

Partnership for Sustainable Development) и проекта “Transfer-Exposure-Effects (TREE): Integrating the science needed to underpin radioactivity for humans and wildlife (Ref: NE/000393/1), финансируемого Научным советом охраны окружающей среды (NERC) Великобритании. Авторы выражают признательность руководству и сотрудникам государственных специализированных предприятий «Экоцентр» и «Чернобыльская АЭС» за содействие при выполнении полевых работ на водоемах ЧЗО, а также аналитических исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Andersson, P., Garnier-Laplace, J., Beresford, N. A. et al.* Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context (PROTECT): proposed numerical benchmark values // Journal of Environmental Radioactivity. – 2009. – Vol. 100. – P. 1100–1108.
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Publication 108. Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants // Annals of the ICRP. – 2008. – Vol. 38, Nos 4–6. – 251 p.
3. *Tsytsugina, V. G.* An indicator of radiation effects in natural populations of aquatic organisms // Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – Vol. 75, № 1–4. – P. 171–173.
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly with Scientific Annex. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Annex: Effects of radiation on the environment. – New York: United Nations, 1996. – 86 p.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E: Effect of ionizing radiation on non-human biota. – New York: United Nations, 2011. – 164 p.

## ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ОТ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

## EXPOSURE DOSE ASSESSMENT OF THE POPULATION LIVING IN THE AREA OF NUCLEAR FUEL CYCLE ENTERPRISES FROM VARIOUS TYPES OF WATER USE

**Д. И. Гусейнова**

**D. Huseinava**

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus  
dianahuseinava@gmail.com*

Представлены пути облучения населения от предприятий ядерного топливного цикла при водопользовании. Приведен метод расчета годовых эффективных доз по всем путям внешнего и внутреннего облучения для различных возрастных групп при водопользовании.

Population exposure pathways from nuclear fuel cycle enterprises in water use are demonstrated in the article. A method for calculating annual effective doses in all ways of external and internal exposure for different age groups in water use is given.

**Ключевые слова:** эффективная доза, ядерный топливный цикл, пути воздействия, внешнее облучение, внутреннее облучение, радионуклиды, дозовый коэффициент.

**Keywords:** exposure dose, nuclear fuel cycle, exposure pathways, external irradiation, internal exposure, radionuclides, dose coefficients.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-341-344>

Оценка доз облучения населения, проживающего в районе размещения предприятий ядерного топливного цикла (далее – ЯТЦ) производится с учетом результатов анализа водной системы, определения видов водопользования на критических участках и соответствующих путей облучения населения, расчетов факторов разбавления в типовых элементах водной системы, определения перечня нормируемых радионуклидов и источников сбросов.

Пути облучения населения определяются исходя из анализа водопользования и жизнедеятельности населения в районе расположения ЯТЦ. Необходимо учитывать следующие пути облучения населения при водопользовании:

- внешнее облучение при купании в водном объекте;
- внешнее облучение при плавании и ловле рыбы;

- внешнее облучение от пребывания на пляже;
- внешнее облучение от пребывания на заливных землях;
- внешнее облучение от пребывания на орошаемых сельскохозяйственных угодьях;
- внутреннее облучение от потребления рыбы;
- внутреннее облучение от овощной продукции с орошаемых сельскохозяйственных угодий;
- внутреннее облучение от потребления мяса и молока скота, в организм которого радионуклиды попадают за счет водопоя и выпаса на орошаемых землях;
- внутреннее облучение, обусловленное потреблением питьевой воды;
- внутреннее облучение от заглатывания воды при купании.

Доза внешнего облучения населения при купании может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{kyn} = Q_i \times \Phi_i \times 3.15 \times 10^7 \times F_{i,ext} \times \tau_{kyn}, \quad (1)$$

где  $Q_i$  – годовой сброс радионуклидов, Бк/год;

$\Phi_i$  – значение факторов разбавления на критических участках, год/м<sup>3</sup>;

$3.15 \times 10^7$  – количество секунд в году;

$F_{i,ext}$  – дозовый коэффициент внешнего облучения, (Зв×м<sup>3</sup>)/(Бк×с);

$\tau_{kyn}$  – время, затрачиваемое на купание в течение года, выраженное в долях года.

Доза внешнего облучения населения при плавании и ловле рыбы может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{рыбака} = Q_i \times \Phi_i \times 3.15 \times 10^7 \times F_{i,ext} \times \tau_{рыб}, \quad (2)$$

где  $\tau_{рыб}$  – время, затрачиваемое на ловлю рыбы в течение года, выраженное в долях года.

Доза внешнего облучения населения, обусловленная пребыванием на пляже, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{пляж} = Q_i \times \Phi_i \times 3.15 \times 10^7 \times 0.2 \times f_i \times \rho_s \times \Delta \times K_d^i \times \tau_{пляж}, \quad (3)$$

где  $f_i$  – дозовый коэффициент, от поверхностного загрязнения почвы  $i$ -ым радионуклидом с единичной поверхностной активностью, (Зв×м<sup>2</sup>)/(Бк×с);

$\rho_s$  – плотность загрязненной почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta$  – толщина загрязненного радионуклидами слоя почвы, м;

$K_d^i$  – коэффициент межфазного распределения «вода-почва», м<sup>3</sup>/кг;

$\tau_{пляж}$  – время, затрачиваемое на пребывание на пляже в течение года, выраженное в долях года.

Коэффициент межфазного распределения «вода-почва» может быть рассчитан по формуле:

$$K_d^i = 6 \times \frac{1 - e^{-\lambda_i \times T_e}}{\lambda_i \times T_e} \times K_{no,i}, \quad (4)$$

где  $\lambda_i$  – постоянная распада радионуклида, год<sup>-1</sup>;

$T_e$  – эффективное время накопления радионуклидов в донных отложениях, год;

$K_{no,i}$  – коэффициент межфазного распределения радионуклидами между водой и донными отложениями, м<sup>3</sup>/кг.

Доза внешнего облучения населения, обусловленная пребыванием на заливных землях, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{залив} = Q_i \times \Phi_i \times 3.15 \times 10^7 \times f_i \times \rho_s \times \Delta \times K_d^i \times \tau_{залив}, \quad (5)$$

где  $\tau_{залив}$  – время, затрачиваемое на пребывание на заливных землях в течение года, выраженное в долях года.

Доза внешнего облучения населения, обусловленная пребыванием на орошаемых водой территориях, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{op} = Q_i \times \Phi_i \times 3.15 \times 10^7 \times f_i \times q_{op} \times \frac{1 - e^{-\lambda_i \times T_{op}}}{\lambda_i} \times \tau_{op}, \quad (6)$$

где  $q_{op}$  – расход воды на орошение, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>×год;

$T_{op}$  – эффективное время накопления радионуклидов в донных отложениях, год;

$\tau_{op}$  – время пребывания на орошаемых территориях, выраженное в долях года.

Годовое потребление пищевых продуктов лицами из различных возрастных групп рассчитывается по формуле:

$$I_{i,f} = \frac{E_g}{E_{g=6}} \times I_{f,g=6}, \quad (7)$$

где  $f$  – индекс, обозначающий пищевой продукт (рыба, мясо, молоко, плодовоовощная продукция);

$g$  – возрастная группа, являющаяся критической по потреблению пищевого продукта (1 – «дети в возрасте до 1 года», 2 – «дети в возрасте 1-2 года», 3 – «дети в возрасте 2-7 лет», 4 – «дети в возрасте 7-12 лет», 5 – «дети в возрасте 12-17 лет», 6 – «взрослые»);

$E_g$  – суточные энергетические затраты для возрастной группы  $g$ , ккал/сут;

$E_{g=6}$  – суточные энергетические затраты для возрастной группы «взрослые», ккал/сут;

$I_{f,g=6}$  – годовое потребление продукта  $f$  лицом из возрастной группы «взрослые», кг/год.

Доза внутреннего облучения населения, обусловленная потреблением рыбы, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{рыб} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times I_{i,рыб} \times K_{i,рыб}, \quad (8)$$

где  $F_{ing}^i$  – дозовый коэффициент при пероральном пути поступления радионуклида, Зв/Бк;

$I_{i, \text{рыб}}$  – годовое потребление рыбы лицом из возрастной группы, кг/год;

$K_{i, \text{рыб}}$  – коэффициент накопления  $i$ -го радионуклида в рыбе, м<sup>3</sup>/кг.

Доза внутреннего облучения населения, обусловленная потреблением плодовоовощной продукции, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{\text{овош}} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times I_{i, \text{овощ}} \times K_{i, \text{овощ}}, \quad (9)$$

где  $I_{i, \text{овощ}}$  – годовое потребление овощей лицом из возрастной группы, кг/год;

$K_{i, \text{овощ}}$  – коэффициенты перехода  $i$ -го радионуклида из воды по пищевым цепочкам, м<sup>3</sup>/кг.

Доза внутреннего облучения населения, обусловленная потреблением молока и мяса домашнего скота, в организме которого радиоактивные вещества попадают за счет водопоя, может быть рассчитана по формулам:

$$H_{i,j}^{\text{молоко(wp)}} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times I_{i, \text{молоко(wp)}} \times K_{i, \text{молоко(wp)}}, \quad (10)$$

$$H_{i,j}^{\text{мясо(wp)}} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times I_{i, \text{мясо(wp)}} \times K_{i, \text{мясо(wp)}}, \quad (11)$$

где  $I_{i, \text{молоко (wp)}}$ ,  $I_{i, \text{мясо (wp)}}$  – годовое потребление молока и мяса местного производства лицом из возрастной группы по пероральному пути поступления  $i$ -го радионуклида, соответственно;

$K_{i, \text{молоко (wp)}}$ ,  $K_{i, \text{мясо (wp)}}$  – коэффициенты перехода радионуклидов из воды по пищевым цепочкам в молоко и мясо скота за счет его водопоя, м<sup>3</sup>/кг.

Коэффициенты перехода по молочной и мясной цепочкам за счет водопоя скота могут рассчитываться по формулам:

$$K_{i, \text{молоко(wp)}} = F_{i, \text{молоко}}^m \times Q_{\text{молоко}}^w \times e^{-\lambda_i \times T_m}, \quad (12)$$

$$K_{i, \text{мясо(wp)}} = F_{i, \text{мясо}}^f \times Q_{\text{мясо}}^w \times e^{-\lambda_i \times T_f}, \quad (13)$$

где  $F_{i, \text{молоко}}^m$  – доля активности  $i$ -го радионуклида (от суточного потребления корма скотом), которая попадает в литр молока, сут/л;

$F_{i, \text{мясо}}^f$  – доля активности  $i$ -го радионуклида (от суточного потребления корма скотом), которая попадает в килограмм мяса, сут/кг;

$Q_{\text{молоко}}^w$  – суточный объем воды, потребляемый молочным скотом, м<sup>3</sup>/сут;

$Q_{\text{мясо}}^w$  – суточный объем воды, потребляемый мясным скотом, м<sup>3</sup>/сут;

$T_m$  – время между надоем молока и его потреблением, сут;

$T_f$  – время между забоем скота и потреблением мяса, сут.

Доза внутреннего облучения населения, обусловленная потреблением молока и мяса домашнего скота, в организме которого радиоактивные вещества попадают за счет выпаса на орошаемых пастбищах, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{\text{молоко(past)}} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times I_{i, \text{молоко(past)}} \times K_{i, \text{молоко(past)}}, \quad (14)$$

$$H_{i,j}^{\text{мясо(past)}} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times I_{i, \text{мясо(past)}} \times K_{i, \text{мясо(past)}}, \quad (15)$$

где  $K_{i, \text{молоко (past)}}$ ,  $K_{i, \text{мясо (past)}}$  – коэффициенты перехода радионуклидов из воды по пищевым цепочкам в молоко и мясо скота за счет его выпаса, м<sup>3</sup>/кг.

Коэффициенты перехода радионуклидов из воды по пищевым цепочкам в молоко и мясо скота за счет его выпаса могут рассчитываться по формулам:

$$K_{i, \text{молоко(past)}} = K_{i,f} \times F_{i, \text{молоко}}^m \times Q_{\text{молоко}}^m \times e^{-\lambda_i \times T_m}, \quad (16)$$

$$K_{i, \text{мясо(past)}} = K_{i,f} \times F_{i, \text{мясо}}^f \times Q_{\text{мясо}}^f \times e^{-\lambda_i \times T_f}, \quad (17)$$

где  $K_{i,f}$  – коэффициент перехода  $i$ -го радионуклида из загрязнённой воды в корм, потребляемый скотом, м<sup>3</sup>/кг (сухого веса);

$Q_{\text{молоко}}^m$  – суточная масса корма, потребляемая молочным скотом, кг (сухого вещества)/сут;

$Q_{\text{мясо}}^f$  – суточная масса корма, потребляемая мясным скотом, кг (сухого вещества)/сут.

Доза внутреннего облучения населения, обусловленная потреблением воды, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{\text{ен}} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times 10^{-3} \times V_{en}, \quad (18)$$

где  $V_{en}$  – объем воды, потребляемый человеком, м<sup>3</sup>/год.

Доза внутреннего облучения населения, обусловленная заглатыванием воды при купании, может быть рассчитана по формуле:

$$H_{i,j}^{\text{ен}} = Q_i \times \Phi_i \times F_{ing}^i \times V_{en} \times \tau_{kyn}, \quad (19)$$

где  $V_{en}$  – объем воды, заглатываемый человеком при купании, м<sup>3</sup>/год.

Годовая эффективная доза облучения населения, обусловленная воздействием <sup>3</sup>H, учитывающая сразу все возможные пути внешнего и внутреннего воздействия может быть рассчитана по формуле:

$$H_{H,j}^{mprim} = Q_H \times \Phi_i \times g_{3,H} \times 10^{-3}, \quad (20)$$

где  $g_{3,H}$  – дозовый коэффициент для  ${}^3\text{H}$ , (Зв·л)/(Бк·год);

Значения параметров, используемых для определения доз от различных путей облучения населения, устанавливаются на основании региональных натурных исследований. При отсутствии необходимых сведений допускается использование рекомендованных справочных данных.

Оценка доз облучения выполняется для различных возрастных групп:

- дети до года;
- дети 1-2 года;
- дети 2-7 лет;
- дети 7-12 лет;
- дети 12-17 лет;
- взрослые, старше 17 лет.

На основании оценки годовых эффективных доз по всем путям внешнего и внутреннего облучения при водо-пользовании может быть установлено репрезентативное лицо, которое наиболее подвержено облучению. Исходя из прогноза годовых эффективных доз облучения репрезентативного лица могут быть обоснованы допустимые сбросы радионуклидов предприятий ЯТЦ.

Таким образом, оценка доз облучения населения, проживающего в районе размещения предприятий ЯТЦ, формируются исходя из технологических процессов, происходящих на предприятиях ЯТЦ, параметров водоема, в который осуществляются сбросы, а также анализа водопользования и жизнедеятельности населения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Курындина, А. В., Строганов, А. А., Шаповалов, А. С., Тимофеев, Н. Б. Методическое пособие по вопросам регулирования выбросов и сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. Часть 2. Регулирование сбросов радиоактивных веществ в водные объекты. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2017. – 114с.
2. Киселев, В. П., Носов, А. В., Крылов, А. Л., Казаков, С. В. Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010. – 253 с.
3. РБ-126-17 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) 25 июля 2017 г. № 281. – Москва, Ростехнадзор, 2017.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШОЙ УРАНОВОЙ МИШЕНИ

### STUDY OF THE NEUTRONICS OF THE BIG URANIUM TARGET

**А. И. Дубровский, А. И. Киевицкая**  
**A. Dubrouski, A. Kiyavitskaya**

Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь  
a1dubrovskii@gmail.com  
Belarussian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

Изучение кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий, представляет большой интерес для решения проблем, связанных с трансмутацией радиоактивных отходов. В настоящей работе описаны результаты моделирования нейтронно-физических характеристик большой урановой мишени, на которой планируется проведение экспериментальных исследований, направленных на выжигание долгоживущих продуктов деления и минор-актинидов.

The study of the kinetics of accelerator-driven subcritical systems is of great interest for solution of the problems related to the transmutation of radioactive waste. It is planned an experimental research aimed at burning of long-lived fission products and minor actinides on the big uranium target. The simulation of its neutronics is described in this paper.

**Ключевые слова:** подкритические системы, управляемые ускорителями; мишень расщепления; нейтронно-физические характеристики; энергетические спектры.

**Keywords:** Accelerator Driven system; spallation target; neutronics; energy spectra.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-344-347>