

2. Тимонова, Л. В. Оптимизация методики определения газообразного трития в воздушной среде / Л. В. Тимонова, О. Н. Ляхова, Д. В. Турченко, С. Н. Лукашенко // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы: тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф., Курчатов 24–26 сент., 2014. – Курчатов, 2014. – С. 94–95.

**АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ  
ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ВСЛЕДСТВИЕ  
РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС**

**SENSITIVITY ANALYSIS OF A THYROID DOSE ASSESSMENT MODEL  
DUE TO THE RADIOACTIVE RELEASES OF NUCLEAR POWER PLANT**

**С. С. Третьякевич**  
**S. Tretyakevich**

*Департамент по ядерной и радиационной безопасности  
Министерства по чрезвычайным ситуациям,  
г. Минск, Республика Беларусь  
Tretyakevich@gosatomnadzor.gov.by*

*Department for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situation  
of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

Оценка доз облучения щитовидной железы вследствие радиоактивных выбросов АЭС содержит неопределенность, которая обусловлена несоответствием используемой модели оценки доз реальному миру и вариабельностью параметров модели оценки доз вследствие их естественной вариабельности или незнания их истинных значений. Анализ чувствительности модели оценки доз позволяет определить параметры модели, которые вносят наибольший вклад в неопределенность оценки дозы. В данной работе представлены результаты анализа чувствительности модели реконструкции индивидуальных доз облучения щитовидной железы жителей Беларуси вследствие аварии на Чернобыльской АЭС и подходы к анализу чувствительности модели прогноза доз облучения щитовидной железы вследствие радиоактивных выбросов АЭС при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации.

Thyroid radiation dose assessment due to the radioactive releases from NPP contains uncertainty due to the discrepancy between a model used for dose estimation and the real world and variability of parameters dose estimation model due to its natural variability or ignorance of their true values. A sensitivity analysis of a dose assessment model allows you to determine the model parameters that make the greatest contribution to the uncertainty of dose assessment. This paper presents the results of sensitivity analysis of the model for the reconstruction of individual thyroid doses to the residents of Belarus as a result of the Chernobyl accident and approaches to analyzing the sensitivity of a model for prediction of thyroid doses due to radioactive releases of nuclear power plant during its normal operation and violations of normal operation.

*Ключевые слова:* АЭС, радиоактивные выбросы, йод-131, щитовидная железа, доза облучения, неопределенность, чувствительность.

*Keywords:* NPP, radioactive releases, iodine-131, thyroid, thyroid dose, uncertainty, sensitivity.

Мировой опыт эксплуатации АЭС показал, что основной вклад в дозу облучения населения от радиоактивных выбросов АЭС в условиях нормальной эксплуатации вносят нестабильные изотопы инертных газов,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Вклад других радионуклидов, содержащихся в радиоактивных выбросах АЭС, в дозу облучения населения незначителен. Основным путем облучения щитовидной железы (ЩЖ) является поступление  $^{131}\text{I}$  в организм человека.

В радиоактивных выбросах АЭС в условиях нарушения нормальной эксплуатации, в том числе в результате аварий, также основным путем облучения ЩЖ является поступление  $^{131}\text{I}$  в организм человека.

Загрязнение территории Республики Беларусь вследствие радиоактивных выпадений в результате аварии на Чернобыльской АЭС вызвало повышение в Республике Беларусь уровня рака и другие заболеваний ЩЖ, вызванного, в основном, внутренним облучением ЩЖ от поступления в организм человека радиоактивных изотопов йода. Проведение эпидемиологических исследований, определяющих радиационный риск для различных патологий ЩЖ, требует достоверной реконструкции дозы облучения ЩЖ у обследуемых людей от всех или самых существенных источников облучения ЩЖ. Реконструкция индивидуальной дозы внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм характеризуется неопределенностью, которая обусловлена рядом факторов, основным из которых является

вариабельность параметров модели, применяемой для реконструкции дозы внутреннего облучения ЩЖ от  $^{131}\text{I}$ , обусловленная естественной вариабельностью параметров модели или незнанием их истинных значений.

Основная методология реконструкции индивидуальной дозы внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм жителей Республики Беларусь вследствие радиоактивных выпадений в результате аварии на Чернобыльской АЭС, в которой также указаны неопределенности параметров используемой модели реконструкции доз облучения ЩЖ, представлена в работах [1; 2].

В работе [3] представлен метод оценки неопределенности реконструкции индивидуальной дозы внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм. Для вычисления неопределенности оценки дозы внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм, обусловленной вариабельностью 42-х параметров используемой модели оценки дозы облучения ЩЖ с разными типами распределений [1; 2], используется метод Монте-Карло. Разработанное прикладное программное обеспечение, использующее возможности, предоставляемые системой управления базами данных Microsoft Access и встроенным в нее языком программирования Visual Basic for Application, позволяет за приемлемое время рассчитать дозы и их неопределенности для большого количества индивидов [3].

В общем случае неопределенность реконструкции дозы из-за вариабельности параметров модели определяется путем анализа чувствительности модели, который заключается в выявлении параметров модели, вносящих наибольший вклад в вариабельность конечного результата. В работе [4] чувствительность модели реконструкции дозы внутреннего облучения ЩЖ от  $^{131}\text{I}$  к вариабельности используемых в ней параметров определена с помощью метода индивидуального перебора параметров. По данному методу расчет проводится в случае, когда каждый параметр модели, кроме одного, принимает среднее значение. Параметр, для которого определяется индекс чувствительности, принимает последовательно максимальное и минимальное значение. При нормальном или логнормальном распределении значений параметра модели в качестве минимума и максимума использовались значения параметра, соответствующие 2,5 и 97,5 процентилем данного распределения.

Количественный анализ чувствительности модели оценки доз облучения ЩЖ осуществляется путем определения индекса чувствительности для каждого параметра модели, рассчитываемого по следующей формуле [4]:

$$SI = \left| 1 - \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \right|, \quad (1)$$

где  $SI$  – индекс чувствительности параметра модели, безразмерный;

$D_{\min}$  – минимальная доза облучения ЩЖ при минимальном или максимальном значении параметра модели, мГр;

$D_{\max}$  – максимальная доза облучения ЩЖ при минимальном или максимальном значении параметра модели, мГр.

Из формулы (1) следует, что значения индекса чувствительности варьируются в пределах от 0 до 1. Близкие к единице значения указывают на то, что модель, используемая для расчетов, наиболее чувствительна к вариабельности данного параметра.

В работе [4] продемонстрировано, что при наличии прямых инструментальных измерений мощности экспозиционной дозы (МЭД) над ЩЖ [2] основная неопределенность реконструкции индивидуальной дозы внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм обусловлена вариабельностью только двух параметров применяемой модели: 1) измеренным содержанием  $^{131}\text{I}$  в ЩЖ и 2) массой ЩЖ [4].

Неопределенность оценки индивидуальной дозы внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм, рассчитанной без использования прямых инструментальных измерений МЭД над ЩЖ, обусловлена большим количеством параметров модели оценки дозы. Значение индекса чувствительности большее 0,4 имеют, в порядке убывания, 10 параметров модели реконструкции доз облучения ЩЖ: 1) суточные выпадения  $^{131}\text{I}$ ; 2) коэффициент перехода  $^{131}\text{I}$  из пищи коровы в молоко; 3) отношение содержания  $^{131}\text{I}$  в козьем молоке к содержанию  $^{131}\text{I}$  в коровьем молоке; 4) масса ЩЖ; 5) суточное потребление козьего молока; 6) суточное потребление коровьего молока из частного хозяйства; 7) урожайность пастбищной травы; 8) коэффициент задержки  $^{131}\text{I}$  пастбищной травой; 9) коэффициент перехода  $^{131}\text{I}$  из крови в ЩЖ; 10) суточное потребление коровьего молока из торговой сети [4].

Общие положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001-15, вошедшие в действие в Российской Федерации, устанавливают новые требования к анализам безопасности АЭС. Анализы безопасности должны сопровождаться оценкой неопределенности полученных результатов. Таким образом, прогноз доз облучения ЩЖ вследствие радиоактивных выбросов АЭС при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации должна сопровождаться оценкой неопределенности.

В связи с большим количеством параметров, входящих в модель прогнозной оценки доз облучения ЩЖ вследствие радиоактивных выбросов АЭС, целесообразно на начальном этапе выполнить анализ чувствительности параметров данной модели, чтобы сосредоточить усилия на оценке характеристик распределений наиболее значимых параметров модели оценки доз облучения ЩЖ и дальнейшей оценке неопределенности дозы облучения ЩЖ.

Большинство моделей переноса радиоактивных веществ, выброшенных за пределы защитной оболочки блока АЭС, с целью последующей оценки доз облучения населения на различных расстояниях от АЭС основываются на многочисленных модификациях Гауссовой модели рассеяния, которые отличаются различными способами оценки горизонтальной и вертикальной дисперсий  $\sigma_y^2$  и  $\sigma_z^2$  и применяются для оценки доз облучения населения на расстояниях до 30–50 км от АЭС.

Среднегодовой метеорологический фактор разбавления в приземном слое воздуха радионуклида  $r$  на расстоянии  $x$  от источника в направлении ветра румба  $n$  в рамках Гауссовой модели рассеяния примеси в атмосфере рассчитывается в соответствии с руководством по безопасности в области использования атомной энергии РБ-106-15 [5]:

$$G_n^r(x) = \frac{\tilde{M}^c}{\tilde{M}^c + \tilde{M}^w} \cdot G_n^{r,c}(x) + \frac{\tilde{M}^w}{\tilde{M}^c + \tilde{M}^w} \cdot G_n^{r,w}(x), \quad (2)$$

$$G_n^{r,c}(x) = \frac{2 \cdot N \cdot \Psi_n^c}{(2 \cdot \pi)^{3/2} \cdot x} \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{k=2}^K \frac{\omega_{n,j,k}^c \cdot F_{j,k}^r}{\sigma_{z,j}(x) \cdot U_{j,k}} \cdot \Phi\left(\frac{\pi \cdot x}{\sqrt{2N} \cdot \sigma_{y,j}(x)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(h_s + \Delta h_{j,k}^c)^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right), \quad (3)$$

$$G_n^{r,w}(x) = \frac{2 \cdot N \cdot \Psi_n^w}{(2 \cdot \pi)^{3/2} \cdot x} \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{k=2}^K \frac{\omega_{n,j,k}^w \cdot F_{j,k}^r}{\sigma_{z,j}(x) \cdot U_{j,k}} \cdot \Phi\left(\frac{\pi \cdot x}{\sqrt{2N} \cdot \sigma_{y,j}(x)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(h_s + \Delta h_{j,k}^w)^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right), \quad (4)$$

где  $G_n^{r,c}(x)$ ,  $G_n^{r,w}(x)$  – среднегодовые метеорологические факторы разбавления в приземном слое воздуха радионуклида  $r$  на расстоянии  $x$  от источника в направлении ветра румба  $n$  в холодный и теплый периоды года, соответственно, с/м<sup>3</sup>;

$N, n$  – общее число и номер румба, соответственно,  $n \in [1, N]$ ;

$J, j$  – общее число и номер градации категорий устойчивости атмосферы, соответственно,  $j \in [1, J]$ ;

$K, k$  – общее число и номер градации модуля скорости ветра на высоте флюгера, соответственно,  $k \in [1, K]$ ;

$\tilde{M}^c$ ,  $\tilde{M}^w$  – общее число используемых многолетних наблюдений в холодный и теплый период года, соответственно;

$U_{j,k}$  – модуль скорости ветра на высоте выброса  $h_s$  при скорости ветра на высоте флюгера из градации  $k$  для категории устойчивости атмосферы  $j$ , м/с;

$\sigma_{y,j}^2(x)$ ,  $\sigma_{z,j}^2(x)$  – дисперсии струи по горизонтали и вертикали на расстоянии  $x$  от источника для градаций категории устойчивости  $j$ , м<sup>2</sup>;

$h_s$  – геометрическая высота вентиляционной трубы, м;

$\Delta h_{j,k}^c$ ,  $\Delta h_{j,k}^w$  – высота подъема струи над устьем трубы при скорости ветра на высоте флюгера из градации  $k$  для категории устойчивости атмосферы  $j$  за счет динамических и термических факторов в холодный и теплый период года, соответственно, м;

$\omega_{n,j,k}^c$ ,  $\omega_{n,j,k}^w$  – повторяемость метеорологических условий, заключающаяся в совместной реализации направления ветра в румбе  $n$  при категории устойчивости атмосферы  $j$  и градации скорости ветра  $k$  в холодный и теплый период года соответственно;

$\Psi_n^c$ ,  $\Psi_n^w$  – поправочные коэффициенты на штилевые условия по румбам для теплого и холодного периода года соответственно;

$F_{j,k}^r$  – фактор истощения струи за счет радиоактивного распада нуклида  $r$ , его сухого осаждения и влажного выведения из атмосферы на подстилающую поверхность (консервативно принимается, что  $F_{j,k}^r = 1$ );

$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-z^2) \cdot dz$  – интеграл вероятности.

Значения величин  $\sigma_{y,j}^2(x)$ ,  $\sigma_{z,j}^2(x)$  и  $U_{j,k}$  зависят от типа подстилающей поверхности в районе расположения АЭС.

Суточные выпадения <sup>131</sup>I определяются через среднегодовой метеорологический фактор сухого осаждения радионуклида  $r$  на подстилающую поверхность на расстоянии  $x$  от источника выброса в направлении ветра румба  $n$ , и рассчитывается по формуле [5]:

$$D_{gn}^r(x) = V_d^r \cdot G_n^r(x), \quad (5)$$

где  $V_d^r$  – скорость сухого осаждения радионуклида  $r$  на подстилающую поверхность, м/с.

Для оценки неопределенности метеорологического фактора разбавления, для параметров уравнений, определяющих фактор метеорологического разбавления, применяется относительная неопределенность равная 0,4. Параметры уравнений, определяющие фактор метеорологического разбавления, описываются нормальным типом распределения.

Результаты оценки неопределенности среднегодового приземного фактора метеорологического разбавления на различных расстояниях от точки выброса, для различных условий состояния атмосферы и состояния подстилающей поверхности позволяют сделать вывод, что фактор метеорологического разбавления описывается распределением логарифмически нормального типа с неопределенностью в терминах геометрического стандартного отклонения от 1,2 до 1,6.

Таким образом, на неопределенность оценки дозы внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм, рассчитанной без использования прямых инструментальных измерений МЭД над ЩЖ, будут влиять, в порядке убывания, следующие параметры модели прогноза внутреннего облучения ЩЖ от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм: 1) суточные выпадения  $^{131}\text{I}$ ; 2) коэффициент перехода  $^{131}\text{I}$  из пищи коровы в молоко; 3) масса ЩЖ; 4) скорость ветра на высоте выброса; 5) суточное потребление коровьего молока из частного хозяйства; 6) урожайность пастбищной травы; 7) коэффициент задержки  $^{131}\text{I}$  пастбищной травой; 8) коэффициент перехода  $^{131}\text{I}$  из крови в ЩЖ; 9) горизонтальная и вертикальная дисперсия рассеяния на расстоянии  $x$  от источника; 10) суточное потребление коровьего молока из торговой сети.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Миненко, В. Ф. Определение поглощенных доз облучения щитовидной железы жителей населенных пунктов Республики Беларусь: метод. указания, утв. 20.02.03 г. / В. Ф. Миненко и др.; НИКИ радиационной медицины и эндокринологии МЗ РБ. Минск, 2003.
2. Drozdovitch, V. Thyroid Dose Estimates for a Cohort of Belarusian Children Exposed to Radiation from the Chernobyl Accident / Drozdovitch, V. et al. // Radiat. Res. – 2013. – № 179. – Р. 597–609.
3. Третьякевич, С. С. Применение метода Монте-Карло для расчета неопределенности дозы облучения щитовидной железы / С.С. Третьякевич // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого. – 2005. – № 3. – С. 59–66.
4. Третьякевич, С. С. Вариабельность реконструкции индивидуальной дозы облучения щитовидной железы от поступления  $^{131}\text{I}$  в организм / С. С. Третьякевич // Чернобыльские чтения–2008: материалы междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 24–25 апр. 2008 г. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь, Респ. науч.-практ. центр радиационной медицины и экологии человека; под общ. ред. А. В. Рожко. – Гомель: КИНУП «Сож», 2008. – С. 291–292.
5. Курындин, А. В. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» (РБ 106-15) / А. В. Курындин, А. А. Строганов, А. С. Шаповалов, Н. Б. Тимофеев. – М. : Ростехнадзор, 2015. – 74 с.

## ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ КАК ОБЪЕКТ ЭКОЛОГО-ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

## ATOMIC ENERGY WASTE MANAGEMENT AS OBJECT OF ECOLOGICAL AND LEGAL REGULATION

**С. А. Шестовская**  
**S. Shastouskaya**

*Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным  
ситуациям Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь*  
*beatlesveta@gmail.com*

*Department for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations  
of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

Отходы атомной энергетики являются новым видом радиоактивных отходов для Республики Беларусь, поэтому они представляют особый интерес для исследования правовых проблем обращения с данными видами отходов. С учетом того, что технические решения, обеспечивающие окончательное решение вопроса, связанного с захоронением, на данный момент окончательно не определены и, учитывая потенциальную опасность радиоактивных отходов для человека и окружающей среды, в настоящей статье освещаются специфика и признаки обращения с отходами атомной энергетики как объекта эколого-правового регулирования.

Nuclear waste is a new type of radioactive waste for the Republic of Belarus and for this reason it is of special interest for research of legal problem this type of waste. In this case technical solutions for radioactive waste disposal have not been found yet, and considering potential hazard to human beings and the environment in this article are highlighting specific and signs of nuclear waste management like an object ecological and legal regulation.

*Ключевые слова:* радиоактивные отходы, экологические отношения, объект, регулирование, атомная станция, окружающая среда.

*Keywords:* radioactive waste, environmental relations, object, regulation, nuclear power plant, environment.

На 2019 г. запланирован ввод в эксплуатацию первого энергоблока Белорусской атомной электростанции. Эксплуатация атомной электростанции неизбежно сопровождается образованием и накоплением радиоактивных отходов на протяжении срока ее эксплуатации (60 лет), а также в период вывода из эксплуатации стан-