

В. В. Журавков
V. V. Zhuravkov
zhvl@mail.ru
А. П. Голубев
A. P. Golubev
algiv@rambler.ru

УО «Международный государственный экологический институт имени А.Д.Сахарова»
Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь
International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,
Minsk, Republic of Belarus

**ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК И ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК
ИЗЛУЧЕНИЯ НА РЕФЕРЕНТНЫЕ ВИДЫ ВОДНОЙ БИОТЫ БЕЛОРУССКОГО
СЕКТОРА ЗОНЫ ЧАЭС**

**ESTIMATION OF DOSE LOADS AND VARIABILITY OF RADIATION
CHARACTERISTICS FOR REFERENT SPECIES OF AQUATIC BIOTAS OF THE
BELARUSIAN SECTOR OF THE ChNPP ZONE**

Аннотация. В период с 2014–2015 гг. была определена активность радионуклидов ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am в водной толще донных отложениях и доминирующих видах макрофитов и моллюсков в двух водоемах белорусского сектора ближней зоны ЧАЭС. По этим данным рассчитаны значения мощности поглощенных доз при облучении для доминирующих видов биоты водоемов от указанного комплекса радионуклидов.

Abstract. In 2014–2015 we determined the activity of the most abundant radionuclides ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{241}Am in the water column, bottom sediments and dominant species of macrophytes and mollusks in two water bodies of the Belarusian sector of the near zone of the ChNPP. These data were used to calculate the values of the absorbed dose rate during internal exposure for the dominant biota of water bodies from the indicated complex of radionuclides.

Ключевые слова: ближняя зона ЧАЭС, озеро Персток, Борщевское затопление, ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am , вода, донные отложения, макрофиты, моллюски, поглощенные дозы ионизирующей радиации.

Keywords: the near zone of the Chernobyl nuclear power plant, Perstok Lake, Borshchevskaya waterlogging, ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{241}Am , water, bottom sediments, macrophytes, mollusks, absorbed doses of ionizing radiation.

Авария на Чернобыльской АЭС привела к значительному радиоактивному загрязнению водоемов 30-км зоны отчуждения целым комплексом из около 30 техногенных

радионуклидов с резко различными периодами полураспада. В первый месяц после аварии основной вклад в формирование дозы внешнего облучения в порядке убывания вносили ^{136}Cs , ^{95}Nb , ^{140}La , ^{95}Zr , β -изотоп ^{144}Pr , ^{91}Y , ^{89}Sr , ^{140}La , ^{143}Pr , ^{140}Ba , ^{95}Zr , ^{141}Ce , ^{86}Rb , ^{136}Cs и ^{95}Nb . За 30-летний послеаварийный период радиационное загрязнение основных компонентов экосистем (донные отложения, вода, биота) проточных водоемов зоны ЧАЭС значительно снизилось. Это обусловлено как радиоактивным распадом короткоживущих изотопов с периодами полураспада от нескольких суток (^{131}I , ^{239}Np и др.) до 1–2 лет (^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{134}Cs др.), так и их выносом течением воды в нижележащие участки рек. Если осенью 1986 г. в моллюсках зоны ЧАЭС регистрировалось до 15 радионуклидов, то в 1987 г. – 7, в 1988 г. – 5, а в 1989 г. – лишь 4 (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce и ^{106}Ru). Начиная с 2002 г., в донных отложениях и биоте водоемов зоны ЧАЭС уверенно регистрировались лишь ^{90}Sr и ^{137}Cs . С другой стороны, радиационное загрязнение малопроточных водоемов ближней (15-км) зоны ЧАЭС и в настоящее время остается достаточно высоким.

В 2014–2015 гг. была определена активность важнейших дозообразующих радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{241}Am) в основных компонентах экосистем (вода, донные отложения, биота) озера Персток и Борщевского затопления – соответственно с наивысшим и средним для водоемов белорусского сектора зоны ЧАЭС уровнями радиационного загрязнения. На этой основе проведены расчеты вклада каждого радионуклида в суммарные дозы ионизирующей радиации от внутреннего облучения для доминирующих видов биоты этих водоемов – макрофитов и легочных моллюсков.

Донные отложения отбирали на расстоянии 30–50 см от уреза воды на глубине 20–30 см поршневым пробоотборником с внутренним диаметром 43 мм. Пробы воды вместе с сестоном отбирали в местах отбора проб грунта на расстоянии 1,5–2 м от уреза воды, где глубина водоема достигала 0,8–1,0 м. Отобранные в водоемах макрофиты в лаборатории гомогенизировали посредством разрезания на мелкие фрагменты размером до 2–3 см. При возможности у отдельных видов макрофитов пробы разделяли на стебель и корни.

Активность ^{90}Sr и ^{137}Cs определяли на гамма-бета спектрометре МКС-АТ1315 Научно-производственного объединения «Атомтех» (Беларусь). Спектрометр обеспечивает регистрацию спектра γ - и β -излучения в диапазоне энергий соответственно 50–3000 кэВ и 150–3500 кэВ. Определение активности ^{241}Am проводили в гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором на основе высокочистого германия с композитным углеродным окном фирмы «Canberra» (США) с многоканальным анализатором DSA 1000.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ [1], при незначительных плотностях радиоактивных выпадений наиболее рациональным при расчетах мощности поглощенной дозы (МПД) является консервативный подход. Он заключается в том, что параметры для оценок МПД

выбираются для условий максимальных содержаний радионуклидов в исследуемой среде. В наших исследованиях МПД для организмов биоты водоемов зоны ЧАЭС для 2016 г. произведены только для внутреннего облучения, поскольку, вклад внешнего облучения в общие величины МПД в 2016 г. оказался исчезающе малым.

В работе представлена оценка вклада основных дозообразующих на сегодняшний день дозообразующих радионуклидов для биоты водоемов зоны ЧАЭС – ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{241}Am . Поскольку радиоактивный распад первых двух радионуклидов происходит в две стадии с образованием промежуточных короткоживущих радионуклидов (соответственно ^{90}Y и ^{137}Ba) расчеты МПД произведены суммарно для изобар $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ и $^{137}\text{Cs} + ^{137}\text{Ba}$.

Суммарное значение МПД от отдельного радионуклида определено по формуле:

$$D_j = \sum_i (CR_{ji}^{water\ fresh} \cdot f_j^{water\ fresh} \cdot C_i^{water\ fresh} \cdot DC_{ji})$$

где $CR_{ji}^{water\ fresh}$ – коэффициент перехода i -го радионуклида из пресной воды в организм j -го вида биоты, $(\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ сырой массы организма}) / (\text{Бк} \cdot \text{л}^{-1})$;

$f_j^{water\ fresh}$ – доля времени, проводимая j -м видом биоты в пресной воде, отн. единицы.

Поскольку все исследованные нами виды являлись водными организмами, это значение для них принято равным единице.

$C_i^{water\ fresh}$ – концентрация i -го радионуклида в пресной воде, $\text{Бк} \cdot \text{л}^{-1}$;

DC_{ji} – дозовый коэффициент перехода от активности в теле j -го организма к дозе внутреннего облучения от i -го радионуклида, $(\text{мкГр} \cdot \text{сут}^{-1}) / (\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ сырой массы организма})$.

Погрешность приведенных ниже расчетов составляет порядка 50%. На неопределённость результатов оценок влияют региональные условия, определяющие интенсивность миграционных процессов, вариабельность дозовых коэффициентов основных дозообразующих радионуклидов, а также такие субъективные причины, как перечень контролируемых радионуклидов в объектах природной среды [2]. Для верификации оценки дозовых нагрузок на биоту использовался on-line калькулятор, разработанный Международной комиссией по радиационной защите [3].

В таблице 1 приведена объемная активность важнейших дозообразующих радионуклидов в компонентах экосистемы озера Персток в 2014–2015 гг., в таблице 2 объемная активность важнейших дозообразующих радионуклидов в компонентах экосистемы Борщевского затопления в 2014–2015 гг.

Таблица 1. Объемная активность радионуклидов в озере Персток в 2014–2015 гг.

Компонент экосистемы, единицы изменения	Год	Активность		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²⁴¹ Am
Вода взболтанная; Бк·л ⁻³	2014	19,4 ± 4,6	< 20*	< 0,25*
Вода отстоянная; надосадочный слой; Бк·л ⁻³	2014	8,1 ± 2,2	< 20*	< 0,25*
	2015	9.3 ± 3,0	< 20	< 0.25
Донные отложения, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	6551 ± 1310	2596 ± 547	62 ± 12
Донные отложения, кБк·м ⁻² Бк·м ⁻²	2014	468 ± 94	185 ± 39	4,4 ± 0,9
	2015	250 ± 50	105 ± 23	2.48 ± 0.57
<i>Typha angustifolia</i> , корень мытый, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	11 241 ± 2248	2006 ± 424	202 ± 39
<i>Typha angustifolia</i> , стебель; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	750 ± 200	2800 ± 600	6,2 ± 1,8
	2015	684 ± 215	3700 ± 750	< 3.8
<i>Stratiotes aloides</i> , листья; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	9500 ± 1900	24 700 ± 4900	76 ± 16
	2015	40 100 ± 900	23 400 ± 760	5,4 ± 2,3
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> , листья; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	11 100 ± 2200	18 200 ± 3600	93 ± 19
	2015	660 ± 170	12 000 ± 2400	--*
<i>Lymnaea stagnalis</i> , <i>Coretus corneus</i> , все тело, Бк·кг ⁻¹ сырой массы	2015	660 ± 170	12 000±2400	--*
<i>Viviparus viviparus</i> , все тело, Бк·кг ⁻¹ сырой массы	2015	780 ± 170	1400 ± 310	--*
<i>Viviparus viviparus</i> , раковина, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой	2015	303 ± 118	18 598 ± 3720	--*

* ниже минимально детектируемой активности; ** – не проводили

Таблица 2. Объемная активность радионуклидов Борщевского затопления в 2014–2015 гг.

Компонент экосистемы, единицы изменения	Год	Объемная активность		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²⁴¹ Am
Водная толща, Бк·л ⁻³	2014	< 2,5*	< 20*	< 0,20*
	2015	2,5 ± 2,0	< 20*	< 0,20*
Донные отложения, Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	3062 ± 612	165 ± 72	22,3 ± 4,4
	2015	4376±582	898±219	35,8 ± 8,3
Донные отложения, Бк·м ⁻²	2014	217 ± 43,4	11,8 ± 5,1	1,6 ± 0,3
	2015	212 ± 43.0	61.0 ± 22.9	2.6 ± 0.26
<i>Acorus calamus</i> , стебель; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	519 ± 161	13 50 ± 300	4,9 ± 1,9
	2015	1380 ± 350	3 320 ± 740	4,8 ± 2,5
<i>Acorus calamus</i> , корень мытый; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	3780 ± 780	1350±300	4,5±1,9
	2015	2459±538	5292± 1085	26.5±12.5
	2015	2700±650	8747±1749	27,0±7,0
<i>Myriophyllum spicatum</i> , стебли; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2014	2807 ± 626	5465± 1093	36,7 ± 7,2
	2015	3587±774	4078±816	48.1±11.1
<i>Typha angustifolia</i> , стебли; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2015	311±149	1441±355	< 2.3
<i>Typha angustifolia</i> , корень мытый; Бк·кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	2015	1755 ± 414	685 ± 24	14,5 ± 3,8

* ниже минимально детектируемой активности.

Результаты оценки поглощённых доз у доминирующих видов биоты в озере Персток и Борщевском затоплении в июле 2014 г., представлены в таблице 3.

Таблица 3. Поглощённые дозы ионизирующей радиации у доминирующих видов биоты водоемов зоны ЧАЭС в июле 2014 г.

Вид, орган	Поглощенная доза, мкГр·сутки ⁻¹ ± 25%		
	¹³⁷ Cs + ¹³⁷ Ba	⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	²⁴¹ Am
Озеро Персток			
<i>Typha angustifolia</i> , стебель	1,6 (16,3)*	8,10 (82,9)	0,07 (8,0)
<i>Typha angustifolia</i> , корень	2,6 (37,7)	2,90 (42,0)	1,4 (20,3)
<i>Stratiotes aloides</i> , стебель	1,7 (6,1)	26,0 (92,6)	0,3 (1,3)
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i> , стебель	1,8 (6,9)	24,0 (91,5)	0,43 (1,6)
Борщевское затопление			
<i>Stratiotes aloides</i> , стебель	1,0 (15,4)	5,30 (81,5)	0,20 (3,1)
<i>Myriophyllum spicatum</i> , стебель	0,52 (7,6)	6,10 (89,5)	0,20 (2,9)
<i>Acorus calamus</i> , стебель	0,23 (8,0)	2,60 (90,0)	0,06 (2,0)
<i>Lymnaea stagnalis</i> , все тело	0,61 (1,0)	63,0 (99,0)	Ниже МДА

* в скобках – вклад каждого радионуклида в суммарную эквивалентную дозу, %

Таким образом, учитывая снижение активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs и параллельный рост активности ²⁴¹Am в воде, донных отложениях и биоте, уже в ближайшие десятилетия ²⁴¹Am станет важнейшим дозообразующим фактором для биоты малопроточных водоемов ближней зоны ЧАЭС. Согласно последним оценкам, нижний предел безопасных доз ионизирующей радиации для биотических сообществ пресных водоемов составляет 240 мкГр·сутки⁻¹ [4]. Полученные нами данные значения МПД существенно ниже этого предела (табл. 3). Тем не менее, подобные дозы могут вызывать определенные изменения на молекулярно-генетическом уровне [5], что способствует постепенному накоплению сублетальных мутаций в последовательных поколениях.

Список литературы

1. Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards. Vienna : IAEA, 1992. 78 p. (Technical Report series ; no. 332).
2. Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Radionuclides for Biota in the Marine Environment. Vienna : IAEA, 2004. 95 p. (Technical Report series ; no. 422).
3. Numerical benchmarks for protecting biota against radiation in the environment: Proposed levels, underlying reasoning and recommendation / Andersson P., Beaugelin-Seiller K. Beresford N. A. et all. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 2008. 72 p.
4. Пресноводные моллюски в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС: динамика содержания радионуклидов, дозовые нагрузки, цитогенетические и гематологические исследования / Гудков Д. И. и др. // Гидробиологический журнал. 2010. Т. 46, № 3. С. 86–104.