

УДК 577.34:597

**Е. Н. Волкова, В. В. Беляев, А. А. Пархоменко,
С. П. Пришляк**

**ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ДОЗЫ
ОБЛУЧЕНИЯ ПРЭСНОВОДНЫХ РЫБ НА
ЭМБРИОНАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ**

Изучали особенности формирования дозы облучения пресноводных рыб на эмбриональной стадии развития. Учитывали β -, γ -излучение ^{137}Cs и β -излучение ^{90}Sr , сосредоточенных в водных массах, донных отложениях и высших водных растениях, а также β -излучение инкорпорированных радионуклидов. Расчёты проведены для видов, различающихся субстратом развития эмбрионов и сроками нереста. Установлено, что мощность дозы облучения эмбрионов рыб Киевского водохранилища составляет от 183 до 8000 нГр/сут. На основании проведенных расчётов предложен принцип экологического нормирования радионуклидного загрязнения донных отложений пресноводных водоёмов.

Ключевые слова: эмбрионы рыб, мощность дозы облучения, ^{90}Sr , ^{137}Cs .

В естественных водоёмах доза облучения гидробионтов формируется в результате излучения радионуклидов, сосредоточенных в абиотических и биотических компонентах экосистемы. Однако до настоящего времени не разработаны методологические подходы, позволяющие при расчётах учесть все возможные источники, составляющие суммарную дозу. Особенно это актуально для подвижных гидробионтов, в частности рыб, для которых характерны изменения отношений с окружающей средой на разных стадиях онтогенеза. Выделяют два основных периода онтогенеза рыб — ранний и взрослого состояния. В свою очередь, ранний подразделяется на эмбриональный, личиночный и мальковый. Указанные периоды чётко различаются уровнем организации и, что очень важно с точки зрения радиозэкологических и радиобиологических исследований, отношениями организма с окружающей средой и радиочувствительностью [11]. Установление особенностей формирования дозовых нагрузок на рыб на ранних стадиях онтогенеза крайне необходимо, поскольку именно в этот период они наиболее чувствительны к воздействию ионизирующего излучения. Однако в работах, посвящённых методам оценки дозовых нагрузок на рыб [10, 13, 14], рассмотрены далеко не все пути формирования облучения на эмбриональной стадии развития. Поэтому целью нашей работы была разработка подходов к оценке дозовых нагрузок на организм пресноводных рыб на этой стадии.

© Е. Н. Волкова, В. В. Беляев, А. А. Пархоменко, С. П. Пришляк, 2013

Материал и методика исследований. В работе использованы данные, полученные в 2010—2012 гг. в акватории Припятского отрога Киевского вдхр. [1, 2, 9]. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в водных массах, донных отложениях, зелёных нитчатых водорослях, высших водных растениях и рыбах определяли стандартными гамма-спектрометрическими и радиохимическими методами [7]. Для расчёта дозовых нагрузок на икру рыб содержание радионуклидов приводили в Бк/кг естественной влажности. Выражение «содержание радионуклидов в вегетирующей мягкой растительности» означает их усреднённое содержание в зелёных нитчатых водорослях рода *Cladophora* и нескольких видах погруженных высших водных растений (рдесте гребенчатом *Potamogeton pectinatus* L., рдесте пронзённолистном *P. perfoliatus* L., урути колосистой *Myriophyllum spicatum* L., элодее канадской *Elodea canadensis* Michx. и роголистнике погружённом *Ceratophyllum demersum* L.). Выражение «содержание радионуклидов в мирных рыбах» означает их усреднённую удельную активность в плотве обыкновенной *Rutilus rutilus* L., лине озерном *Tinca tinca* L., густере *Blicca bjoerkna* L., леще обыкновенном *Abramis brama* L., карасе серебряном *Carassius auratus gibelio* (Bloch), краснопёрке *Scardinius erythrophthalmus* L., чехони *Pelecus cultratus* L. и синце *Abramis ballenus* L. а выражение «содержание радионуклидов в хищных рыбах» — в щуке *Esox lucius* L., судаке обыкновенном *Stizostedion lucioperca* L., окуне речном *Perca fluviatilis* L., соме обыкновенном *Silurus glanis* L., жерехе *Aspius aspius* L., голавле *Leuciscus cephalus* L. Принадлежность рыб к экологическим группам по характеру размножения и развития, особенностям поведения и диаметру икринок приводили по литературным данным [4]. Методику расчёта дозовых нагрузок на эмбрионы рыб разрабатывали на основании справочных данных и методических указаний [3, 5, 8]. Для расчёта дозовых нагрузок на развивающуюся икру от внешнего γ -излучения в приближении бесконечной геометрии использовали дозовые коэффициенты [12].

Результаты исследований и их обсуждение

По характеру размножения и развития пресноводные рыбы подразделяются на пелагофильные, литофильные, псаммофильные, фитофильные и остракофильные [4]. Выметанная икра пелагофильных рыб находится в водных массах в плавучем состоянии. Виды из литофильной и псаммофильной групп используют в качестве нерестового субстрата каменистое и песчаное дно мелководий, а фитофильной — вегетирующую и отмершую растительность. К остракофильной группе относятся только горчаки, откладывающие икру в жаберную полость двустворчатых моллюсков (в данной работе они не рассматриваются). Необходимо отметить, что не все рыбы могут быть строго отнесены к той или иной экологической группе, некоторые сочетают свойства литофильных и фитофильных или же относятся к субстрату индифферентно.

Доза внешнего облучения рыб в период эмбрионального развития обусловлена концентрацией радионуклидов в водных массах, донных отложениях нерестилищ, а также в вегетирующих и отмерших растениях, используемых для откладки икры, внутреннего — радионуклидами, инкорпорированными в икринке. При расчёте дозы от β -излучающих радионуклидов необходимо учитывать её диаметр.

При расчётах дозы облучения икры от радионуклидов, сосредоточенных в водных массах, принимали, что поглощённая доза (D , Гр) равна равновесной дозе, формирующейся в водных массах за счет β - и γ -излучения. Для β -излучения использован наиболее консервативный вариант. Расчёты проводили по формуле

$$D = \sum C_{w(i)} K_{d(i)(\beta\gamma)} t, \quad i = 1, k, \quad (1)$$

где $C_{w(i)}$ — концентрация i -того радионуклида в водных массах, Бк/л, принято, что 1 л воды имеет массу 1 кг; $K_{d(i)(\beta,\gamma)}$ — дозовый коэффициент i -того радионуклида (β , γ -излучение), (Гр/сут)/(Бк/кг); t — время, сутки; k — количество β , γ -излучающих радионуклидов.

При расчётах дозы облучения эмбрионов рыб от радионуклидов, сосредоточенных в субстрате, необходимо учитывать особенности распространения β , γ -излучения в разных средах (воде, донных отложениях, растениях и икринках). Поэтому сначала рассмотрим особенности формирования дозы γ -излучением субстрата.

В случае, когда послойную стратификацию радионуклидного загрязнения донных отложений можно представить в приближении бесконечной геометрии, мощность дозы γ -излучения донных отложений ($P_{\gamma i}$, Гр/сут) можно рассчитать по формуле

$$P_{\gamma i} = g_k \sum C_{sed(i)} K_{d(i)(\gamma)}, \quad i = 1, n, \quad (2)$$

где g_k — геометрический фактор, на поверхности донных отложений равен 0,5; $C_{sed(i)}$ — концентрация i -того радионуклида в донных отложениях, Бк/кг естественной влажности; $K_{d(i)(\gamma)}$ — дозовый коэффициент γ -излучения i -того радионуклида, (Гр/сут)/(Бк/кг); n — количество γ -излучающих радионуклидов.

Гамма-составляющую мощности поглощённой икрой дозы (P , Гр/сут) от радионуклидов, находящихся в растениях, определяли путем расчёта активности i -того радионуклида субстрата в объёме воды:

$$P = \sum C_{plan(i)} K_{d(i)(\gamma)}, \quad i = 1, k, \quad (3)$$

$$C_{plan(i)} = \frac{As_{plan(i)}}{m_{wat}},$$

где $C_{plan(i)}$ — объёмная активность субстрата, Бк/л; $As_{plan(i)}$ — активность растений на единице площади (эквивалент плотности загрязнения поверхности), Бк/м²; m_{wat} — масса (объём) воды на единице площади нерестилищ, л/м².

При расчёте дозы, создаваемой β -излучением субстрата, учитывали ослабление потока энергии в икринке, а также энергию, излучаемую субстратом. При этом рассчитывали энергию, поглощаемую слоем, равным диаметру икринки:

$$E = E_0 \exp(-\mu_x x), \quad (4)$$

где E — плотность энергии β -частиц на поверхности слоя вещества толщиной x ; E_0 — плотность энергии β -частиц без поглощающего слоя; μ_x — линейный коэффициент ослабления в веществе.

Растительный субстрат представляли бесконечной поверхностью в двух вариантах: толстой и тонкой. В качестве толстой принимали субстрат, превышающий толщиной максимальный пробег β -частиц, тонкой — толщиной меньше этого пробега. Расчёт энергии, излучаемой β -частицами субстрата, проводили интегрированием энергии, излучаемой бесконечно тонкой поверхностью от нуля до толщины поверхности (y). С учётом ослабления потока β -излучения в субстрате и икринке, а также её массы, формула для расчёта мощности дозы P от β -излучения субстрата имеет следующий вид:

$$P_{\beta i} = 0,5 \cdot 86400 A_{mi} \langle E_i \rangle \rho_y [1 - \exp(-\mu_{yi} y)] [1 - \exp(-\mu_{xi} x)] (\mu_{yi} \rho_x x)^{-1}, \quad (5)$$

где 86400 — коэффициент, учитывающий количество секунд в сутках; A_{mi} — концентрация i -того радионуклида в субстрате, Бк/кг естественной влажности; $\langle E_i \rangle$ — средняя энергия β -излучения i -того радионуклида, Дж/распад; $\rho_y (\rho_x)$ — плотность субстрата (икры), кг/см³; $\mu_{yi} (\mu_{xi})$ — коэффициент линейного ослабления β -излучения i -того радионуклида в субстрате (икре), см⁻¹; y — толщина листа (для донных отложений значение y стремится к бесконечности, т. е. рассматривается вариант «толстой» поверхности), см; x — диаметр икринки, см.

Дозу внутреннего облучения эмбрионов рыб (P_{int} , Гр/сут) рассчитывали по формуле

$$P_{int} = \sum C_{f(i)} K_{d(i)(\beta)} f_{(i)(\beta)}(x) \quad i = 1, k, \quad (6)$$

где $C_{f(i)}$ — концентрация i -того радионуклида в икре, Бк/кг; $K_{d(i)(\beta)}$ — дозовый коэффициент i -того радионуклида (β -излучение), (Гр/сут)/(Бк/кг); k — количество радионуклидов; $f_{(i)(\beta)}(x)$ — коэффициент, учитывающий долю энергии β -излучения i -того радионуклида, реализующуюся в икринке диаметром x .

Коэффициент $f_{(i)(\beta)}(x)$ рассчитывали исходя из консервативного предположения о том, что вся активность i -того радионуклида сосредоточена в центре икринки.

На основании описанных выше подходов была определена мощность сформированной излучением ^{90}Sr и ^{137}Cs дозы внешнего и внутреннего облучения эмбрионов рыб на нерестилищах Припятского отрога Киевского водохранилища. При расчётах были приняты следующие условия: 1) пелагическая икра находится вне зоны влияния донных отложений; 2) икра щуки, жереха и голавля располагается непосредственно на дне; 3) икра леща, густеры, синца и плотвы располагается на расстоянии 20 см от дна; 4) икра линя, краснопёрки и карася располагается на расстоянии 50 см от дна; 5) икра сома и судака находится в гнёздах из отмершей растительности, расположенных на дне; 6) удельное содержание радионуклидов в грунте в местах нереста сома и судака соответствует радиоактивности заиленных песков, остальных видов — промытых песков; 7) вертикальная стратификация ^{137}Cs в донных отложениях в местах нереста позволяет проводить расчёт дозы γ -излучения в предположении бесконечной геометрии; 8) удельная активность радионуклидов оплодотворённой икры рыб находится на уровне, зарегистрированном в гонадах и мышечных тканях взрослых особей. Принятые нами условия расположения икры фитофильных видов основаны на том, что рыбы мечут икру при разной температуре воды и, соответственно, при разном уровне развития высших водных растений, поэтому эмбрионы поздненерестящихся видов (карася, линя и краснопёрки) могут развиваться на значительном расстоянии от дна.

Кроме того, как следует из формулы (5), доза облучения эмбрионов зависит от толщины субстрата, на котором развивается икра. При расчётах мы исходили из того, что толщина листовых пластинок погружённых растений составляет 0,05—0,2 мм (в среднем 0,1 мм) [6], отмерших стеблей рогоза и тростника — более 9 мм. Максимальный пробег β -частиц $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ равен около 10 мм, ^{137}Cs — около 1 мм, соответственно субстрат, на котором расположена икра, отождествляли с тонкой или толстой поверхностью.

Таким образом, мы объединили исследованные виды рыб в несколько групп, характеризующихся сходными условиями облучения на эмбриональной стадии развития, и обозначили основные параметры, необходимые для расчёта суммарной мощности дозы внешнего и внутреннего облучения эмбрионов по формулам (1)—(6) (табл. 1, 2).

Расчёты показали, что доза облучения эмбрионов представителя группы I — чехони (пелагофила) сформирована в основном инкорпорированными радионуклидами. Вклад излучения ^{90}Sr и ^{137}Cs водных масс составляет менее 1% суммарной дозы. К представителям группы II относятся фитофильные виды, нерестящиеся порционно при температуре воды 20—26°C. Их нерест совпадает с периодом активного увеличения биомассы высших водных растений, т. е. икра может располагаться на значительном (около 50 см) расстоянии от дна. Однако и в этих условиях радионуклиды, депонированные в донных отложениях, вносят значительный вклад в суммарную мощность дозы облучения эмбрионов (рис. 1).

Фитофильные виды, отнесённые к группе III, нерестятся при температуре воды от 7 до 20°C, т. е. в период начала вегетации водных растений, поэтому их эмбрионы развиваются на расстоянии около 20 см от дна. Следова-

1. Условия облучения пресноводных рыб разных видов на эмбриональной стадии развития

Группы	Виды рыб	g_k	Субстрат		x, мм
			для ^{90}Sr	для ^{137}Cs	
I	Чехонь	0	—	—	6,0
II	Красноперка, карась, линь	0,10	1	1	1,0—1,5
III	Лещ, густера, плотва, синец, окунь	0,33	1	1	1,4—1,8
IV	Щука, жерех, голавль	0,50	2	2	2,0—2,6
V	Судак, сом	0,50	2	2	1,5—3,0

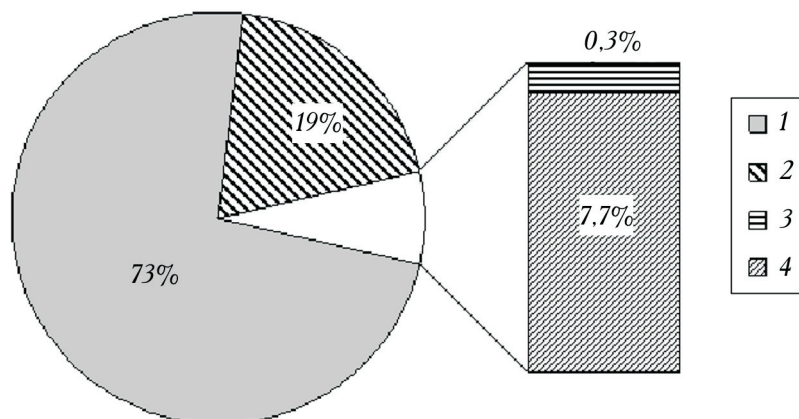
Примечание. g_k — геометрический фактор; x — диаметр икринки; «—» — субстрат отсутствует; 1 — тонкая поверхность; 2 — толстая поверхность.

2. Содержание радионуклидов в абиотических и биотических компонентах нерестилищ Припятского отрога Киевского водохранилища

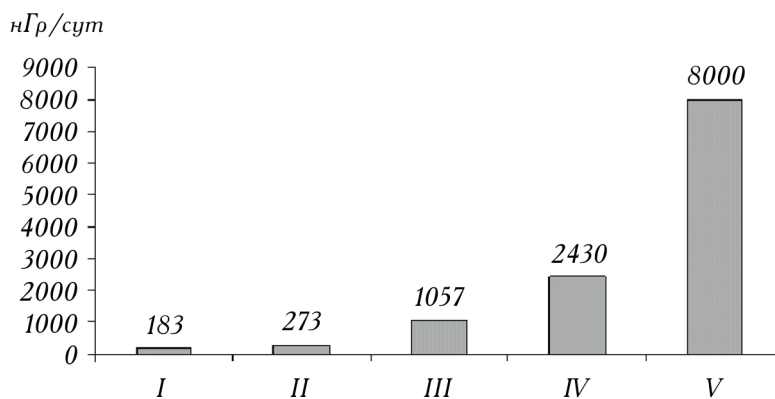
Компоненты	^{90}Sr	^{137}Cs
Вода, Бк/м ³	150	50
Донные отложения, Бк/кг		
песок	50	500
песок заиленный	100	2000
Растительность, Бк/кг		
мягкая вегетирующая	1,4	50
отмершая	1,8	50
Рыбы (гонады), Бк/кг		
мирные	1	15
хищные	1	50

тельно, доза облучения этих рыб обусловлена преимущественно излучением радионуклидов, депонированных в донных отложениях. Вклад других источников составляет менее 1%, а мощность суммарной дозы облучения эмбрионов значительно выше, чем у представителей первых двух групп (рис. 2). Ещё выше она у рыб, отнесённых к группе IV, частично или полностью вымётывающих икру непосредственно на промытые пески. Представители V группы откладывают икру в гнёзда, построенные на дне из отмершей прошлойгодней растительности, расположенные, как правило, на заиленных участках дна. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в заиленных песках значительно выше, чем в промытых, что приводит к формированию максимальной дозы облучения эмбрионов этих видов по сравнению с другими группами.

Разработанный нами подход к расчёту мощности дозы облучения эмбрионов пресноводных рыб позволяет определить экологически безопасное со-



1. Вклад источников излучения в суммарную дозу облучения эмбрионов карася, красноперки и линя: 1 — донные отложения; 2 — инкорпорированные радионуклиды; 3 — водные массы; 4 — растения.



2. Мощность дозы облучения эмбрионов рыб на нерестилищах Припятского отрога Киевского водохранилища: I — чехонь; II — карась, линь, красноперка; III — лещ, густера, плотва, окунь; IV — щука, голавль, жерех; V — судак, сом.

держание радионуклидов в донных отложениях нерестилищ. При расчётах мы использовали шкалу зональности действия ионизирующего излучения на водные организмы [15] и учитывали, что наиболее высокие дозы облучения эмбрионов рыб формируются в результате воздействия на оплодотворённую икру излучения радионуклидов, депонированных в донных отложениях нерестилищ. Таким образом, на основе шкалы зональности можно оценить условия развития эмбрионов рыб при определённом содержании радионуклидов (табл. 3). Необходимо отметить, что на эмбрионы рыб действует излучение ^{90}Sr верхнего слоя донных отложений толщиной 1 см и излучение ^{137}Cs , находящегося в слое толщиной не менее 30 см.

Согласно градации, представленной в таблице 3, донные отложения нерестилищ Киевского водохранилища по степени радиационного воздействия на эмбрионы рыб относятся к зоне радиационного благополучия.

3. Градация содержания радионуклидов в донных отложениях нерестилищ (кБк/кг естественной влажности)

Зоны радиационного воздействия [15]	Радионуклиды	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Радиационного благополучия	< 2,0	< 2,5
Физиологической маскировки	2—20	2,5—25
Экологической маскировки	20—2000	25—2500
Поражения	> 2000	> 2500

Заключение

Облучение эмбрионов пелагофильных рыб формируется двумя источниками — β -, γ -излучением радионуклидов, сосредоточенных в водных массах, и β -излучением инкорпорированных радионуклидов. На развивающуюся икру фитофильных видов влияют названные выше источники, β -, γ -излучение радионуклидов, депонированных в растениях (вегетирующих или отмерших), и γ -излучение радионуклидов, депонированных в донных отложениях. Уровень воздействия на эмбрионы источников облучения, находящихся в донных отложениях, обусловлен толщиной слоя воды над дном. Облучение находящихся на дне эмбрионов формируется излучением инкорпорированных и сосредоточенных в воде радионуклидов, а также β -, γ -излучением депонированных в донных отложениях.

Проведенные исследования показывают, что в загрязнённых ^{90}Sr и ^{137}Cs водных экосистемах, а именно к таким принадлежит верхняя часть Киевского водохранилища, относительно благоприятные условия развития эмбрионов складываются для пелагофильных и позднерестящихся фитофильных видов рыб. Наиболее высокие дозы облучения на нерестилищах Припятского отрога формируются в результате воздействия излучения радионуклидов, депонированных в заиленных песках на эмбрионы некоторых видов.

Для критической группы рыб удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях нерестилищ не должна превышать соответственно 2000 и 2500 Бк/кг. Такие условия обеспечат развитие рыб в зоне радиационного благополучия (согласно шкале, разработанной Г. Г. Поликарповым [15]).

**

Вивчали особливості формування дози опромінення прісноводних риб на ембріональній стадії розвитку. Враховували β -, γ -випромінювання ^{137}Cs і β -випромінювання ^{90}Sr , зосереджених у водних масах, донних відкладах і водних рослинах. Розрахунки проведено для видів, які розрізняються субстратом розвитку ікри та строками нересту. Встановлено, що потужність дози опромінення ембріонів риб Київського водосховища становить від 183 до 8000 нГр/доба. На основі проведених досліджень запропоновано принцип екологічного нормування радіонуклідного забруднення донних відкладів прісноводних водойм.

**

Peculiarities of formation of the radiation dose of the freshwater fishes at the embryonal stage were studied. β -, γ -radiation of ^{137}Cs and β -radiation of ^{90}Sr containing in water, bottom, sediments and higher aquatic plants, and β -radiation of incorporated radionuclides was taken into account. The calculations were performed for embryos that develop on different substrates and at different temperatures. Dose rate fish embryos of the Kiev reservoir was established to vary over the range 183 to 8000 nG/day. On the basis of the calculations the principle environmental standardization of radionuclide contamination of sediments of freshwater body was proposed.

**

1. *Беляев В.В., Холодько О.П., Волкова О.М. та ін.* Особливості радіонуклідного забруднення донних відкладів Київського водосховища // *Современные проблемы гидробиологии. Перспективы, пути и методы решений: Материалы III Междунар. науч. конф.* — Херсон: ПП Вишемирський В. С., 2012. — С. 136—139.
2. *Волкова Е.Н., Беляев В.В., Пришляк С.П. и др.* Особенности формирования радионуклидного загрязнения высших водных растений Киевского водохранилища // *Ядер. фізика та енергетика.* — 2012. — Т. 13, № 2. — С. 160—165.
3. *Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты от излучений / Под ред. Н. Г. Гусева.* — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 512 с.
4. *Коблицкая А.Ф.* Изучение нереста пресноводных рыб. Методическое пособие. — М.: Пищ. пром-сть, 1966. — 110 с.
5. *Козлов В.Ф.* Справочник по радиационной безопасности. — М.: Атомиздат, 1977. — 384 с.
6. *Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н.* Физиология высших водных растений — Киев: Наук. думка, 1988. — 188 с.
7. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / За ред. В. Д. Романенка.* — К.: ЛОГОС, 2006. — 408 с.
8. *Немец О.Ф., Гофман Ю.В.* Справочник по ядерной физике. — Киев: Наук. думка, 1975. — 416 с.
9. *Пархоменко О.О., Волкова О.М., Беляев В.В., Пришляк С.В.* Накопичення ^{137}Cs представниками промислової іхтіофауни Київського водосховища // *Фізичні методи в екології, біології та медицині: Матеріали IV Міжнарод. конф., Львів; Шацьк, 15—18 вер. 2011 р.* — Львів: Вид. центр Львів. ун-ту. — С. 97—99.
10. *Питкянен Г.Б., Зайцев Ю.А.* Особенности радиационных условий развития икры пресноводных рыб, относящихся к различным экологическим группам // *Экология.* — 1977. — № 6. — С. 73—75.
11. *Рябов И.Н.* Радиоэкология рыб водоёмов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС: по материалам экспедиционных исследований. — М.: Т-во науч. изд. КМК, 2004. — 215 с.
12. *Савинский А.К., Попов В.И., Кулямин В.А.* Спектры ЛПЭ и коэффициент качества инкорпорированных радионуклидов: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 144 с.

13. *Шеханова И.А.* Радиозэкология рыб. — М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1983. — 208 с.
14. *Handbook* for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment / Ed. by J. Brown, P. Strand, Al. Hosseini. — Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003. — 395 p.
15. *Polikarpov G.G.* Conceptual model of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionising radiation in the environment // *Radiation Protection, Dosimetry*. — 1998. — Vol. 75, N 1—4. — P. 181—185.

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

Поступила 03.04.13