. Таким образом, удельная активность ^{90}Sr у «мирных» видов рыб условно непроточных водоемов ЧЗО была в 1,6—1,7 раз выше, чем у хищных, в то время как ^{137}Cs — в 2,5—2,6 раз ниже. Среди исследованных рыб ЧЗО наибольшее содержание ^{90}Sr отмечено для красноперки и карася. Различные виды рыб по убыванию средней удельной активности ^{90}Sr в водоемах ЧЗО формируют следующий ряд: карась > красноперка > плотва > линь > лещ > укля > жерех > окунь > щука > судак > сом, а по убыванию ^{137}Cs — окунь > судак > щука > жерех > сом > укля > красноперка > плотва > лещ.

Удельная активность ^{137}Cs в рыбах практически всех водоемов ЧЗО в период исследований продолжала закономерно снижаться с колебаниями в пределах варьирования для различных выборок. Уровень содержания ^{90}Sr у представителей ихтиофауны озер оставался практически на одном уровне. Исключение составили гидравлически связанные ВО ЧАЭС и оз. Азбучин, в рыбах которых удельная активность ^{90}Sr имеет тенденцию к увеличению, что обусловлено, в первую очередь, увеличением активности радионуклида в воде этих водоемов в результате прекращения подпитки ВО и снижения уровня воды.

Удельная активность радионуклидов в рыбе озер Глубокое, Вершина и Азбучин в период исследований во всех случаях многократно превышала допустимые уровни, согласно принятым в Украине нормативам для рыбной продукции — в 58—4245 раз по ^{90}Sr и в 6—212 раз по ^{137}Cs . Превышение допустимых уровней в рыбах Яновского затона по ^{90}Sr наблюдалось в 16—235 и ^{137}Cs — в 2—40 раз, а в представителях ихтиофауны ВО (на 2017—2018 гг.) по ^{90}Sr и ^{137}Cs — соответственно в 1,4—35,5 и 3,3—33,8 раз. В рыбах русловых участков р. Припяти в пределах ЧЗО наблюдали случаи превышения допустимых уровней ^{137}Cs в 1,2—2,0 раз, а ^{90}Sr — в 1,1—3,5 раз как для «мирных», так и хищных видов.

Максимальные дозы ионизирующего излучения в водоемах ЧЗО получают рыбы, ведущие придонный образ жизни — линь, карась и сом европейский, а минимальные — пелагические виды — укля и чехонь. Среди исследованных водоемов наибольшая мощность поглощенной дозы отмечена в озерах Вершина, Глубокое, Азбучин для линя (53,1—130,8 мкГр/ч) и карася (36,3—110,4 мкГр/ч). Для рыб Яновского затона и ВО ЧАЭС мощность поглощенной дозы была, соответственно, 2,30—15,21 и 6,04—31,30 мкГр/ч. Представители ихтиофауны русловой части р. Припяти характеризовались величинами дозовой нагрузки в пределах 0,06—0,13 мкГр/ч.

Внешнее облучение рыб в водоемах ЧЗО обусловлено преимущественно депонированным в донных отложениях водоемов ^{137}Cs , вклад которого в общую мощность поглощенной дозы для рыб исследованных озер и Яновского затона составил 63,5—95,6%, а для рыб ВО ЧАЭС эта величина была близка к 100%. Некоторым исключением являются рыбы оз. Вершина, для которых вклад внешней дозы облучения, за счет аномально высоких концентраций инкорпорированного ^{90}Sr в костных тканях, был менее 50% общей мощности поглощенной дозы. Вклад внешнего облучения, которое получают рыбы в зимовальных ямах замкнутых и условно непроточных водоемов ЧЗО в холодный период составляет 43,0—92,0% общей годовой дозы.

Основным радионуклидом, формирующим внутреннюю дозу облучения большинства представителей ихтиофауны замкнутых и условно непроточных водоемов ЧЗО, является ^{90}Sr . Внутренняя годовая доза облучения рыб от инкорпорированного ^{90}Sr составляет 61—96% общей внутренней дозы облучения рыб. Для «мирных» видов рыб ВО вклад ^{90}Sr во внутреннюю дозу облучения, в связи со снижением уровня воды и ростом удельной активности радионуклида в «мирных» видах рыб, увеличился с 23—46% в период 2010—2015 гг. до 52—79% в 2018 г., а для хищных видов, соответственно — с 6—21 до 22—27%.

Зарегистрированные современные уровни мощности поглощенной дозы для рыб замкнутых и условно непроточных водоемов ЧЗО существенно превышают безопасные пороговые уровни для позвоночных животных, предложенные Научным комитетом по действию атомной радиации, Международной комиссией по радиологической защите, а также в рамках проекта Европейской комиссией PROTTECT. Дозовые нагрузки, которые испытывают представители ихтиофауны в водоемах ЧЗО, могут оказывать негативное влияние на различные уровни организации биосистем, включая функции воспроизводства, и отражаться на общем состоянии популяции рыб в загрязненных радионуклидами водных экосистемах.

Существует необходимость более тщательной оценки дозовых нагрузок на рыб в водоемах ЧЗО, учитывающей уровни накопления радионуклидов различными органами и тканями, характеризующимися различной радиочувствительностью. Необходимой также является оценка не только текущей мощности поглощенной дозы для половозрелых особей, но и дозы, полученные рыбами в течение всей жизни, с уделением особого внимания наиболее чувствительным ранним стадиям — гамето- и эмбриогенезу. Немаловажной, с нашей точки зрения, является также реконструкция дозовых нагрузок, которым подверглись предыдущие поколения рыб в первые месяцы и годы после аварии на ЧАЭС, и которые были в десятки и сотни раз выше по сравнению с текущими.

Актуальным является выполнение комплексных радиобиологических исследований, связанных с изучением дозозависимых, радиационных эффектов у рыб ЧЗО, как одного из наиболее радиочувствительных компонентов гидробиоценозов. Выполнение таких исследований, с одной стороны, способствует расширению наших знаний о влиянии ионизирующего излучения на гидробионтов, а с другой — является необходимой составляющей научных основ защиты окружающей среды от ионизирующего излучения и развития методологии анализа экологического риска для водных организмов, обитающих в условиях хронического радиационного воздействия.

**

Наведено результати оцінки рівня радіонуклідного забруднення та потужності поглиненої дози опромінення для рыб у водоймах Чорнобильської зони відчуження впродовж 2010—2018 рр. Вміст ^{137}Cs у представників іхтіофауни замкнених водойм у період досліджень продовжував знижуватись, в той час як питома активність ^{90}Sr залишався без змін або збільшувалась. При оцінці дозових навантажень застосовано модифікований підхід на основі програмного забезпечення ERICA Assessment Tool, який враховує міграційну активність рыб і гетерогенний характер радіонуклідного забруднення донних відкладів у водоймі. Найбільша річна доза опромінення (до 1, 2 Гр) виявлена для придонних видів рыб. Питома активність ^{90}Sr і

¹³⁷Cs у рибах замкнених водойм у десятки і тисячі разів перевищує прийняті в Україні допустимі рівні для рибної продукції.

**

The results of assessing the levels of radionuclide contamination and the absorbed dose rate for fish of the Chernobyl Exclusion Zone in the period 2010—2018 are presented. The content of ¹³⁷Cs in representatives of the ichthyofauna of closed water bodies during the study period continued to decrease, while the specific activity of ⁹⁰Sr remained unchanged or increased. In assessing the radiation dose rate on fish, a modified approach was applied based on the software ERICA Assessment Tool, which takes into account the migration activity of fish and heterogeneity of radioactive contamination of bottom sediments in the water bodies. The highest annual radiation dose (up to 1,2 Gy) is noted for bottom fish species. The specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in fish of closed reservoirs is tens and thousands of times higher than the accepted levels for fish products in Ukraine.

**

1. Гудков Д.И., Кагрян А.Е., Куреев С.И. и др. Основные дозообразующие радионуклиды в рыбе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиозэкология. — 2008. — Т. 48, № 1. — С. 48—58.
2. Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у продуктах харчування та питній воді (ДР-97). — К., 1997. — 38 с.
3. Кузьменко М.И. Реакции гидробионтов на ионизирующее облучение // Гидробиол. журн. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 3—16.
4. Мовчан Ю.В. Риби. Сомові // Фауна України — К.: Наук. думка, 1988. — Т. 8, вип. 3. — 368 с.
5. Мовчан Ю.В. Риби України. — К., 2011. — 420 с.
6. Мовчан Ю.В., Смірнов А.І. Риби. Коропові // Фауна України. — К.: Наук. думка, 1983. — Вип. 2. — Т. 8, Ч. 2. — 354 с.
7. Никольський Г.В. Экология рыб. — М.: Высш. шк., 1979. — 368 с.
8. Патент на корисну модель UA №107060 U Україна, МПК G01T 1/169 (2006.01), G01T 1/16 (2006.01), G01N 33/12 (2006.01). Експрес-метод визначення розподілу питомої активності радіонуклідів по органах та тканинах деяких видів коропових риб за їх вмістом у лусці / Кагрян О.Є., Гудков Д.І., Кленус В.Г. та ін. // Бюлетень — 25.05.2016. — № 10.
9. Патент на корисну модель UA №129994 U Україна, МПК G01T 1/169 (2006.01), G01T 1/16 (2006.01), G01N 33/12 (2006.01). Експрес-метод визначення питомої активності ¹³⁷Cs у представників іхтіофауни прісних водойм за його вмістом у окуні звичайному (*Perca fluviatilis* L.) / Кагрян О.Є., Гудков Д.І., Юрчук Л.П., Гупало О.О. // Бюлетень — 11.03.2019. — № 5.
10. Практикум по ветеринарній радиобіології / Под ред. А. Д. Белова. — М.: Агропромиздат, 1988. — 236 с.
11. Рокицкий П.Ф. Биологическая статистика. — Минск: Вышэйш. шк. — 1973. — 320 с.
12. Рябов И.Н. Радиозэкологія рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. — М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2004. — 416 с.
13. Andersson P., Garnier-Laplace J., Beresford N.A. et al. Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context (PROTECT): propo-

- sed numerical benchmark values // J. Environ. Radioactivity. — 2009. — Vol. 100. — P. 1100—1108.
14. *Belyaev V.V., Volkova Ye.N.* Mechanisms of forming of seasonal variations of ^{90}Sr and ^{137}Cs content in freshwater fishes // Hydrobiol. J. — Vol. 49, N 5. — 2013. — P. 81—89.
 15. *Belyaev V.V., Volkova Ye.N., Parkhomenko A.A. et al.* Dynamics of radiation dose formation of freshwater fishes after one-time intake of ^{90}Sr and ^{137}Cs into a water body // Ibid. — Vol. 51, N 1. — 2015. — P. 98—105.
 16. *Gudkov D.I., Kaglyan A.Ye., Nazarov A.B., Klenus V.G.* Dynamics of the Content and Distribution of the Main Dose Forming Radionuclides in Fishes of the Exclusion Zone of the Chernobyl NPS // Ibid. — 2008. — Vol. 44, N 5. — P. 87—104.
 17. *Gudkov D.I., Shevtsova N.L., Pomortseva N.L. et al.* Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone // J. Environ. Radioactivity. — 2016. — N 151. — P. 438—448.
 18. *ERICA Assessment Tool 1.0.* The integrated approach seeks to combine exposure/dose/effect assessment with risk characterization and managerial considerations (<http://www.ERICA-tool.com>).
 19. *International Commission on Radiological Protection (ICRP).* Publication 108. Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants // Annals of the ICRP. — 2008. — Vol. 38, N 4—6. — 251 p.
 20. *Kaglyan O.Ye., Gudkov D.I., Klenus V.G. et al.* Strontium-90 in fish from the lakes of the Chernobyl Exclusion Zone // Radioprotection — 2009. — Vol. 44, N 5. — C. 945—949.
 21. *Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Klenus V.G. et al.* Radionuclides in fish of the Chernobyl exclusion zone: species-specificity, seasonality, size- and age-dependent features of accumulation // Radiation & Applications (RAD Association Journal). — 2016. — Vol. 1, Iss. 2. — P. 111—114.
 22. *Lerebours A., Gudkov D., Nagorskaya L. et al.* Impact of environmental radiation on the health and reproductive status of fish from Chernobyl // Environ. Sci. & Technol. — 2018. — Vol. 52 (16). — P. 9442—9450.
 23. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.* UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly with Scientific Annex. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Annex: Effects of radiation on the environment. — New York: United Nations, 1996. — 86 p.
 24. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.* UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E: Effect of ionizing radiation on non-human biota. — New York: United Nations, 2011. — 164 p.

¹ Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

² Государственное специализированное предприятие «Экоцентр» Государственного агентства Украины по управлению зоной отчуждения, Чернобыль

Поступила 03.04.19