РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ. РАДИОЭКОЛОГИЯ, 2019, том 59, № 1, с. 75–81

РАДИОЭКОЛОГИЯ

УДК 613.648:574:57.087:51-76

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БИОТЫ

© 2019 г. С. В. Панченко[1,*], П. А. Блохин[1], П. А. Кизуб[1], Е. А. Гаврилина[1]

[1] *Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия*

** E-mail: panch@ibrae.ac.ru*

Поступила в редакцию 14.05.2018 г.

Проанализированы результаты расчетов значений дозовых коэффициентов для внешнего облучения широкого круга видов биоты, находящихся в атмосфере, водной среде и почве, выполненные с помощью прецизионной программы, моделирующей перенос излучения. В результате выявлены зависимости значений коэффициентов от исходных параметров. Полученные зависимости будут использованы для разработки инженерной программы, позволяющей для расширенного круга референтных видов с заданным пользователем весом выполнять оценки доз внешнего облучения для энергий γ-квантов в диапазоне энергий от 0.1 до 2 МэВ.

Ключевые слова: референтные виды биоты, доза внешнего облучения, методы Монте-Карло, радионуклиды

DOI: 10.1134/S0869803119010077

Для целого ряда прикладных задач в области проектирования и эксплуатации радиационно-опасных объектов зачастую результатов мониторинга оказывается недостаточно для выполнения оценок радиационного воздействия на объекты биоты с приемлемой точностью в связи с ограниченным числом этих данных или вовсе их отсутствием. Оценка возможных доз на биоту важна также при решении проблем ликвидации ядерного наследия [1] для обоснования долгосрочной безопасности особых радиоактивных отходов, размещенных на начальном этапе развития атомной отрасли в различных ландшафтах [2]. Во многих подобных случаях традиционно прибегают к моделированию условий облучения специально отобранных видов живых организмов.

Многообразие природы, выраженное как в устойчивых биоценозах, существующих в течение длительных периодов времени, так и в быстро протекающих сукцессиях, широчайшее разнообразие видов и недостаточно изученное многофакторное антропогенное влияние на сложные биотические системы создают обширный спектр задач, подлежащих решению в относительно короткие сроки. Подходы для решения каждой из задач различаются в зависимости от комплекса исходных событий, выбранного биоценоза, системы внутривидовых отношений референтных видов, скорости протекания различных биологических и физических процессов. Настоящая работа посвящена подготовке данных для разработки удобного для практики программного обеспечения, требуемого для расчета доз внешнего облучения отдельных видов биоты, обитающих в различных ландшафтных провинциях России, чей жизненный цикл протекает в различных средах (воздух, вода, почва). Рассматриваются виды весом от 20 мг (муравей) до 200 т (синий кит).

Для обоснования защищенности объектов окружающей среды Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) в своей публикации № 108 [3] взяла на вооружение аналогично ранее принятой концепции “Референтного человека” концепцию “Референтных животных и растений”, предложенную R.J. Pentreath [4]. При этом охват радионуклидов достаточно представительный (75 радионуклидов), а вот количество рассматриваемых видов ограничивается десятком так называемых “референтных видов”. В перспективе декларируется, что по мере накопления эмпирических данных список референтных видов будет расширяться. Российская Федерация обладает самой большой территорией и широким разнообразием природных ландшафтов. В этой связи целесообразно, придерживаясь рекомендаций МКРЗ, расширить список референтных видов с учетом региональных особенностей размещения объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Такая необходимость может возникнуть и при сравнительной оценке предполагаемых площадок размещения ОИАЭ и оценках возможного ущерба для окружающей среды в связи с размещением нового объекта. В подобных случаях желательно иметь удобный и

Таблица 1. Элементный состав референтных видов, воды, почвы и воздуха

Элемент	Массовая доля, %				
	животные	растения	вода	почва	воздух
H	10.15	9.04	11.2		
O	65.99	76.31	88.8	55.6	21.2
C	18.27	10.04			
N	3.05				78.8
Ca	1.52	0.30			
P	1.02				
Si				36.1	
Al				8.1	
Fe		4.01			
K		0.30			
Плотность, г/см^3	1.00	1.00	1	1.6	0.0012

простой расчетный инструментарий, с помощью которого можно оценивать дозовые нагрузки для более широкого круга видов биоты.

Расчет доз внешнего облучения от источников ионизирующего излучения (ИИИ) является традиционной задачей в области обеспечения радиационной безопасности. Расчетам полей излучения источников с защитой и без защиты посвящено множество публикаций. Многие полезные для расчетов параметры представлены в справочных изданиях. Для российского читателя здесь можно сослаться на популярное 4-е издание справочника В.П. Машковича и А.В. Кудрявцевой [5].

Так же как и для человека для расчета дозовых коэффициентов внешнего облучения биоты от γ-излучающих ИИИ, распределенных в различных средах, в передовых странах используют трудоемкие и затратные по времени программы, где реализованы методы Монте-Карло. Результаты расчетов по таким программам выполняются для ограниченного круга входных данных, которые затем транслируются в более простые расчетные программные модули. Данная методология распространена повсеместно: в США программный комплекс “RESRAD” [6], в Европейских странах программы “ERICA” [7, 8] и более ранняя версия “FASSET” [9]. В РФ на основе публикаций МКРЗ № 108 и № 114 [3, 10] разработаны простые расчетные модули [10, 12], которые нашли свое применение на практике [13, 14]. Однако упомянутые российские расчетные модули опирались на уже рассчитанные дозовые коэффициенты, которые охватывали лишь небольшое число видов биоты. Для расширения списка референтных видов можно либо искать корреляции между разными видами на основе уже имеющихся коэффициентов, уточненные значения которых приведены в Публикации МКРЗ № 136 [15], либо провести новые расчеты коэффициентов для более широкого круга организмов, с прицелом на дальнейшую интерполяцию полученных значений. Поскольку список референтных видов, для которых насчитаны дозовые коэффициенты, весьма ограничен, более целесообразным является второй путь, открывающей к тому же возможности более детального анализа зависимостей дозовых коэффициентов от различных факторов. Результаты расчетов по оценке дозовых коэффициентов внешнего облучения различных организмов получены для 18 видов биообъектов. Для пяти из них дозовые коэффициенты представлены в публикации МКРЗ [15].

Цель настоящей работы – анализ результатов выполненных расчетов по отечественной программе стохастического моделирования и формирование более простых алгоритмов для оценки доз внешнего облучения при практических расчетах.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе рассмотрены три среды обитания живых организмов: воздушная, водная и почвенная (рассматривается верхний слой почвы до 50 см). Расчет дозовых коэффициентов выполняли для организмов, имеющих существенно разные аллометрические параметры – от небольшого муравья весом 0.02 г до синих китов весом около 200 т. Расчеты для крупных животных проводились с целью выявления зависимостей коэффициентов от веса организма. Всего расчеты выполнены для 18 видов. Элементный состав для животных и растений, который использовали в расчетах, приведен в табл. 1.

Зависимость средневзвешенных дозовых коэффициентов от формы тела имеет для большин-

ства рассматриваемых видов непринципиальное значение [15]. В сложившейся международной практике часто тела биообъектов для упрощения расчетных моделей задаются в виде цилиндра или эллипсоидов. В наших расчетах использовался цилиндр [16].

В качестве источника внешнего γ-излучения выбраны отдельные радионуклиды, с учетом их биологической значимости и радиационных характеристик (разные энергии испускаемых γ-квантов). В почве – это ^{141}Ce, ^{212}Pb, ^{131}I, ^{103}Ru, ^{137}Cs, ^{95}Nb, ^{110m}Ag, ^{60}Co, ^{40}K и ^{124}Sb; в воде – ^{141}Ce, ^{131}I, ^{103}Ru, ^{95}Nb, ^{40}K и ^{124}Sb; в воздухе – ^{133}Xe, ^{85m}Kr, ^{87}Kr и ^{41}Ar. Источник задавали равномерно распределенным в среде обитания референтного вида (вода, почва или воздух), и он имел изотропное угловое распределение.

В расчетах выбранный вид биоты размещался в среде его обитания (вода, почва или воздух), которая задавалась в виде призмы с размерами, зависящими от длины свободного пробега фотонов моделируемых энергий и размеров собственно животного таким образом, чтобы погрешность расчета не превышала 5%. Расчетные модели подробно описаны [16]. Расчетные исследования с такой точностью можно выполнить только с применением так называемых прецизионных программ, к которым относятся программы, реализующие методы Монте-Карло. Прецизионными принято называть те программы, когда при точно заданной геометрии расчета методическая составляющая погрешности сводится к минимуму, а больший вклад в нее определяется используемыми константами. Хотя исторически в нашей стране такие программы разрабатывались для решения задач проектирования и эксплуатации ядерных реакторов, со временем они стали настолько универсальными, что стало возможным их применение и к рассматриваемой проблематике.

Для расчета дозовых коэффициентов использовали Монте-Карло программу MCU [17], возможности которой позволяют корректно задавать пользователю как точную геометрию биообъекта, защиты, источника ионизирующего излучения, так и другие характеристики последнего (энергию, распределение и пр.).

Расчеты дозовых коэффициентов проводили для мощности поглощенной дозы в различных участках фантома организма. Для крупных животных характерным является распределение мощности поглощенной дозы по объему тела, т.е. различные органы животного получают различные дозы внешнего облучения. Иллюстрацией этому служат дозовые коэффициенты для слона в случае нахождения радионуклидов в воздушной среде (рис. 1).

Однако на практике в настоящее время поглощенная доза нормируется в целом на организм,

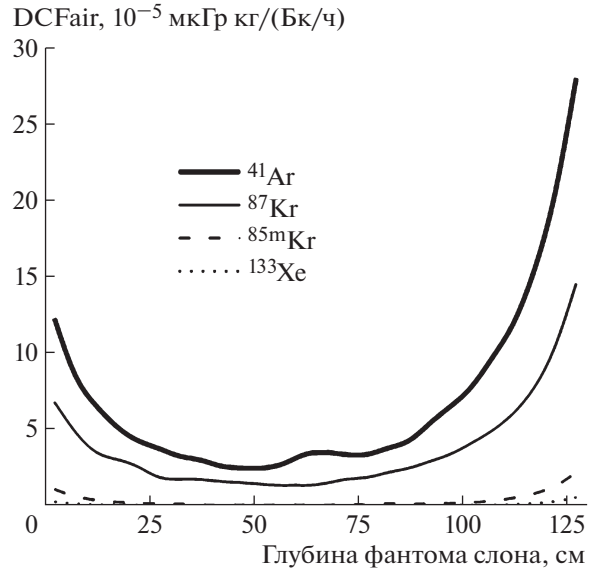

Рис. 1. Распределение дозовых коэффициентов в глубь фантома слона для разных радионуклидов (среда – воздух); 0 см – низ живота; 125 см– верхняя часть спины.

поэтому в дальнейшем мы анализировали средневзвешенную по объему мощность дозы внешнего облучения – $DCF_{k,\,p}(E)$. Здесь нижний индекс "k" означает среду, в которой находится организм; индекс "p" – некоторые стандартные физические параметры выбранного вида; E – энергия источника на один распад, МэВ/(Бк с).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов коэффициентов внешнего облучения от источников γ-квантов различных энергий на рекомендованные виды биоты показали хорошее совпадение с аналогичными расчетами [6–9, 18]. В табл. 2 приведены результаты расчетов дозовых коэффициентов разными программными средствами.

Полученные результаты расчетов дозовых коэффициентов анализировали на предмет их зависимости от энергии γ-квантов, размеров организма и среды обитания. Для воздушной среды обитания значение имеют энергия ИИ и размеры животного, причем последние наиболее существенны для больших энергий (рис. 2). При энергии чуть более 1 МэВ (^{41}Ar) разница между дозами для слона и мыши составляет примерно 4 раза в пользу слона, т.е. для него средневзвешенная по объему доза меньше. Понятно, что самая высокая доза в воздухе будет у птиц, особенно у тех, кто высоко летает, связано это с большим пробегом γ-квантов в воздухе, когда реализуется почти 4π геометрия.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета дозовых коэффициентов внешнего облучения ($DCF_{water}(E)$) для рыбы среднего размера разными программными средствами

Радионуклид	Наш расчет	МКРЗ-108	FASSET D3	RESRAD	Отношение расчета к МКРЗ-108	Отношение расчета к FASSET	Отношение расчета к RESRAD
^{141}Ce	9.24E-04	9.5E-04		9.36E-04	0.97		0.99
^{60}Co		3.2E-02	3.36E-02	3.12E-02			
^{137}Cs		7.2E-03	7.20E-03	6.96E-03			
^{131}I	4.68E-03	4.8E-03	4.80E-03	4.80E-03	0.98	0.98	0.98
^{40}K	1.92E-03	2.3E-03	2.30E-03		0.83	0.83	
^{95}Nb	9.29E-03	9.7E-03	9.84E-03	9.60E-03	0.96	0.94	0.97
^{103}Ru	6.00E-03	5.9E-03		5.76E-03	1.02		1.04
^{124}Sb	2.01E-02	2.4E-02		2.30E-02	0.84		0.87

Энергетическая зависимость дозовых коэффициентов достаточно хорошо аппроксимируется степенными функциями для различных видов биоты (значение коэффициента корреляции близко к 1). Примеры такой аппроксимации представлены в табл. 3.

Здесь $DCF_{air,\,p}(E)$ рассчитан для j-го организма со стандартными (характерными) физическими параметрами. Представленные в табл. 3 зависимости могут использоваться в расчетных модулях для всех γ-излучающих радионуклидов в диапазоне от 0.1 до 2 МэВ.

Для водной среды различия между организмами разного размера еще больше, так при энергиях около 1 МэВ (например, ^{95}Nb) дозовый коэффициент для малька почти на два порядка величины выше, чем для кита (рис. 3), что в немалой степени обусловлено и большей разницей в размерах этих существ.

Примеры аппроксимации энергетической зависимости дозовых коэффициентов для водных организмов представлены в табл. 4.

Для почвенной фауны характерно существенно меньшее разнообразие размеров, что предопределяет и существенно меньшую изменчи-

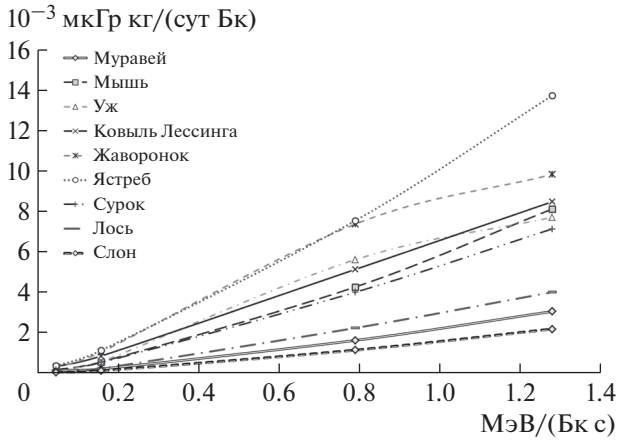

Рис. 2. Зависимость дозовых коэффициентов для различных видов при воздействии ИИ от различных источников, равномерно распределенных в воздушном пространстве.

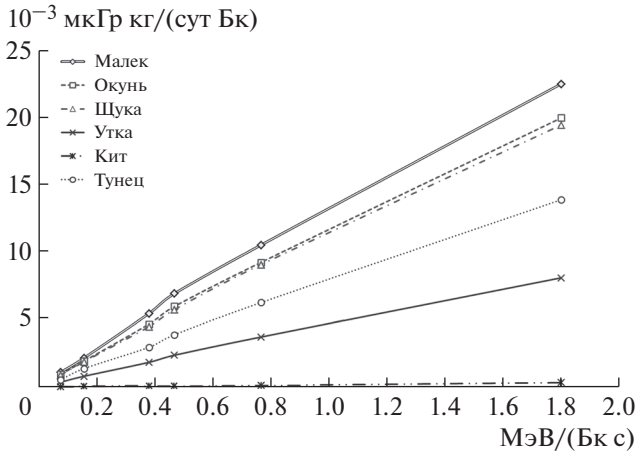

Рис. 3. Зависимость дозовых коэффициентов для различных видов при воздействии ИИ от различных источников, равномерно распределенных в водной среде.

Таблица 3. Аппроксимация значений дозовых коэффициентов внешнего облучения биоты в воздушной среде в зависимости от выделяемой энергии при одном распаде радионуклида

Биологический объект	Формула, мкГр/сут кг/Бк
Воздушная среда	
Муравей	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.002E^{0.961}$
Мышь	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0056E^{1.189}$
Уж	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0062E^{1.207}$
Ковыль Лессинга	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0063E^{1.011}$
Жаворонок	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0083E^{1.126}$
Ястреб	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.01E^{1.105}$
Сурок	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0051E^{1.173}$
Косуля	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0045E^{1.251}$
Лось	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0029E^{1.318}$
Слон	$DCF_{\text{air},\,p}(E) = 0.0015E^{1.378}$

Таблица 4. Аппроксимация значений дозовых коэффициентов внешнего облучения в водной среде в зависимости от выделяемой энергии при одном распаде радионуклида

Биологический объект	Формула, мкГр/сут кг/Бк
Водная среда	
Малек	$DCF_{\text{water},\,p}(E) = 0.0136E^{0.971}$
Окунь	$DCF_{\text{water},\,p}(E) = 0.0119E^{0.979}$
Щука	$DCF_{\text{water},\,p}(E) = 0.0116E^{0.984}$
Утка*	$DCF_{\text{water},\,p}(E) = 0.0048E^{0.991}$
Тунец	$DCF_{\text{water},\,p}(E) = 0.0081E^{1.020}$
Кит	$DCF_{\text{water},\,p}(E) = 0.0002E^{1.172}$

Примечание. * Предполагается, что большую часть времени на воде утка находится на поверхности водоема.

вость дозовых коэффициентов в зависимости от вида организма (рис. 4).

Как показано в работе [16], энергетическую зависимость дозовых коэффициентов можно для рассматриваемых видов биоты выразить с приемлемой точностью одним соотношением:

$$DCF_{\text{in soil}}(E) = {}^{\text{почва}}\Pi_{\text{вес}}(50E - 0.6)\times 10^{-5}.$$

где ${}^{\text{почва}}\Pi_{\text{вес}}$ – поправочный коэффициент на вес организма, проводящего значительную часть жизни в почве, б/р; E – энергия γ-излучения на один распад, МэВ/(Бк с).

Поскольку форму организмов, обитающих в почве, с хорошей точностью можно описать фантомом в виде веретена или даже цилиндра, то основным параметром, влияющим на величину дозового коэффициента, будет характерный диаметр фантома. Для каждого вида диаметр связан с весом и длиной туловища. Поэтому в программном модуле пользователю предлагается использовать вес организма (как наиболее доступный параметр), а в модуле автоматически будет сделан пересчет от веса к характерному диаметру для фантома выбранного организма. Значения для поправочного коэффициента ${}^{\text{почва}}\Pi_{\text{вес}}$ могут быть получены из следующего соотношения:

$${}^{\text{почва}}\Pi_{\text{вес}} = 1.02 - 0.0087d,$$

где d – диаметр фантома для данного организма, см.

Для других сред пользователь также может варьировать весом выбранного вида биоты в пределах, заложенных в программном модуле ограничений. Поправочные коэффициенты при облучении в воздушной и водной средах можно рассчитывать по полученным соотношениям:

$${}^{\text{возд}}\Pi_{\text{вес}} = 1.14e^{-0.013d},$$

$${}^{\text{вода}}\Pi_{\text{вес}} = 1.13e^{-0.015d}.$$

Таким образом, для j-го выбранного вида с произвольным весом, который задается пользо-

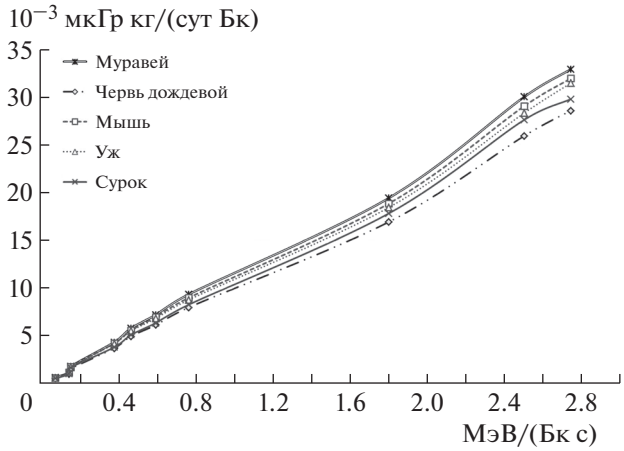

Рис. 4. Зависимость дозовых коэффициентов для различных видов при воздействии ИИ от различных источников, равномерно распределенных в верхнем слое почвы.

вателем в рамках физиологически допустимого, дозовый коэффициент можно представить в виде простых соотношений:

$$DCF_{\mathrm{air},j}(E,d) = {}^{\text{возд}}\Pi_{\text{вес}} DCF_{\mathrm{air},j,p}(E),$$

$$DCF_{\mathrm{water},j}(E,d) = {}^{\text{вода}}\Pi_{\text{вес}} DCF_{\mathrm{water},j,p}(E).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных расчетных оценок мощности средневзвешенной по объему дозы для широкого спектра биообъектов позволил выявить зависимости ее значений от энергии γ-квантов, размеров организма и среды обитания и разработать соответствующие алгоритмы.

Таким образом, при выборе референтного вида с произвольным весом и набора радионуклидов с разной энергий γ-квантов нет необходимости каждый раз использовать ресурсоемкие прецизионные программы, а достаточно произвести оценку дозовой нагрузки на выбранный вид биоты по полученным в работе соотношениям. Такое упрощение многократно сэкономит расчетное время.

Следующий шаг – создание специализированного программного средства, где будут реализованы разработанные алгоритмы. Такая программа может быть использована для решения различных вопросов по обеспечению радиационной защиты окружающей среды, оценки радиоэкологических рисков и возможных ущербов при различных сценариях облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большов Л.А., Лаверов Н.П., Линге И.И. и др.* Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Т. 1–3. М.: Энегопроманалитика, 2012, 2013, 2015.
2. Особые радиоактивные отходы / Под общ. ред. И.И. Линге. М.: ООО “САМ полиграфист”, 2015. 240 с.
3. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. 2008. Ann. ICRP 38 (4-6).
4. *Pentreath R.J.* Concept and Use of Reference Animals and Plants // Protection of the Environment from Effects of Ionizing Radiation. IAEA-CN-109. Vienna: IAEA, 2005. P. 411–420.
5. *Машкович В.П., Кудрявцева А.В.* Защита от ионизирующих излучений. Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
6. RESRAD-BIOTA: A tool for implementing a graded approach to biota dose evaluation. ISCORS Technical Report 2004-02; DOE/EH-0676. National Technical Information Service, Springfield, VA. The Office of Health, Safety and Security. URL. http://resrad.evs.anl.gov/docs/RESRAD-BIOTA_Manual_Version_1.pdf (дата обращения: 20.04.2018).
7. *Larsson C.-M.* An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants // J. Environ. Radioact. 2008. Vol. 99. P. 1361–1370.
8. *Brown J.E., Alfonso B., Avila R et al.* The ERICA Tool // J. Environ. Radioact. 2008. Vol. 99. P. 1371–1383.
9. FASSET Deliverable 3. Dosimetric models and data for assessing radiation exposure to biota. Framework for the Assessment of Environmental Impact, Contract N° FIGE-CT-2000-00102 / Ed. G. Pröhl, JSF. Swedish Radiation Protection Authority, June 2003. P. 103.
10. Environmental Protection – Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 114. 2009. Ann. ICRP 39 (6).
11. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Рекомендации Р 52.18.820-2015. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 17.04.2015. Обнинск: НПО “Тайфун”, 2015. 60 с.
12. *Аракелян А.А., Варнавский П.В., Панченко С.В.* Программа для оценки экологического воздействия на референтные виды биоты. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619035 от 21.08.2015.
13. *Линге И.И., Ведерникова М.В., Уткин С.С. и др.* Оценка ущерба от радиационного воздействия на окружающую среду в районе расположения водоема Карачай // Вопр. радиац. безопасности. 2014. № 2. С. 34–42.
14. Научно-техническое пособие по подготовке обосновывающих материалов для принятия решения об отнесении радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам / Под ред. И.И. Линге. Версия 2.0. М.: ИБРАЭ РАН, 2014. 157 с.
15. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. 2017. Ann. ICRP 46 (2).
16. *Блохин П.А., Кизуб П.А., Панченко С.В.* Дозовые коэффициенты для оценки воздействия внешнего гамма-излучения на разные виды живых организмов. Препр. / ИБРАЭ РАН. № IBRAE-2017-09. М., 2017. 44 с.
17. *Гуревич М.И., Калугин М.А., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А.* Характерные особенности MCU-FR // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2016. Вып. 5. С. 17–21.
18. *Ulanovsky A., Pröhl G.* Tables of dose conversion coefficients for estimating internal and external radiation exposures to terrestrial and aquatic biota // Radiat. Environ. Bio-phys. 2008. V. 47. № 2. P. 195–203.

Approaches to Estimating the External Irradiation of Various Biota Species

S. V. Panchenko[a,#], P. A. Blokhin[a], P. A. Kizub[a], and E. A. Gavrilina[a]

[a] *Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: panch@ibrae.ac.ru*

Calculation results of dose rate coefficients for outer radiation exposure of the wide range of biota species found in the atmosphere, water environment, and soil have been analyzed. The estimation was carried out using the precision code to model the radiation transport. As a result, the dependencies between coefficient values and input parameters are revealed. The dependencies obtained will be used to develop the engineering program to calculate the outer radiation exposure dose rate for the extended range of referent species in the energy range of 0.1 to 2 MeV.

Keywords: reference species, external exposure dose, Monte-Carlo methods, radionuclide