



УДК [577.34:597.08:621.31](28)(477)

© 2007

Д. И. Гудков, А. Е. Каглян, А. Б. Назаров, В. Г. Кленус

Радионуклиды в рыбе Зоны отчуждения Чернобыльской АЭС

(Представлено академиком НАН Украины В. Д. Романенко)

The results of researches of the species-specificity, accumulation dynamics, and distribution of ^{90}Sr , ^{137}Cs , and transuranic elements in fish of the Chernobyl NPP exclusion zone are analyzed. For fish of lakes of the left-bank floodplain of the Pripjat River, the increase of the specific activity of ^{90}Sr is registered, which is presumably connected to the dynamics of physico-chemical forms of the radionuclide in soils and their wash out in water basins from the catchment territory. Now about 90% of the internal dose rate of fish from closed aquatic ecosystems within the Chernobyl NPP exclusion zone are caused by the ^{90}Sr incorporation.

В последнее десятилетие в Зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) на фоне общей стабилизации радиоэкологической обстановки отмечается тенденция изменения физико-химических форм и динамики радионуклидного загрязнения в различных ландшафтах, что обуславливает увеличение мобильности радионуклидов, их биологической доступности, а также перераспределение в компонентах водных и наземных экосистем [1–5]. При изучении концентрирования радионуклидов водными организмами значительный интерес представляют рыбы, занимающие в биогеоценозах верхние трофические уровни, характеризующиеся сравнительно низкой радиоустойчивостью и входящие в рацион питания человека. Прикладной характер таких исследований обусловлен, в первую очередь, дополнительным вкладом в формирование дозовых нагрузок при использовании в пищу загрязненных радионуклидами промысловых видов рыб, а также проблемами, связанными с защитой наиболее радиочувствительных представителей водной биоты.

В настоящем сообщении анализируются результаты исследований видоспецифичности и динамики концентрирования ^{90}Sr , ^{137}Cs и трансурановых элементов, их распределения в органах и тканях, а также оценивается вклад в формирование внутренней дозы облучения различных видов рыб в водоемах Зоны отчуждения и прилегающем участке Киевского водохранилища.

Основные исследования проводили в 1997–2006 гг. в реках Припять и Уж, в водоеме-охладителе, озерах Глубокое, Далекое-1, Азбучин и Яновском (Припятском) затоне,

а также в верхнем участке Киевского водохранилища (у с. Страхолесье), прилегающем к Зоне отчуждения. Анализ содержания радионуклидов в рыбе выполняли с использованием следующих видов: хищные — щука (*Esox lucius* L.), сом обыкновенный (*Silurus glanis* L.), сом канальный (*Ictalurus punctatus* Raf.), окунь обыкновенный (*Perca fluviatilis* L.), судак обыкновенный (*Stizostedion lusiopectera* L.), жерех (*Aspius aspius* L.); “мирные” — плотва обыкновенная (*Rutilus rutilus* L.), красноперка (*Scardinius erythrophthalmus* L.), линь (*Tinca tinca* L.), густера (*Blicca bjoerkna* L.), лец (*Abramis brama* L.), синец (*Abramis ballerus* L.), карась обыкновенный (*Carassius carassius* L.), сазан (*Cyprinus carpio* L.), толстолобик белый (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.), голавль (*Leuciscus cephalus* L.), чехонь (*Pellicus cultratus* L.) и язь (*Leuciscus idus* L.).

Способность рыб аккумулировать радионуклиды, традиционно выражаемая в единицах коэффициента накопления или концентрирования (K_k), определяли отношением удельной активности радионуклидов в рыбе к их среднегодовому содержанию в воде мест обитания. Оценку мощности поглощенной дозы от инкорпорированных ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{238,239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am проводили по методике, описанной в работе [6], с использованием дозовых пересчетных коэффициентов. Результаты измерений содержания радионуклидов приведены в беккерелях на килограмм (Бк/кг) массы при естественной влажности.

Наши исследования в Зоне отчуждения показали, что в проточных и слабопроточных водоемах общее содержание ^{137}Cs в рыбе значительно превышает этот показатель для ^{90}Sr и соответствует традиционным представлениям о распределении радионуклидов в ихтиоценозе водоемов, оказавшихся в зоне влияния аварии на ЧАЭС (табл. 1). При этом отношение удельной активности ^{90}Sr к ^{137}Cs в рыбе рек Припять и Уж составило в среднем 0,19 и 0,12 соответственно, а достоверной динамики содержания радионуклидов за период исследований нами не зарегистрировано. Тенденция повышенного концентрирования ^{137}Cs рыбой наиболее выражена в водоеме-охладителе ЧАЭС — единственном среди изученных водоемов Зоны отчуждения, содержание ^{137}Cs в воде превышает содержание ^{90}Sr . Предполагается, что это связано с поступлением ^{137}Cs в водоем-охладитель с реакторными водами через сбросной канал в период активной фазы аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. [7] и интенсивными процессами депонирования радионуклида в донных отложениях, которые в последующие годы стали основным источником загрязнения водных масс водоема. Очевидно, немаловажное значение при концентрировании радионуклидов играет также катионный состав воды, который в водоеме-охладителе характеризуется самым высоким отношением суммы Ca^{2+} и Mg^{2+} к сумме Na^+ и K^+ среди исследованных водных объектов (табл. 2), что определяет более интенсивное накопление ^{137}Cs как химического аналога калия. В связи

Таблица 1. Диапазоны и средние значения удельной активности радионуклидов в рыбе Зоны отчуждения ЧАЭС в период 1997–2006 гг., Бк/кг

Водный объект	^{90}Sr	^{137}Cs
р. Припять	6–99 (44)	8–530 (110)
р. Уж	1–23 (13)	3–290 (75)
Водоем-охладитель	27–680 (220)	930–10500 (3950)
Яновский затон	4400–5100 (4750)	810–3200 (1905)
оз. Азбучин	7000–139500 (26000)	1800–13000 (4260)
оз. Далекое-1*	2800–13000 (6960)	16000–27000 (20000)
оз. Глубокое	660–29000 (10550)	2500–19000 (8640)
Киевское водохранилище	1–17 (6)	6–62 (29)

* По данным 1999 г.

с этим вклад ^{90}Sr в общее содержание радионуклидов в рыбе здесь минимальный по сравнению с другими водоемами Зоны отчуждения.

В замкнутых водоемах правобережья р. Припять, оз. Азбучин и Яновском затоне содержание радионуклидов в рыбе характеризуется обратной закономерностью — более высоким содержанием ^{90}Sr в организме рыб по сравнению с ^{137}Cs . Предполагается, что причинами такого соотношения может быть, с одной стороны, повышенное содержание ^{90}Sr в воде (по сравнению с проточными водными объектами), а с другой — геохимические условия территории правобережья р. Припять, определяющие специфический (для расположенных здесь водоемов) катионный состав воды. При этом низкое отношение суммы Ca^{2+} и Mg^{2+} к сумме Na^{+} и K^{+} , очевидно, является причиной более интенсивного концентрирования ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs . Ранее аналогичное соотношение в содержании радионуклидов отмечали для высших водных растений на протяжении всего периода мониторинговых исследований, которые выполнялись в этих водоемах с 1997 г. [8], а с началом измерений содержания радионуклидов в рыбах — зарегистрировано и для этих представителей экосистем. Предполагается, что такая закономерность в концентрировании радионуклидов рыбой и высшими водными растениями Яновского затона и оз. Азбучин могла существовать в течение всего периода после аварии на ЧАЭС и обусловлена высоким содержанием ^{90}Sr в воде, а также ее катионным составом.

Значительно большей динамичностью характеризуется радиоэкологическая ситуация в озерах, расположенных на территории одамбированного участка левобережной поймы р. Припять. В оз. Глубокое, при относительно стабильном содержании ^{137}Cs в тканях рыб, с конца 1990 годов наблюдается устойчивая тенденция увеличения активности ^{90}Sr как у “мирных”, так и хищных видов рыб. При этом, если в 1999 г. отношение содержания ^{90}Sr к ^{137}Cs в организме “мирных” рыб составляло 0,2, то в 2000 г. это отношение возросло до 0,6, в 2001 г. — составило 2,0, превысив содержание ^{90}Sr , а в 2006 г. — достигло значения 5,6. Увеличение содержания ^{90}Sr в организме хищных видов происходило не так быстро, незначительно превысив общее содержание ^{137}Cs лишь в 2005 г. (рис. 1).

Предполагается, что описанная динамика ^{90}Sr в тканях рыб левобережной поймы связана, в первую очередь, с изменением физико-химических форм радионуклида в почвах водосборных территорий. Поскольку левобережная пойма оказалась одним из наиболее загрязненных радионуклидами массивов Зоны отчуждения, здесь в период 1992–1993 гг. был построен комплекс противопаводковых дамб, изменивших гидрологический режим пойменных потоков в периоды половодий и препятствующих вымыванию радиоактивных веществ

Таблица 2. Среднее соотношение катионов и радионуклидов в воде и рыбе Зоны отчуждения ЧАЭС в 1997–2006 гг.

Водный объект	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$ (в воде)	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ (в рыбе)	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ (в воде)
р. Припять	1,7	0,19	2,5
р. Уж	1,7	0,12	2,7
Водоем-охладитель	3,4	0,06	0,7
Яновский затон	1,4	2,49	8,8
оз. Азбучин	1,4	6,10	8,4
оз. Далекое-1	1,9	0,35*	17,2
оз. Глубокое	2,0	1,25	13,2
Киевское водохранилище	1,2	0,14	3,5

* По данным 1999 г.

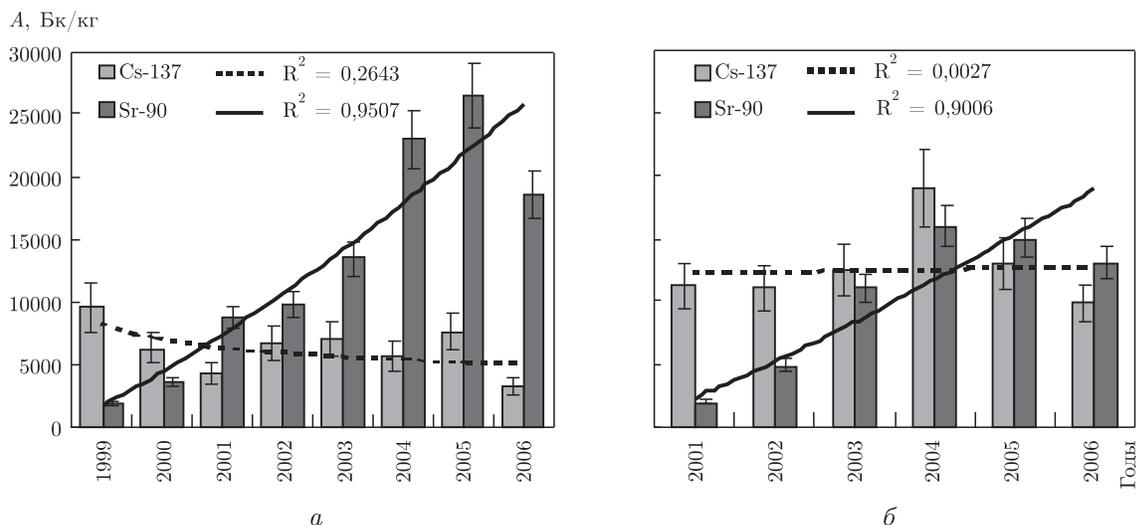


Рис. 1. Динамика удельной активности радионуклидов у “мирных” (а) и хищных видов рыб (б) оз. Глубокое

из почв загрязненных территорий. Однако это явилось причиной усиления процессов переувлажнения и заболачивания одамбированных территорий. В результате, на фоне общих тенденций увеличения мобильных форм ^{90}Sr в почвах водосборных территорий и в донных отложениях водоемов Зоны отчуждения [5], в заболоченных грунтах левобережной поймы происходит возрастание концентрации фульво- и гуминовых кислот, снижающее рН водной среды, усиливающее десорбцию радионуклидов и их переход в растворенное состояние, в первую очередь ^{90}Sr , который образует с фульвокислотами растворимые комплексы. При этом наблюдается увеличение концентраций мобильных форм радионуклида и их включение в биотический круговорот водных экосистем. Это подтверждает и заметное увеличение в последние годы удельной активности ^{90}Sr в воде озер левобережной поймы на фоне стабилизации этого показателя для ^{137}Cs , а также регистрируемый нами с 1996 г. достаточно быстрый рост удельной активности ^{90}Sr в тканях высших водных растений озер Глубокое и Далекое-1 [2, 8–10].

Содержание трансурановых элементов ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в оз. Глубокое измеряли для трех видов рыб: леща, карася и линя. Содержание ^{238}Pu составило 0,4–0,5 (0,4), $^{239+240}\text{Pu}$ — 0,7–0,9 (0,8) и ^{241}Am — 2,2–10,0 (6,2) Бк/кг. Максимальное содержание среди трансурановых элементов отмечены для ^{241}Am , что касается радионуклидов плутония, то отношение содержания $^{239+240}\text{Pu}$ к ^{238}Pu составляет в среднем 2 : 1 и определяется количественным составом поступления этих элементов в результате аварии на ЧАЭС. Среди исследованных трех видов рыб в оз. Глубокое наибольшие значения удельной активности трансурановых элементов в тканях отмечены у карася, а наименьшие — у леща.

На примере “мирных” видов рыб оз. Глубокое были рассчитаны средние за период исследований величины K_k основных радионуклидов, которые расположены в порядке убывания следующим образом: ^{241}Am (1028) > ^{137}Cs (891) > ^{90}Sr (113) > ^{238}Pu (83) > $^{239+240}\text{Pu}$ (75). Наибольшие и достаточно сходные средние значения этого показателя характерны для ^{241}Am и ^{137}Cs . Значительно меньшие величины K_k отмечены для ^{90}Sr и изотопов плутония.

Одним из наиболее важных последствий роста удельной активности ^{90}Sr в воде оз. Глубокое является многократное увеличение удельной активности радионуклида в биоте озера. При этом мощность поглощенной дозы, обусловленная инкорпорацией ^{90}Sr , в 2005 г.

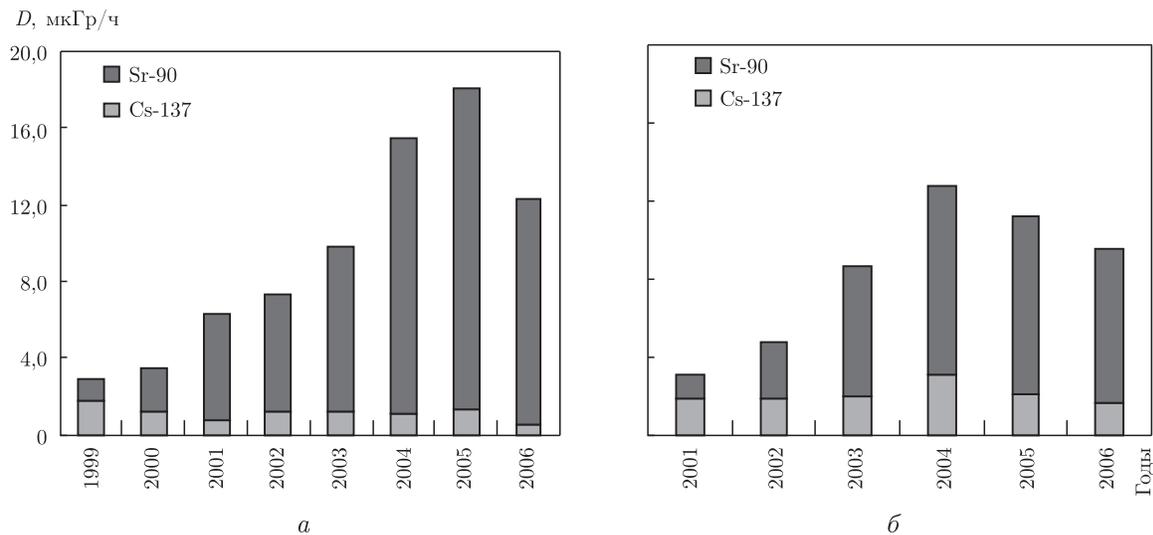


Рис. 2. Динамика мощности поглощенной дозы от инкорпорированных радионуклидов у “мирных” (а) и хищных видов рыб (б) оз. Глубокое

возросла для “мирных” видов рыб в 14 раз по сравнению с 1999 г., а общая доза от инкорпорированных радионуклидов увеличилась более чем в 6 раз. Для хищных видов рыб максимальное увеличение содержания ^{90}Sr отмечено в 2004 г., при этом доза, обусловленная ^{90}Sr , возросла более чем в 8 раз, а общая доза от инкорпорированных радионуклидов — более чем в 4 раза (рис. 2).

Нетрудно предположить, что подобное увеличение содержания ^{90}Sr и, соответственно, дозовых нагрузок для рыб происходит и в оз. Далекое-1, поскольку здесь также отмечен существенный рост удельной активности радионуклида в воде и в тканях высших водных растений. К сожалению, в настоящее время, в связи с ограниченными возможностями лова рыбы, нам не удалось подтвердить эту тенденцию для представителей ихтиофауны оз. Далекое-1, тем не менее в 1999 г. было отмечено увеличение содержания ^{90}Sr в щуке по сравнению с 1996 г. Что касается водоемов правобережья р. Припять, то здесь, очевидно, уже с конца 1986 г. (после распада короткоживущих радионуклидов) ^{90}Sr является главным источником формирования внутренней дозы облучения биоты.

Анализ усредненных показателей мощности поглощенной дозы от инкорпорированных радионуклидов свидетельствует о том, что в настоящее время в рыбе замкнутых водоемов Зоны отчуждения на долю ^{90}Sr приходится более 90% внутренней дозы облучения. Максимальными значениями этого показателя характеризуются рыбы оз. Азбучин, для которых доза облучения от внутренних источников составляет в среднем 17 мкГр/ч, а вклад ^{90}Sr в мощность поглощенной дозы, благодаря высокому содержанию радионуклида в воде и особенностям гидрохимического режима, превышает 95% (рис. 3). В Яновском затоне (при общем сравнительно невысоком содержании радионуклидов в воде) мощность внутренней дозы облучения рыб равна около 3,5 мкГр/ч, с вкладом ^{90}Sr — более 90%. В оз. Глубокое ^{90}Sr формирует до 90% дозовой нагрузки от инкорпорированных радионуклидов при общей дозе внутреннего облучения рыб около 15 мкГр/ч. Данные по оз. Далекое-1 представлены на основании измерений 1999 г., когда вклад ^{90}Sr во внутреннюю дозу облучения рыб был на уровне 50%, а доза от инкорпорированных радионуклидов составляла в среднем около 8 мкГр/ч. Предполагается, что в настоящее время обе эти величины значительно выше.

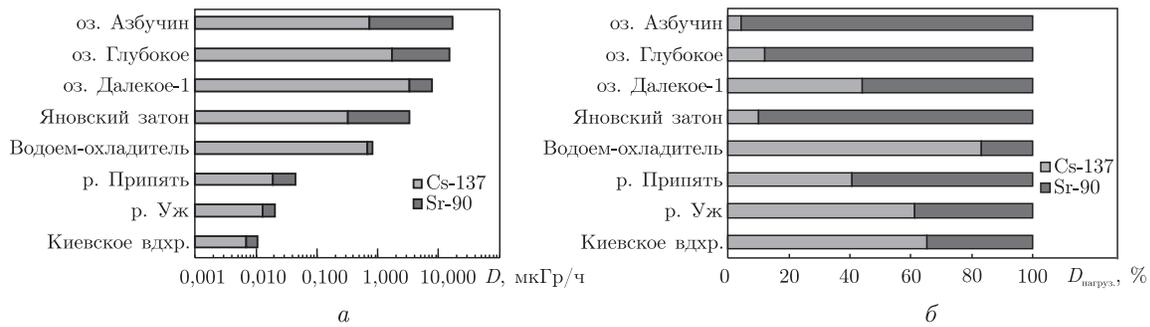


Рис. 3. Мощность поглощенной дозы (а) и вклад инкорпорированных радионуклидов в дозу внутреннего облучения (б) рыб Зоны отчуждения ЧАЭС в 2006 г. (оз. Далекое-1 представлено по данным 1999 г.)

В речных экосистемах Зоны отчуждения, а также в верховье Киевского водохранилища вклад ^{90}Sr во внутреннюю дозу облучения рыб составил от 60% (в р. Припять) до 35–40% (в Киевском водохранилище и р. Уж). Средняя мощность поглощенной дозы от инкорпорированных радионуклидов была наименьшей для рыб Киевского водохранилища — 0,01 мкГр/ч, в р. Уж равна 0,02 мкГр/ч, а в р. Припять — около 0,05 мкГр/ч. Наименьшим был вклад ^{90}Sr во внутреннюю дозу облучения рыб водоема-охладителя — до 30%, при мощности поглощенной дозы около 0,8 мкГр/ч. Дозовая нагрузка для рыб оз. Глубокое, обусловленная инкорпорацией трансурановых элементов, составила для ^{238}Pu — 0,001, для $^{239+240}\text{Pu}$ — 0,002 и для ^{241}Am — 0,020 мкГр/ч. Таким образом, общий вклад трансурановых элементов во внутреннюю дозу облучения рыб составляет около 0,16%.

В настоящее время удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в рыбе исследованных пойменных озер и Яновского затона, из расчета на общее содержание радионуклидов в организме рыб, во всех случаях многократно превышает допустимые санитарно-гигиенические уровни (ДУ), согласно принятым в Украине нормативам для рыбной продукции: для ^{90}Sr — в среднем в 350 (ДУ — 35 Бк/кг), для ^{137}Cs — в 60 раз (ДУ — 150 Бк/кг) [11]. Максимально зарегистрированные значения превысили ДУ: для ^{90}Sr — почти в 3990 раз в оз. Азбучин и для ^{137}Cs — в 180 раз в оз. Далекое-1. Содержание ^{90}Sr в рыбе водоема-охладителя практически во всех выловленных особях превышало ДУ — в среднем в 6 раз, максимально зарегистрированное значение — в 20 раз. Содержание ^{137}Cs во всех случаях также значительно превышал ДУ — в среднем в 26 раз, с максимальным показателем — в 70 раз. Несмотря на то, что средние показатели содержания радионуклидов в рыбе р. Припять не превышали ДУ, случаи превышения концентраций ^{137}Cs за период исследований составили около 20% общего количества выловленных особей. Максимальные значения содержания ^{137}Cs в 5 раз превысили ДУ. В р. Уж превышения ДУ ^{137}Cs за период исследований отмечены в единичных случаях. В рыбе Киевского водохранилища за исследуемый период превышения ДУ нами не зарегистрированы.

1. 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее: Национальный доклад Украины. — Киев: Атика, 2006. — 232 с.
2. Гудков Д. И., Кузьменко М. И., Киреев С. И., Назаров А. Б. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС для водных экосистем зоны отчуждения // Радиоэкологические исследования в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (к 20-летию аварии на Чернобыльской АЭС): Тр. Коми науч. центра УрО РАН; № 180. — Сыктывкар, 2006. — С. 201–223.
3. Иванов Ю. О. Динаміка перерозподілу радіонуклідів у ґрунтах і рослинності // Чорнобиль – Зона відчуження / Під ред. В. Г. Бар'яхтара. — Київ: Наук. думка, 2001. — С. 47–76.

4. *Кашипаров В. О.* Забруднення ^{90}Sr території зони відчуження // Бюл. еколог. стану зони відчуження та зони безумов. (обов'язк.) відселення. – 1998. – № 12. – С. 41–43.
5. *Соботович Э. В., Бондаренко Г. Н., Кононенко Л. В. и др.* Геохимия техногенных радионуклидов. – Киев: Наук. думка, 2002. – 332 с.
6. *Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment* / Ed. by J. Brown, P. Strand, A. Hosseini, P. Børretzen. – Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT – 2000. – 00102. – Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003. – 395 p.
7. *Кашипаров В. О., Хомутін Ю. В., Глуховський О. С. та ін.* Оцінка небезпечності вторинного вітрового переносу радіоактивних аерозолів після часткового осушення водойми-охолоджувача ЧАЕС // Бюл. еколог. стану зони відчуження та зони безумов. (обов'язк.) відселення. – 2003. – № 1 (21). – С. 67–74.
8. *Гудков Д. І.* Радіонукліди в компонентах водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС: розподіл, міграція, дозові навантаження, біологічні ефекти: Автореф. дис. ... д-ра біол. наук. – Київ, 2006. – 34 с.
9. *Каглян О. Є.* Особливості накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs у гідробіонтах і абіотичних компонентах водойм зони відчуження ЧАЕС: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. – Київ, 2003. – 24 с.
10. *Gudkov D. I., Nazarov A. B.* Lake ecosystems of the Chernobyl exclusion zone under impact of long-term radioactive contamination // Proc. of the 11th World Lakes Conf., 31 Oct. – 4 Nov. 2005. – Nairobi, Kenya / Ed. by E. O. Odada, D. O. Olago, W. Ochola et al. – Nairobi: Univ. of Nairobi, 2006. – Vol. 2. – P. 348–352.
11. *Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у продуктах харчування та питної води (ДР-97).* – Київ: Мін-во охорони здоров'я України. Комітет з питань гігієнічного регламентування, 1997. – 38 с.

*Институт гидробиологии НАН Украины, Киев
Государственное специализированное
научно-производственное предприятие
“Чернобыльский радиоэкологический центр”
МЧС Украины, Чернобыль*

Поступило в редакцию 27.03.2007