

## Новые методические приемы оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС

В.А. Яковлев, Г.Я. Брук

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

*Статья посвящена изучению закономерностей формирования доз внутреннего облучения взрослого населения Брянской области за счет потребления основных дозообразующих пищевых продуктов в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС и методическим особенностям оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения. Предложен новый методический подход к расчету прогнозируемых доз внутреннего облучения населения, базирующийся на одноэкспоненциальной модели изменения дозы с периодом ее полууменьшения, зависящим от времени. Полученные результаты позволили уточнить прогнозируемые дозы внутреннего облучения населения Брянской области на период до 2056 г. Аналогичный подход (одноэкспоненциальная модель) применен и в отношении внешнего облучения. Это позволило рассчитать прогнозируемые дозы суммарного (внешнее + внутреннее) облучения населения. В качестве примера в статье приведено распределение всех населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой средней годовой эффективной дозы облучения населения и его критических (наиболее облучаемых) групп в разные периоды времени после аварии.*

**Ключевые слова:** Чернобыльская авария, население, радиоактивное загрязнение, цезий-137, цезий-134, доза облучения, прогнозируемая доза.

### Введение

К зонам радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в Брянской области относятся 749 населенных пунктов<sup>1</sup> (НП). Значительно пострадали также Тульская, Калужская и Орловская области. Кроме этих 4 областей, еще в 10 субъектах Российской Федерации имеются населенные пункты, расположенные в зонах радиоактивного загрязнения.

Вопросам исследования закономерностей формирования и прогноза доз облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС был посвящен целый ряд публикаций [1–12].

**Цель исследования** – совершенствование методических приемов оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный

период после аварии на Чернобыльской АЭС и уточнение прогноза доз внутреннего облучения населения на период до 2056 г.

### Задачи исследования

- анализ результатов измерений содержания <sup>137</sup>Cs в организме жителей Брянской области в 1987–2016 гг.;
- разработка новых методических приемов расчета прогнозируемых доз внутреннего облучения населения, базирующихся на одноэкспоненциальной модели изменения дозы с периодом ее полууменьшения, зависящим от времени;
- подготовка уточненного прогноза доз облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС территориях Брянской области, на период до 2056 г.

<sup>1</sup> Постановление Правительства РФ от 08.10.2015 № 1074 «Об утверждении перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС». [Decree of the Government of the Russian Federation № 1074, 08.10.2015 «On the establishment of the list of residential places within the boundaries of the zones, radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident» (In Russ.)]

Яковлев Вячеслав Арсентьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева  
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: yava1952@gmail.com.

**Материалы и методы**

Материалы и методы проведенных исследований подробно описаны в работе [10].

Методические указания МУ 2.6.1.2222-07 определяют требования к необходимым исходным данным и процедуру расчета прогнозируемых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие выброса в окружающую среду радионуклидов цезия и стронция (<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr).

В соответствии с этими методическими указаниями (МУ), основными параметрами, определяющими порядок расчета прогнозируемых доз внутреннего облучения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС, являются «медленные» эффективные периоды полураспада основных дозообразующих пищевых продуктов (молока и грибов) от <sup>137</sup>Cs за счет радиоактивного распада последнего и природного самоочищения данных продуктов со временем от этого химического элемента и эффективное годовое потребление молока и грибов лесных (дозовые эквиваленты потребления сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов) взрослыми жителями европейской части России.

Как правило, для описания изменений во времени экспериментальных данных, усредненных по годам, используют двухэкспоненциальную модель вида:

$$КП(t) \text{ или } e_{int137}(t) = d \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / T_1) + f \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / T_2), \quad (1)$$

где: t – календарный год;

t<sub>0</sub> – начало радиоактивных выпадений;

КП(t) – коэффициент перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в пищевой продукт;

e<sub>int137</sub>(t) – средняя годовая эффективная доза внутреннего облучения населения цезием-137, нормированная на плотность загрязнения почвы цезием-137;

d и f – коэффициенты, имеющие ту же размерность, что и КП(t) или e<sub>int137</sub>(t).

В этой модели T<sub>1</sub> – это средний период полураспада в интервале от момента аварии до момента, пока первое слагаемое уравнения (1) много больше второго, а T<sub>2</sub> – средний период полураспада в интервале от момента, когда второе слагаемое уравнения (1) ста-

нет много больше первого, и до конца наблюдаемого интервала.

Из уравнения (1) нельзя получить достоверные периоды полураспада изучаемых величин в наблюдаемом интервале времени (иногда достаточно коротком) и тем более за его пределами. Получаемые из уравнения (1) величины периодов полураспада всегда находятся в интервале времени от T<sub>1</sub> до T<sub>2</sub>.

**Результаты и обсуждение**

Предлагается другая (одноэкспоненциальная) модель описания изучаемых величин с периодом полураспада, зависящим от времени, которая выглядит следующим образом:

$$КП(t) \text{ или } e_{int137}(t) = a \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / T(t_0; t - t_0)), \quad (2)$$

где T(t<sub>0</sub>; t - t<sub>0</sub>) = b · (t - t<sub>0</sub>) + c.

В 1986–2016 г. Институтом радиационной гигиены на территории Брянской области в 6 наиболее загрязненных районах было проведено более 100 тысяч измерений местных жителей на счетчиках (спектрометрах) излучения человека (СИЧ) и рассчитаны для них средние годовые эффективные дозы внутреннего облучения от смеси радионуклидов цезия (<sup>134</sup>Cs и <sup>137</sup>Cs). Из этого массива данных были отобраны результаты измерений содержания <sup>137</sup>Cs и <sup>134</sup>Cs в организме взрослых жителей, проживающих с 1987 г. в сельских НП с плотностью загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs в 1986 г. от 5 до 30 Ки/км<sup>2</sup> (где фактически не применялись контрмеры). Общее количество использованных в настоящей работе данных СИЧ-измерений, выполненных институтом в 170 населенных пунктах в период 1987–2016 гг., составляет 14 663. Для них были рассчитаны средние годовые эффективные дозы внутреннего облучения e<sub>int</sub>(t) от <sup>134</sup>Cs+<sup>137</sup>Cs, нормированные на плотность загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs в соответствующий год. По этим данным были получены коэффициенты уравнения регрессии (2), которые приведены в таблице 1.

Обработку всех собранных данных по СИЧ-измерениям проводили с использованием программы статистической обработки данных IBM SPSS Statistics.

Фактические результаты определения e<sub>int(134+137)</sub>(t) и соответствующий им график уравнения регрессии приведены на рисунке 1.

Таблица 1

**Численные значения параметров уравнения (2)**

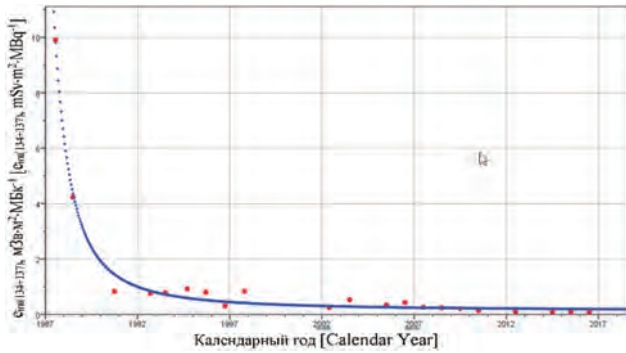
[Table 1

**Numerical data for the parameters of equation 2]**

Исследуемая величина [Parameter]	a, мЗв×м <sup>2</sup> ×МБк <sup>-1</sup> [a, mSv×m <sup>2</sup> ×MBq <sup>-1</sup> ]	b, отн. ед. [b, rel. units]	c, лет [c, years]	R <sup>2</sup>
e <sub>int(134+137)</sub> , мЗв×м <sup>2</sup> ×МБк <sup>-1</sup> [e <sub>int(134+137)</sub> , mSv×m <sup>2</sup> ×MBq <sup>-1</sup> ]	91±31	0,108±0,004	0,25±0,06	0,99

R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации.  
[R<sup>2</sup> – coefficient of determination].

<sup>2</sup> Методические указания МУ 2.6.1.2222-07 «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду». Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2007. [Methodical guidelines MU 2.6.1.2222-07 «Prognosis of the doses to the public from the radionuclides of caesium and strontium due to their fallout into the environment», Federal service for surveillance on consumer rights protection and human well-being, Moscow, 2007 (In Russ.)]



**Рис. 1.** Динамика средних годовых эффективных доз внутреннего облучения ( $e_{int(134+137)}$ ) взрослого сельского населения Брянской области за период 1987–2016 гг., нормированных на плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  в соответствующий год

[Fig. 1. Trends in the average annual effective doses from internal exposure ( $e_{int(134+137)}$ ) of the adult rural public in the Bryansk region in 1987–2016, normalized to the  $^{137}\text{Cs}$  contamination density in the corresponding year]

Суммарную среднюю годовую эффективную дозу внутреннего облучения радионуклидами цезия взрослого сельского населения Брянской области в год  $t$  рассчитывают по формуле:

$$e_{int(137+134)}(t) = k^{137} \times A^{137}(t) + k^{134} \times A^{134}(t) = e_{int137}(t) \times (1 + k^{134} \times A^{134}(t) / (k^{137} \times A^{137}(t))), \quad (3)$$

где:  $k^{137}$  и  $k^{134}$  – дозовые коэффициенты для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$  соответственно, мЗв×кг/Бк;

$A^{137}(t)$  и  $A^{134}(t)$  – удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$  в теле измеряемых жителей для года  $t$ , Бк/кг.

В МУ 2.6.1.579-96 «Реконструкция средней накопленной в 1986–1995 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году» приводятся значения дозовых коэффициентов  $k^{137} = 2,3 \times 10^{-3}$  мЗв×кг/Бк и  $k^{134} = 3,36 \times 10^{-3}$  мЗв×кг/Бк. На начало радиоактивных выпадений соотношение  $A^{134}(t_0)/A^{137}(t_0) = 0,54$ . Со временем оно будет изменяться по следующему закону:

$$A^{134}(t)/A^{137}(t) = 0,54 \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) \times (1/T_{134} - 1/T_{137})), \quad (4)$$

где:  $t$  – календарный год,  $t_0 = 1986,33$  – начало радиоактивных выпадений для Брянской области,  $T_{134} = 2,06$  года,  $T_{137} = 30$  лет.

Подставив значения дозовых коэффициентов и выражение (4) в формулу (3), получим:

$$e_{int137}(t) = \frac{e_{int(134+137)}(t)}{1 + 0,79 \cdot \exp(-0,693 \cdot (t - t_0) / 2,21)}. \quad (5)$$

Если заменить  $e_{int(137+134)}(t)$  формулой (2) с коэффициентами из таблицы 1, то уравнение регрессии для дозы внутреннего облучения от  $^{137}\text{Cs}$ , нормированной на плот-

ность загрязнения почвы этим радионуклидом, будет выглядеть следующим образом:

$$e_{int137}(t) = \frac{91 \cdot \exp(-0,693 \cdot (t - t_0) / (0,108 \cdot (t - t_0) + 0,25))}{1 + 0,79 \cdot \exp(-0,693 \cdot (t - t_0) / 2,21)} \quad (6)$$

Предположим, что отношение  $e_{int137}(t+n)/e_{int137}(t)$  изменяется по экспоненциальному закону, то есть  $e_{int137}(t+n) = e_{int137}(t) \times \exp(-0,693 \times n / T_{int137}(t;n))$ , где  $n$  – временной интервал усреднения,  $T_{int137}(t;n)$  – период уменьшения дозы внутреннего облучения от  $^{137}\text{Cs}$  для календарного года  $t$  в диапазоне усреднения  $n$ , лет. Тогда  $T_{int137}(t;n)$  можно рассчитать следующим образом:

$$T_{int137}(t;n) = 0,693 \times n \times \ln(e_{int137}(t) / e_{int137}(t+n)) \quad (7)$$

Рассчитав некоторое количество численных значений  $T_{int137}(t;n)$  и подобрав к ним уравнение регрессии, получим следующую формулу:

$$T_{int137}(t;n) = 0,047 \times (t - t_0)^2 + (1 + 0,12 \times n) \times (t - t_0) + 0,046 \times n + 0,18. \quad (8)$$

Дозу внешнего облучения цезием-137 рассчитывают по формуле:

$$E_{ext137}(t) = e_{ext137}(t) \times \sigma_{137}(t), \text{ мЗв}, \quad (9)$$

где:  $\sigma_{137}(t)$ , МБк/м<sup>2</sup> – средняя плотность загрязнения почвы цезием-137 на территории населенного пункта для года  $t$  (по данным Росгидромета);

$e_{ext137}(t)$ , мЗв×м<sup>2</sup>/МБк – дозовый коэффициент.

Значения коэффициента  $e_{ext137}(t)$  приведены в таблице 2. В соответствии с МУ 2.6.1.784-99<sup>3</sup>, они определены для типовой структуры жилого фонда, характерной для сельских населенных пунктов в западных районах Брянской области: 40% взрослых жителей относятся к группе 1 и проживают в деревянных одноэтажных домах; 20% относятся к группе 1 и проживают в кирпичных одноэтажных домах; 20% относятся к группе 2 и проживают в деревянных одноэтажных домах; 20% относятся к группе 2 и проживают в кирпичных одноэтажных домах.

Если присвоить значение  $e_{ext137}(t)$  в трех последних столбцах таблицы серединам годовых интервалов, то этот коэффициент описывается следующим уравнением регрессии:

$$e_{ext137}(t) = 25,3 \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / (0,21 \times (t - t_0) + 0,41)). \quad (10)$$

Если применить описанный выше алгоритм с использованием формулы (7) к дозовому коэффициенту  $e_{ext137}(t)$ , то можно получить формулу, описывающую изменение  $T_{ext137}(t;n)$  со временем:

$$T_{ext137}(t;n) = 0,11 \times (t - t_0)^2 + (0,11 \times n + 0,42) \times (t - t_0) + 0,21 \times n + 0,41. \quad (11)$$

**Примечание:**  $T_{ext137}(t;0)$  и  $T_{int137}(t;0)$  – это периоды уменьшения  $e_{ext137}(t)$  и  $e_{int137}(t)$  соответственно, нормированные на плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  для календарного года  $t$ .

<sup>3</sup> Методические указания МУ 2.6.1.784-99 «Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения». Минздрав России, Москва, 1999. [Methodical guidelines MU 2.6.1.784-99 "Zoning of the residual places in the Russian Federation radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident based on the criteria of the annual dose to the public", Ministry of Healthcare of Russia, Moscow, 1999 (In Russ.)]

Таблица 2

Значения коэффициента  $e_{ext137}$  для сельских населенных пунктов

[Table 2

Values of the coefficient  $e_{ext137}$  for the rural residential places]

Календарный год [Calendar Year]	1986	1989	1991	1992	1993	1999–2001	2005–2009	2012–2020
$e_{ext137}$ , мЗв×м <sup>2</sup> /МБк [ $e_{ext137}$ , mSv×m <sup>2</sup> /MBq]	25,3*	3,4	2,4	2,1	1,9	1,38	1,2	1,1
Источник данных [Source]	[13]	[14]	МУ 2.7.7.001-93 <sup>4</sup> [MU 2.7.7.001-93 <sup>4</sup> ]			МУ 2.6.1.784-99 <sup>3</sup> [MU 2.6.1.784-99 <sup>3</sup> ]	МУ 2.6.1.2319-08 <sup>5</sup> [MU 2.6.1.2319-08 <sup>5</sup> ]	МУ 2.6.1.3154-13 <sup>6</sup> [MU 2.6.1.3154-13 <sup>6</sup> ]

\* значение  $e_{ext137}$  для 1986 г. рассчитано для случая, если человек в течение всего 1986 г. проживал на загрязненной территории (чтобы получить реальное значение коэффициента, его нужно умножить на 0,67).  
[Value of  $e_{ext137}$  for 1986 were calculated for the full-time residence of an individual on the contaminated territory in 1986 (for the real value, the coefficient should be multiplied by 0,67)].

Рассчитать величину дозы внутреннего облучения, нормированную на плотность загрязнения почвы цезием-137,  $e_{int137}(t_2)$ , по ее известному значению в год  $t_1$  можно по следующей формуле:

$$e_{int137}(t_2) = e_{int137}(t_1) \times \exp(-0,693 \times n / T_{int137}(t_1; n)), \quad (12)$$

где  $n = t_2 - t_1$ .

Аналогично можно рассчитать значение  $e_{ext137}(t_2)$  по известному значению  $e_{ext137}(t_1)$ :

$$e_{ext137}(t_2) = e_{ext137}(t_1) \times \exp(-0,693 \times n / T_{ext137}(t_1; n)), \text{ где } n = t_2 - t_1. \quad (13)$$

Допустим, нужно оценить величину  $e_{int137}$  для 2056 г. по ее известному значению в 2010 г. Период полууменьшения  $e_{int137}$  для 2010 г. в интервале усреднения  $n = 2056 - 2010 = 46$  лет, рассчитанный по формуле (8), будет равен  $T_{int137}(2010; 46) = 183$  года. Подставив это значение в формулу (12), получим  $e_{int137}(2056) = 0,84 \times e_{int137}(2010)$ , а для дозы внутреннего облучения (без нормирования на плотность загрязнения почвы цезием-137)  $E_{int137}(2056) = 0,29 \times E_{int137}(2010)$ .

Что касается внешнего облучения, то период полууменьшения  $e_{ext137}$  для 2010 г. в интервале усреднения  $n = 46$  лет по формуле (11) будет равен  $T_{ext137}(2010; 46) = 201$

год. Подставив это значение в формулу (13), получим  $e_{ext137}(2056) = 0,85 \times e_{ext137}(2010)$ , а для дозы внешнего облучения (без нормирования на плотность загрязнения почвы цезием-137)  $E_{ext137}(2056) = 0,30 \times E_{ext137}(2010)$ .

В качестве иллюстрации динамика изменения со временем  $T_{ext137}(t, n)$  и  $T_{int137}(t, n)$  для дискретных значений  $n = 0, 3, 10, 20, 50$  и  $70$  лет приведена на рисунке 2.

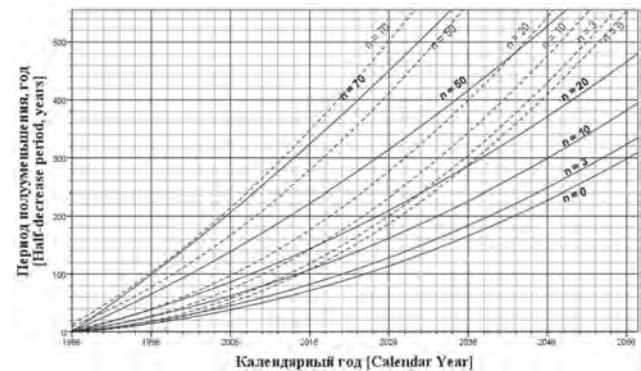


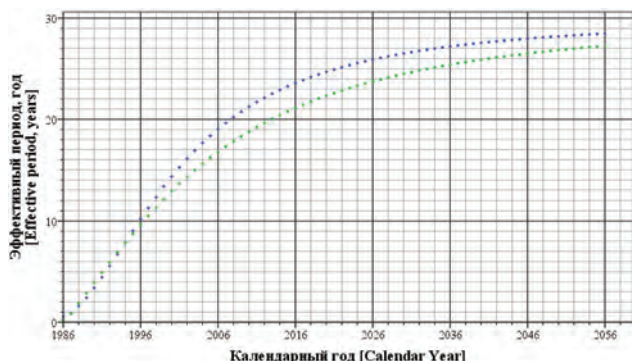
Рис. 2. Периоды полууменьшения  $T_{ext137}(t; n)$  (пунктирные линии) и  $T_{int137}(t; n)$  (сплошные линии)  
[Fig. 2. Periods of half-decrease of  $T_{ext137}(t; n)$  (dotted lines) and  $T_{int137}(t; n)$  (solid lines)]

<sup>4</sup> Методические указания МУ 2.7.7.001-93 «Определение средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». Госкомсанэпиднадзор Российской Федерации, Москва, 1993. [Methodical guidelines MU 2.7.7.001-93 "Assessment of the average annual effective dose to the public in residual places radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident". Goscomsanepidnadzor of the Russian Federation, Moscow, 1993 (In Russ.)]

<sup>5</sup> Методические указания МУ 2.6.1.2319—08: Доп. 2 к МУ 2.6.1.784—99 «Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения». Роспотребнадзор, Москва, 2008. [Methodical guidelines MU 2.6.1.2319-08. Addendum 2 to MU 2.6.1.784-99 Zoning of the residual places in the Russian Federation radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident based on the criteria of the annual dose to the public", Rospotrebnadzor, Moscow, 2008 (In Russ.)]

<sup>6</sup> Методические указания МУ 2.6.1.3154-13: Изменения № 3 к МУ 2.6.1.784-99 «Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения». Роспотребнадзор, Москва, 2013. [Methodical guidelines MU 2.6.1.3154-13. Addendum 3 to MU 2.6.1.784-99 Zoning of the residual places in the Russian Federation radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident based on the criteria of the annual dose to the public", Rospotrebnadzor, Moscow, 2013 (In Russ.)]

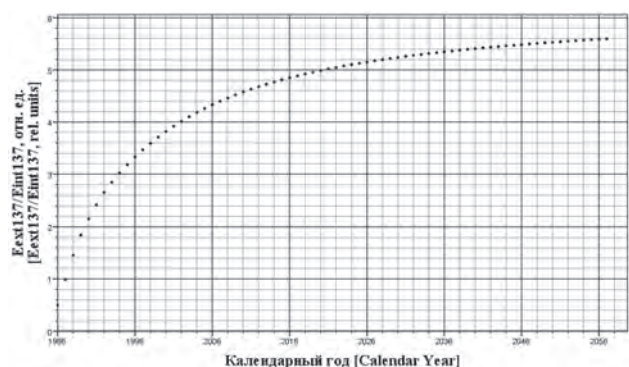
Изменения со временем эффективных периодов полуменьшения (с учетом радиоактивного распада  $^{137}\text{Cs}$ ) дозы внешнего облучения и дозы внутреннего облучения иллюстрируются рисунком 3.



**Рис. 3.** Изменение со временем эффективных периодов полуменьшения дозы внешнего облучения (верхняя кривая) и дозы внутреннего облучения (нижняя кривая)

**[Fig. 3.** Trends in the changes of the effective half-decrease periods for dose from external exposure (upper curve) and dose from internal exposure (lower curve)]

Отношение  $E_{\text{ext}137}(t)/E_{\text{int}137}(t)=e_{\text{ext}137}(t)/e_{\text{int}137}(t)$ , где  $e_{\text{ext}137}(t)$  – значения, рассчитанные по формуле (10);  $e_{\text{int}137}(t)$  – значения, рассчитанные по формуле (2) с коэффициентами из таблицы 1. Изменение со временем численных значений этого отношения иллюстрируется рисунком 4.



**Рис. 4.** Изменение со временем численных значений отношения дозы внешнего облучения ( $E_{\text{ext}137}$ ) к дозе внутреннего облучения ( $E_{\text{int}137}$ )

**[Fig. 4.** Trends of changes in the ratios of dose from external exposure to the dose from internal exposure]

Видно, что в отдаленный период времени доза внешнего облучения существенно превышает дозу внутреннего облучения. Связано это, скорее всего, с тем, что рацион питания местных жителей был и остается слабо ориентирован на потребление местных пищевых продуктов как из-за почти полного отсутствия своего молочного скота, так и из-за действия контрмер и самоограничений населения в потреблении этих продуктов. Тем не менее, это характеризует реальную ситуацию в Брянской области и динамику ее изменения со временем, в том числе и на прогнозируемые годы.

Динамика изменения со временем численных значений отношения дозы внешнего облучения к дозе внутреннего облучения описывается уравнением:

$$e_{\text{ext}137}(t)/e_{\text{int}137}(t)=1,9+(55\times(t-t_0)-170)/(12\times(t-t_0)+130). \quad (14)$$

Зная это отношение, можно оценить дозу  $E_{\text{ext}137}(t)$  по дозе  $E_{\text{int}137}(t)$  и наоборот.

Суммарную среднюю годовую эффективную дозу от  $^{137}\text{Cs}$  для взрослого населения, проживающего в сельских населенных пунктах, можно оценить по формуле:

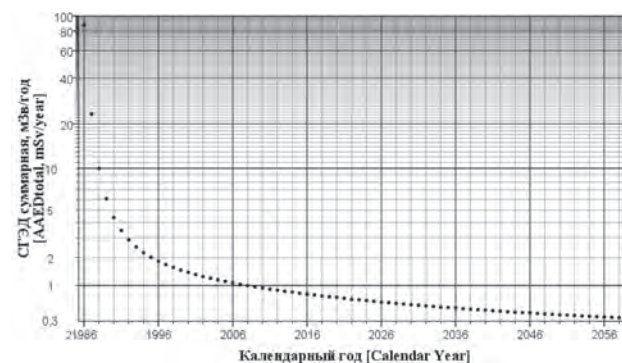
$$E_{\Sigma}(t)=E_{\text{int}137}(t)+E_{\text{ext}137}(t)=[e_{\text{int}137}(t)+e_{\text{ext}137}(t)]\times 0,037\times\sigma_{137}(t_0)\times \exp(-0,693\times(t-t_0)/T_{137}), \quad (15)$$

где:  $\sigma_{137}(t_0)$  – плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  на момент аварии ( $\text{Ки}/\text{км}^2$ );

$T_{137}$  – период полураспада  $^{137}\text{Cs}$ .

Дозу облучения за 1986 г., рассчитанную по формулам (6) и (10), нужно умножить на коэффициент 0,67, так как основные выпадения произошли не в начале года, а в конце апреля – начале мая 1986 г.

Для иллюстрации на рисунке 5 приведен график изменения со временем суммарной средней годовой эффективной дозы облучения населения цезием-137 при плотности загрязнения почвы  $\sigma_{137}=30 \text{ Ки}/\text{км}^2$ .



**Рис. 5.** Суммарная средняя годовая эффективная доза (СГЭД суммарная) облучения от  $^{137}\text{Cs}$  для взрослых жителей Брянской области при условии отсутствия защитных мероприятий (при  $\sigma_{137}=30 \text{ Ки}/\text{км}^2$ )

**[Fig. 5.** Total average annual effective dose from  $^{137}\text{Cs}$  (AAED<sub>total</sub>) for adult residents of the Bryansk region without the protective measures ( $\sigma_{137}=30 \text{ Ки}/\text{км}^2$ )

Среднюю суммарную прогнозируемую накопленную эффективную дозу (ПНЭД<sub>Σ</sub>) для взрослых жителей Брянской области, которые проживают в течение 50 лет на загрязненных территориях, можно рассчитать по формуле:

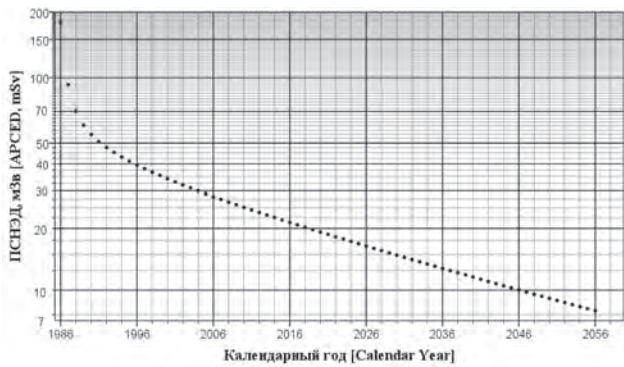
$$\text{ПНЭД}_{\Sigma}(t)=\sum_t^{t+50} E_{\Sigma}(t), \quad (16)$$

где  $t$  – год начала проживания на загрязненной территории.

График ПНЭД<sub>Σ</sub>(t), рассчитанный для плотности загрязнения  $\sigma_{137}=30 \text{ Ки}/\text{км}^2$ , представлен на рисунке 6.

Теперь, используя полученные результаты, можно выполнить более точную оценку прогнозируемых средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС (вплоть до 2056 г.).

Что касается прогноза средних годовых эффективных доз внешнего облучения, то пока нет существенных оснований для внесения изменений в методические указания МУ 2.6.1.2222-07 «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду», утвержденные в 2007 г.



**Рис. 6.** Суммарная (внешнее + внутреннее облучение) прогнозируемая средняя накопленная эффективная доза (ПСНЭД) от <sup>137</sup>Cs для взрослых жителей Брянской области при условии отсутствия защитных мероприятий – в зависимости от года начала проживания на загрязненной территории (при  $\sigma_{137} = 30 \text{ Ки/км}^2$ )

**[Fig. 6.** Total (external+internal exposure) average predicted cumulative effective dose (APCED) from <sup>137</sup>Cs for adult residents of the Bryansk region without the protective measures – based on the starting year of residence at the contaminated territory ( $\sigma_{137} = 30 \text{ Ku/km}^2$ )

Таким образом, с использованием всех полученных в настоящей работе результатов, можно не только выполнить расчет прогнозируемых средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения, но и дать прогноз суммарных доз (внутреннее + внешнее облучение).

В таблице 3 приведено распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения жителей в разные годы (вплоть до 2056 г.).

В таблице 4 приведено распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения критических групп населения в разные годы (вплоть до 2056 г.).

**Заключение**

Исследования закономерностей формирования доз облучения населения радиоактивно загрязненных субъектов Российской Федерации необходимы для уточнения текущих дозовых нагрузок и их прогноза на последующие периоды времени. На примере Брянской области, с использованием новых методических приемов, выполнена оценка периодов полуменьшения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения, нормированных на плотность загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs в соответствующий год (по данным СИЧ-измерений). Это позволило внести изменения в параметры модели внутреннего облучения, использованные ранее для расчетов прогнозируемых доз в соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.2222-07 «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду», утвержденными в 2007 г.

Таблица 3

**Распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения жителей в разные годы**

[Table 3

**Distribution of the settlements in the Bryansk region referred to the radioactively contaminated zones by the value of predicted total average annual effective dose to the public in different years]**

Год [Year]	Количество НП, в интервалах доз, мЗв/год [Number of residual places in the corresponding dose intervals, mSv/year]			Максимум [Maximum]
	< 0,3	0,3–1,0	≥ 1,0	
2026	627	117	5	2,2
2036	674	70	5	1,7
2046	709	38	2	1,3
2056	734	15	–	0,97

Таблица 4

**Распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения критических групп населения в разные годы**

[Table 4

**Distribution of the settlements in the Bryansk region referred to the radioactively contaminated zones by the value of predicted total average annual effective dose to the critical groups of the public in different years]**

Год [Year]	Количество НП, в интервалах доз, мЗв/год [Number of residual places in the corresponding dose intervals, mSv/year]			Максимум [Maximum]
	< 0,3	0,3 – 1,0	≥ 1,0	
2026	485	221	43	4,3
2036	549	186	14	3,3
2046	600	143	6	2,5
2056	637	107	5	2,0

Что касается прогноза средних годовых эффективных доз внешнего облучения, то пока нет существенных оснований для внесения изменений в указанный документ.

Полученные результаты позволили выполнить уточненный прогноз доз облучения населения и его критических групп, проживающих на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС территориях Брянской области, на период вплоть до 2056 г. и, благодаря этому, выделить населенные пункты, в которых оправдано проведение соответствующих защитных мер.

### Литература

1. Methodical document «Forecasting doses to the public and its critical groups in the remote period after the Chernobyl accident» developed under the IAEA Project: RER/3/004 «Radiological support for the rehabilitation of areas affected as a result of the accident at the Chernobyl NPP», IAEA, Vienna, 2008.
2. Брук Г.Я., Братилова А.А., Громов А.В., и др. Развитие единой системы оценки и прогноза доз облучения населения, проживающего в реперных населенных пунктах приграничных территорий Союзного государства, пострадавших вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2017. № 1(17). С. 168-175.
3. Балонов М.И., Романович И.К., Брук Г.Я., и др. Динамика средних годовых и накопленных доз облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. СПб, 2018. С. 24-29.
4. Брук Г.Я., Братилова А.А., Базюкин А.Б., и др. Обоснование перечня пострадавших вследствие аварии на ЧАЭС населенных пунктов Российской Федерации, предназначенных к переходу от состояния проживания населения в условиях радиационной аварии к условиям нормальной жизнедеятельности // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. СПб, 2018. С. 68-72.
5. Власов О.К., Брук Г.Я., Щукина Н.В. Разработка и верификация метода реконструкции динамики эффективных доз облучения населения РФ после аварии на ЧАЭС // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 28-45.
6. Балонов М.И., Брук Г.Я., Голиков В.Ю., и др. Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. М.-Обнинск, 1996. Вып. 7. С. 39-72.
7. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Balonov M.I., et al. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation doses to the population. The Chernobyl Papers, Washington: Research enterprises, 1993. Vol. 1. P. 167-218.
8. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Basalaeva L.N., et al. Dynamics of <sup>137</sup>Cs transfer from soil into forest mushrooms and berries after the Chernobyl accident. UIR Topical meeting, Mol – Belgium. Book of abstracts, 1998. P. 48-49.
9. Bruk G.Ya., Shutov V.N., Balonov M.I., et al. Dynamics of <sup>137</sup>Cs content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident // Radiat. Prot. Dosimetry. 1998. Vol. 76, No. 3. 169-178.
10. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Закономерности формирования и прогноз доз облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (спецвыпуск). С. 66-74.
11. Голиков В.Ю. Анализ долгосрочной динамики доз внешнего облучения населения после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 4. С. 39-50.
12. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident // Radiat. Environ. Biophys. 2002. Vol. 41, No 10. P. 185-193.
13. Панченко С.В., Савкин М.Н., Шутов В.Н. Радиационно-гигиеническая обстановка и дозы облучения населения // Препринт № IBRAE-97-10. Москва.
14. Пономаренко В.В., Панов А.В., Марочкина Е.В. Оценка изменения доз облучения населения в различные периоды после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2014. Т. 23, № 3. С. 100-114.

Поступила: 18.04.2020 г.

**Яковлев Вячеслав Арсентьевич** – научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: yava1952@gmail.com

**Брук Геннадий Яковлевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:** Яковлев В.А., Брук Г.Я. Новые методические приемы оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 68–76. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-68-76

## A new approach for the methodology of the assessment of the predicted doses to the public of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl NPP accident

Vyacheslav A. Yakovlev, Gennadiy Ya. Bruk

*This study is aimed at the evaluation of the trends of the doses from internal exposure of the adult public of the Bryansk region due to the consumption of the main dose-forming food products in the remote period after the Chernobyl NPP accident and the methodical features of the assessment of the predicted doses from the internal exposure. A new methodical approach to the calculation of the predicted doses of the public from internal exposure is based on the single exponential model of the change of the dose with a time-dependent period of a half-decrease. Results of the study allowed increasing the precision of calculation of the predicted doses to the public of the Bryansk region up to 2056. A similar method (single exponential model) can be applied for the external exposure as well. That allowed calculating predicted doses of total (external + internal) exposure. As an example, the paper includes the distribution of all settlements in the Bryansk region referred to the zones of radioactive contamination by the predicted average annual effective dose to the public and critical groups in the different time periods after the accident.*

**Key words:** the Chernobyl NPP accident, public, radioactive contamination, caesium-137, caesium-134, dose, predicted dose.

### References

1. Methodical document «Forecasting doses to the public and its critical groups in the remote period after the Chernobyl accident» developed under the IAEA Project: RER/3/004 «Radiological support for the rehabilitation of areas affected as a result of the accident at the Chernobyl NPP», IAEA, Vienna, 2008.
2. Bruk GYa, Bratilova AA, Gromov AV, Zhesko TV, Kaduka AN, Kaduka MV, et al. Development of the joint system of the assessment and prognosis of the doses to the public residing in the reference residual places in the bordering territories of the Union State, affected due to the Chernobyl NPP accident. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti = Medical-biological problems of the life sustenance*. 2017;1(17): 168-175 (In Russian).
3. Balonov MI, Romanovich IK, Bruk GYa, Golikov VYu, Bazyukin AB, Bratilova AA. Dynamics of the average annual and accumulated doses to the adult public of the Russian Federation after the Chernobyl NPP accident. Actual issues of the radiation hygiene. Proceedings of the international scientific-practical conference. St.-Petersburg; 2018: 24-29 (In Russian).
4. Bruk GYa, Bratilova AA, Bazyukin AB, Vlasov AYu, Zhesko TV, Kaduka MV, et al. Justification of the list of the residual places in the Russian Federation affected by Chernobyl NPP accident for the transition from the residence in radiation accident conditions to the normal life sustenance. Actual issues of the radiation hygiene. Proceedings of the international scientific-practical conference. St.-Petersburg; 2018: 68-72 (In Russian).
5. Vlasov OK, Bruk GYa, Shchukina NV. Development and validation of the method of the reconstruction of the dynamics of the effective doses of the public of the Russian Federation after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*, 2017;26(3): 28-45 (In Russian).
6. Balonov MI, Bruk GYa, Golikov VYu, Erkin VG, Zvonova IA, Parkhomenko VI, et al. Exposure of the public of the Russian Federation due to the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. Moscow-Obninsk; 1996;7: 39-72 (In Russian).
7. Shutov VN, Bruk GYa, Balonov MI, Parhomenko VI, Pavlov IJ. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation doses to the population. The Chernobyl Papers, Research enterprises, Washington; 1993;1: 167-218.
8. Shutov VN, Bruk GYa, Basalaeva LN, Kaduka MV, Balonov MI. Dynamics of <sup>137</sup>Cs transfer from soil into forest mushrooms and berries after the Chernobyl accident. UIR Topical meeting, Mol – Belgium. Book of abstracts; 1998: 48-49.
9. Bruk GYa, Shutov VN, Balonov MI, Basalaeva LN, Kislov MV. Dynamics of <sup>137</sup>Cs content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 1998;76(3): 169-178.
10. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. Trends of development and prediction of the doses from the internal exposure of the public of the Russian Federation and its critical groups in the distant post-Chernobyl NPP accident period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2(Special Issue)): 66-74. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-66-74>
11. Golikov VYu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(4): 39-50. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-4-39-50>
12. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Radiat. Environ. Biophysics*. 2002;41(10): 185-193.
13. Panchenko SV, Savkin MN, Shutov VN. Radiation-hygienic situation and doses to the public. Pre-print № IBRAE-97-10. Moscow. (In Russian)
14. Ponomarenko VV, Panov AV, Marochkina EV. Assessment of the changes in the doses of the public in different periods after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2014;23(3): 100-114. (In Russian)

Received: April 18, 2020

**Vyacheslav A. Yakovlev**

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

**Address for correspondence:** Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: yava1952@gmail.com



**For correspondence: Vyacheslav A. Yakovlev** – Scientist, Internal Exposure Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, St.-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: yava1952@gmail.com)

**Gennadiy Ya. Bruk** – Head of the Internal Exposure Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**For citation: Yakovlev V.A., Bruk G.Ya. A new approach for the methodology of the assessment of the predicted doses to the public of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena* = *Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 68-76. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-68-76**