

стоит в том, что калибровочные коэффициенты (коэффициент отбора совпадений и эффективность регистрации нейтронов) согласованы с эффективной массой ^{240}Pu , тем самым устраняется систематический сдвиг измерений, связанный с приближенностью модели метода.

Установлено наличие сильной отрицательной корреляции между эффективностью регистрации и коэффициентом отбора совпадений, которая приводит к повышению точности измерений массы плутония.

При калибровке предложенным способом возможно достижение высокой для неразрушающих методов точности — относительное стандартное отклонение равно нескольким десятым долям процента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ensslin N., Harker W., Krick M. e.a. Application Guide to Neutron Multiplicity Counting. LA-13422-M, 1998.
2. Carrillo L., Ensslin N., Krick M. e.a. Uncertainty Analysis for Determination of Plutonium Mass by Neutron Multiplicity. LA-UR-98-3044, 1998.
3. Böhnel K. The effect of multiplication on the quantitative determination of spontaneously fissioning isotopes by neutron correlation analysis. — Nucl. Sci. Engng, 1985, v. 90, p. 75—82.
4. Geist W., Rael C., Kroncke K. e.a. The Russian Epithermal Neutron Multiplicity Counter (RENMC). LA-UR-03-4077, 2002.
5. Harker N., Krick M. Russian ARIES INCC Software Users Manual. LA-UR-02-389. 2002.

Поступила в Редакцию 23.04.15

УДК 614.876; 574.24

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОТУ В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛЕНИНГРАДСКОЙ И БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

*Карпенко Е.И., Спиридонов С.И., Куртмулаева В.Э., Санжарова Н.И., Панов А.В., Цыгвинцев П.Н.
(ВНИИРАЭ, г. Обнинск)*

Радиационное воздействие на живые организмы на территории, прилегающей к предприятиям ядерного топливного цикла, зависит от состава и количества техногенных радионуклидов, поступающих в окружающую среду в результате их функционирования. Современный подход к радиоэкологической оценке ядерных объектов включает расчет дозовых нагрузок как на население, так и на компоненты биоты [1, 2]. Такие оценки могут быть выполнены на основе данных о составе выбросов и сбросов радионуклидов в окружающую среду с использованием моделей переноса радиоактивных веществ от источников выбросов [3, 4]. Территории размещения предприятий ядерной энергетики могут существенно различаться природно-климатическими условиями, что обуславливает особенности формирования дозы облучения человека и биоты. В этой связи представляет интерес оценка дозовых нагрузок на основе радиоэкологического мониторинга, проведенного на прилегающих к предприятиям ЯТЦ территориях.

Целями настоящей работы являются расчет дозовых нагрузок и сравнительная оценка радиационного воздействия на представительные

организмы биоты в районах расположения Ленинградской и Белоярской АЭС.

В состав Ленинградской АЭС входят четыре энергоблока с РБМК-1000, комплекс по переработке и битумированию жидких радиоактивных отходов, хранилище отработавших ТВС. Первый головной энергоблок был введен в эксплуатацию в 1973 г., остальные — в 1975, 1979 и 1981 гг. соответственно. Основным источником поступлений радиоактивных веществ в окружающую среду — газоаэрозольные выбросы. В районе размещения Ленинградской АЭС располагаются также НИТИ им. А.П. Александрова, РосРАО, ЗАО «Экомет-С».

На территории Белоярской АЭС находятся в стадии подготовки к выводу из эксплуатации первые два энергоблока с водографитовыми реакторами АМБ-100, -200, действующий энергоблок № 3 с БН-600 и строящийся № 4 с натриевым теплоносителем БН-800. В непосредственной близости от БН-800 располагается ОАО «ИРМ» с реакторной установкой ИВВ-2М.

На основе информации о содержании радиоактивных веществ в окружающей среде на рассматриваемых территориях была разработана база данных об удельной активности радио-

нуклидов в воде, других компонентах водных экосистем, почве, наземной растительности, сельскохозяйственных культурах и продукции, приземном слое атмосферы.

Дозовые нагрузки на представительные виды биоты в районе расположения Ленинградской и Белоярской АЭС по данным радиоэкологического мониторинга рассчитаны с помощью программного средства ERICA, разработанного в рамках международного проекта Европейского союза, МКРЗ и МАГАТЭ [5, 6]. Проект ERICA нацелен на решение научных, управленческих и общественных проблем, связанных с воздействием радиационного фактора на компоненты окружающей среды. В интегрированном программном пакете ERICA подход к разработке дозиметрических моделей базируется на дозовых коэффициентах.

Дозовые нагрузки на наземные и водные экосистемы рассчитаны с использованием набора представительных организмов биоты, обоснованного в Публикации 108 МКРЗ [7]. Для оценки дозы облучения биоты были выбраны организмы с учетом наибольшей распространенности на рассматриваемых территориях: дождевой червь, крыса, пчела, травянистое растение, сосна, лягушка, утка и форель.

Дозовые нагрузки на биоту в районе расположения Ленинградской АЭС. При расчете мощности дозы облучения компонентов наземных экосистем удельная активность радионуклидов разных слоев почвы была усреднена. При расчете с помощью программного средства ERICA учитывали дочерние ^{226}Ra и ^{232}Th , период полураспада которых составляет не более 10 сут. При выборе исходной информации использовали консервативный подход (предельная оценка), в рамках которого рассматривали наиболее загрязненные участки. Ими оказались компоненты наземных экосистем ЗАО «Копорье» и водных экосистем р. Систы. Удельная активность ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почве ЗАО «Копорье» составила 64,3, 989, 27,2, 37,6 Бк/кг соответственно, объемная активность ^3H , ^{137}Cs , ^{90}Sr в р. Систе — 6,2, 0,013, 0,0042 Бк/л соответственно. Дозовые нагрузки на биоту на других участках меньше дозовых нагрузок, оцененных на основе консервативного подхода.

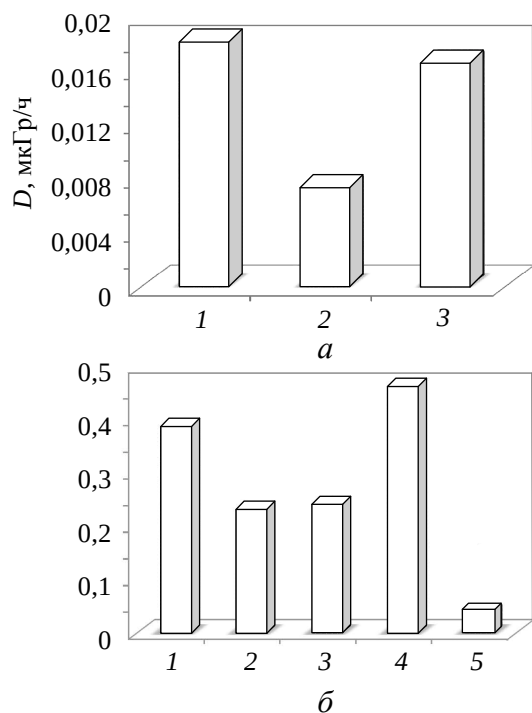
Основным источником радиационного воздействия на водные организмы является внутреннее облучение, существенно превышающее вклад внешнего облучения. Для представительных организмов наземных экосистем преобладающий вклад в дозовую нагрузку также вносит внутреннее облучение, источниками которого являются радионуклиды, поглощаемые с пищей и водой наземными животными или поступающие в растения за счет корневого усвоения.

Оценен вклад отдельного радионуклида в дозовую нагрузку на наземные и водные организмы. Дозовая нагрузка представителей водных экосистем обусловлена, главным образом, ^{137}Cs (до 99%), вклад ^3H и ^{90}Sr незначителен и составляет меньше 1%. Наибольший вклад в дозу облучения пчелы, травянистого растения, крысы и дождевого червя вносит ^{226}Ra (49—88%). Для сосны главным дозообразующим радионуклидом является ^{40}K (до 54%). Вклад ^{232}Th в облучение представителей наземной биоты составляет 2—16%. Таким образом, суммарная дозовая нагрузка на представительные наземные организмы от естественных радионуклидов в 10—100 раз больше, чем от техногенных радионуклидов (рис. 1).

Дозовые нагрузки варьируют вследствие различий в коэффициентах перехода радионуклидов из окружающей среды в организм животного или растения, неодинаковых размеров и формы организмов, а также факторов обитания, учитывающих долю времени их пребывания на загрязненной территории. Среди наземных организмов наибольшая дозовая нагрузка у дождевого червя, который обитает в верхнем слое почвы, аккумулирующем долгоживущие радионуклиды, другие организмы подвергаются воздействию внешнего облучения только от поверхности почвы.

Дозовые нагрузки на биоту в районе расположения Белоярской АЭС. В расчетах использовали те же допущения, что и при оценке дозовых нагрузок на биоту в районе размещения Ленинградской АЭС.

Дозовую нагрузку оценивали на компоненты наземных экосистем на территории, прилегающей к дер. Ольховке в районе Ольховского болота, и водной экосистемы р. Ольховки. Тех-



Р и с. 1. Суммарная дозовая нагрузка на представительные организмы водных (а) — лягушка (1), утка (2), форель (3) и наземных экосистем (б) — пчела (1), травянистое растение (2), крыса (3), дождевой червь (4), сосна (5) в районе расположения Ленинградской АЭС

ногенное загрязнение Ольховского болота произошло до 1980 г. при работе первой очереди Белоярской АЭС. Санитарные нормы и правила, действующие до 1979 г., не ограничивали объем сбрасываемых дебалансных вод. Определяющим параметром при сбросе была допустимая концентрация радиоактивных веществ. Вследствие многолетних сбросов дебалансных вод первой очереди концентрация радионуклидов в болоте достигла $3 \cdot 10^{12}$ ГБк. Суммарное содержание радионуклидов в Ольховском болоте по оценке, выполненной с помощью модели и натурных исследований, на 1995 г. составило, Бк: ^{90}Sr $5,9 \cdot 10^{10}$, ^{137}Cs $1,9 \cdot 10^{12}$, ^{60}Co $3,8 \cdot 10^{11}$ [8]. За 6 лет с 1989 по 1995 г. концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs снизилась на 15—20%, ^{60}Co — в 2 раза. Суммарная концентрация ^{137}Cs и ^{60}Co в донных отложениях на 2010 г. составляла, 10^9 Бк: 200 и 2,4 соответственно.

Удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде р. Ольховки больше, чем р. Систы (табл. 1). По этой причине дозовые нагрузки на компоненты водных экосистем р. Ольховки в 10 раз превышают дозу облучения водных организмов, обитающих в р. Систе.

Т а б л и ц а 1. Удельная активность радионуклидов в воде р. Ольховки

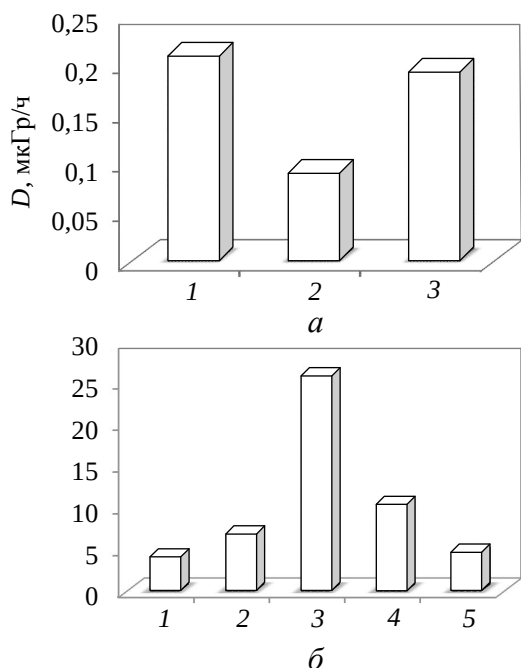
Радионуклид	Вода, Бк/л	Донные отложения, Бк/кг
^{90}Sr	$1,96 \cdot 10^{-2}$	42
^{137}Cs	0,145	3500
^3H	54	—
^{60}Co	—	10
^{226}Ra	—	9

Удельная активность ^{137}Cs и ^{40}K в почве в районе дер. Ольховки составляет 34 и 0,18 кБк/кг соответственно. Максимальная удельная активность ^{137}Cs в почве в районе расположения Белоярской АЭС в 1000 раз больше по сравнению с этим показателем для Ленинградской АЭС. Это обуславливает значительное различие в дозовых нагрузках на наземные организмы, обитающие на прилегающих к рассматриваемым АЭС территориях.

Оценен вклад отдельных радионуклидов в дозовую нагрузку на наземные и водные организмы. Дозовая нагрузка на водные и наземные экосистемы в районе расположения Белоярской АЭС обусловлена, главным образом, ^{137}Cs (76—99%). Вклад естественных радионуклидов в суммарную дозу облучения биоты составляет менее 8%.

На рис. 2, а видно, что наибольшую дозовую нагрузку имеет лягушка, наименьшую — утка. Результаты ранжирования водных организмов по мощности дозы облучения на территориях, прилегающих к Белоярской и Ленинградской АЭС, являются одинаковыми: лягушка—форель—утка. Наибольшую дозовую нагрузку среди представительных наземных организмов имеет крыса, наименьшую — пчела и сосна (рис. 2, б). Результаты ранжирования этих организмов по мощности дозы облучения для территорий, прилегающих к Ленинградской и Белоярской АЭС, не совпадают, что обусловлено разным радионуклидным составом в исходных данных. При расчете дозовых нагрузок на биоту в районе расположения Ленинградской АЭС учитывались дозовые нагрузки от ^{226}Ra и ^{232}Th . Необходимо отметить, что вклад ^{226}Ra составляет более 50% по сравнению с другими радионуклидами.

Анализ показал, что при равной удельной активности ^{226}Ra и ^{137}Cs в воде и почве дозовые



Р и с. 2. То же, что на рис. 1, в районе расположения Белоярской АЭС

нагрузки на наземные и водные организмы от ^{226}Ra значительно превышают эти показатели от ^{137}Cs .

Оценка индекса радиационного воздействия. Поскольку влияние радиоактивных выбросов на объекты окружающей среды определяется не только дозовыми нагрузками, но и радиочувствительностью этих объектов, для оценки действия ионизирующего излучения биоту использовали индекс радиационного воздействия. Этот показатель представляет собой отношение дозы облучения компонентов биоты от техногенных радионуклидов D к критическим дозовым нагрузкам для биоты $D_{\text{кр}}$ [9]:

$$K_{\text{р.в}} = \frac{D}{D_{\text{кр}}}. \quad (1)$$

Если $K_{\text{р.в}} > 1$, тогда можно считать в рамках принятых представлений, что биота не защищена от воздействия ионизирующего излучения, если $K_{\text{р.в}} < 1$, — защищена.

В настоящее время нет однозначно утвержденных критериев защиты окружающей среды от воздействия ионизирующего излучения, хотя в международных соглашениях и законодательных актах отмечается значимость этой проблемы. По этой причине в расчетах использовали разные предельные дозовые нагрузки. В документе МКРЗ [3] предложены стандарты мощности предельной дозы хронического облучения, $\mu\text{R/h}$: 416 — для защиты популяций водных животных и наземных растений, 41,6 — наземных животных. Более жесткий дозовый стандарт для биоты рекомендован в рамках проекта Европейской комиссии ERICA — 10 $\mu\text{R/h}$. Эта величина используется в настоящее время некоторыми национальными агентствами по защите окружающей среды, в частности, в Великобритании.

Индекс радиационного воздействия, который рассчитан с использованием стандартов [4] для растительности территорий Белоярской и Ленинградской АЭС, не превышает 1 (табл. 2). Таким образом, рассматриваемые природные объекты являются защищенными от воздействия ионизирующего излучения. Если в качестве предельной мощности дозы рассматривать жесткий критерий 10 $\mu\text{R/h}$ в рамках наиболее консервативного подхода к оценке влияния радиационного фактора на биоту, то и в этом случае доза облучения наземных растений не превышает порогового значения (индекс радиационного воздействия меньше 1). Таким образом, расчетами выявлено, что сосна и травянистая растительность являются защищенными от воз-

Т а б л и ц а 2. Индекс радиационного воздействия в районе расположения АЭС

Экосистема	Организмы	Предел мощности дозы облучения, мкГр/ч			
		416		10	
		АЭС			
		Ленинградская	Белоярская	Ленинградская	Белоярская
Наземная	Сосна	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	0,5
	Травянистое растение	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,7
Водная	Лягушка	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$
	Форель	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
	Утка	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$

действия ионизирующего излучения в районе расположения Ленинградской и Белоярской АЭС.

Доза облучения наземных животных, обитающих в регионе расположения Ленинградской АЭС, не превышает стандарты (табл. 3). В районе расположения Белоярской АЭС представители наземных экосистем являются защищенными от воздействия ионизирующего излучения при условии использования стандартов предельной дозы МКРЗ. В то же время дозовая нагрузка на дождевого червя и крысу превышает предел 10 мкГр/ч.

Т а б л и ц а 3. Индекс радиационного воздействия для наземных животных в районе расположения АЭС

Представитель экосистемы	Предел мощности дозы облучения, мкГр/ч			
	41,6		10	
	АЭС			
	Ленинградская	Белоярская	Ленинградская	Белоярская
Дождевой червь	$4,8 \cdot 10^{-4}$	0,25	$2 \cdot 10^{-3}$	1,1
Крыса	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,6	$4,9 \cdot 10^{-3}$	2,6
Пчела	$2 \cdot 10^{-4}$	0,1	$8,2 \cdot 10^{-4}$	0,4

Индекс радиационного воздействия для представителей водных экосистем в районе расположения Ленинградской и Белоярской АЭС не превышает 1, следовательно, они являются защищенными от воздействия радиационного фактора при любых стандартах предельной дозы (см. табл. 2).

Сравнивая индексы радиационного воздействия на водную и наземную биоту в районах расположения Ленинградской и Белоярской АЭС, можно сделать вывод о том, что наибольшему воздействию подвергаются представители наземных экосистем.

Заключение. В результате сравнительной оценки воздействия радиационного фактора на биоту в районах расположения Ленинградской и Белоярской АЭС выявлено, что наземные животные и растения подвержены большему воздействию ионизирующего излучения по сравнению с водными организмами. Основным дозообразующим радионуклидом для представителей организмов водных экосистем является ^{137}Cs (вклад в суммарную мощность дозы

облучения достигает 99%). Водные организмы в районе расположения Ленинградской и Белоярской АЭС являются защищенными от радиационного воздействия при любых пределах мощности дозы. Следует отметить, что в районе расположения Белоярской АЭС дождевой червь и крыса получают дозовую нагрузку, превышающую наиболее жесткий стандарт предельной мощности дозы облучения 10 мкГр/ч. Это не означает, что на популяционном или организменном уровне могут быть выявлены какие-либо негативные эффекты. В то же время представляется целесообразным проведение цитогенетических исследований на территории, прилегающей к Белоярской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексахин Р.М.** Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 5, с. 243—249.
2. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.** Имитационные модели динамики экосистем в условиях антропогенного воздействия ТЭС и АЭС. М.: Энергоиздат, 1990. 184 с.
3. **Шарпан Л.А., Карпенко Е.И., Спиридонов С.И.** Оценка дозы облучения населения в результате атмосферных выбросов Ростовской АЭС. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 3, с. 163—166.
4. **Спиридонов С.И., Карпенко Е.И., Шарпан Л.А.** Ранжирование радионуклидов и путей облучения по вкладу в дозовую нагрузку на население, формирующуюся в результате атмосферных выбросов атомных электростанций. — Радиационная биология. Радиоэкология, 2013, т. 53, № 4, с. 401—410.
5. **Brown J., Alfonso B., Avila R.** The ERICA tool. — J. Environmental Radioactivity, 2008, v. 99, № 9, p. 1371—1383.
6. **Beresford N., Brown J., Copplestone D.** D-ERICA: an Integrated Approach to the Assessment and Management of Environmental Risks from Ionising Radiation. Description of Purpose, Methodology and Application. EC Project Contract № FI6R-CT-2004-508847, 2007.
7. **Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants.** ICRP Publication 108. — Ann. ICRP, 2009, v. 38, № 4—6, p. 1—242.
8. **Колтик И.И.** Атомные электростанции и радиационная безопасность. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2001. 368 с.
9. **Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Гераськин С.А. и др.** Сравнительная оценка радиационного воздействия на биоту и человека в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС. — Радиационная биология. Радиоэкология, 2004, т. 44, № 6, с. 618—626.

Поступила в Редакцию 10.03.15