

# Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС

Г.Я. Брук, А.Б. Базюкин, А.А. Братилова, В.А. Яковлев

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 закономерностям формирования доз внутреннего облучения взрослого населения за счет потребления основных дозообразующих пищевых продуктов в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. На примере Брянской и Тульской областей выполнена оценка эффективных периодов полураспада основных дозообразующих пищевых продуктов (молока и грибов) от  $^{137}\text{Cs}$ , а также периодов полуснижения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения, нормированных на плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  в соответствующий год (по данным СИЧ-измерений). Полученные результаты позволили выполнить прогноз доз облучения населения 14 субъектов Российской Федерации на период до 2056 г.*

**Ключевые слова:** Чернобыльская АЭС, радиоактивное загрязнение, цезий-137, доза облучения, коэффициент перехода.

## Введение

Авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) является самой масштабной радиационной катастрофой в мире. В результате теплового взрыва и выброса в атмосферу продуктов деления ядерного топлива радиоактивному загрязнению подверглись значительные территории. Только в Российской Федерации к зонам радиоактивного загрязнения (с плотностью загрязнения почвы цезием-137 более 37 кБк/м<sup>2</sup> в 1991 г.) было отнесено 4540 населенных пунктов (НП). По состоянию на 2019 г. к зонам радиоактивного загрязнения относятся 3855 НП, в которых проживает более 1,5 млн человек<sup>1</sup>.

Наиболее сильно загрязнена Брянская область: так, в Красногорском районе до сих пор есть населенные пункты с плотностью загрязнения почвы цезием-137 более 1,5 МБк/м<sup>2</sup>. К зонам радиоактивного загрязнения в Брянской области относятся 749 НП. Значительно пострадали также Тульская, Калужская и Орловская области. Кроме этих четырех областей, еще в 10 субъектах

Российской Федерации имеются населенные пункты, расположенные в зонах радиоактивного загрязнения.

Вопросам исследования закономерностей формирования и прогноза доз<sup>2</sup> облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС был посвящен целый ряд публикаций [1–10].

**Цель исследования** – изучение закономерностей формирования доз внутреннего облучения взрослых жителей Брянской и Тульской областей, характеризующихся преобладанием дерново-подзолистых и черноземных почв соответственно, в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС и прогноз доз внутреннего облучения населения 14 пострадавших субъектов Российской Федерации на период до 2056 г.

## Задачи исследования

1. Анализ данных радиационного мониторинга на территориях Брянской и Тульской областей, включаю-

<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» [The decree of the Government of the Russian Federation #1074, 08.10.2015 “On the establishment of the list of the residential areas inside the boundaries of the zones radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident”]

<sup>2</sup> Здесь и далее под дозами облучения следует понимать дозы, обусловленные радиоактивными выпадениями вследствие аварии на Чернобыльской АЭС [Here and after the term “dose” corresponds to the doses from the radioactive fallouts due to the Chernobyl NPP accident]

**Брук Геннадий Яковлевич**

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: Gen-Bruk@yandex.ru

ший в себя определение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в пищевых продуктах.

2. Анализ результатов измерений содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме жителей Брянской области.

3. Уточнение параметров модели прогноза доз внутреннего облучения населения и его критических (наиболее облучаемых) групп.

4. Прогноз доз облучения населения и его критических групп, проживающих на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС территориях Российской Федерации, на период до 2056 г.

### Материалы и методы

Измерения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме жителей на счетчиках (спектрометрах) излучения человека (СИЧ), отбор проб пищевых продуктов, их предварительная подготовка к радиохимическому и гамма-спектрометрическому анализу на содержание  $^{137}\text{Cs}$  проводились нами в соответствии с методическими рекомендациями 2.6.1.0006-10 «Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения»<sup>3</sup>.

В качестве СИЧ мы использовали портативные сцинтилляционные спектрометры «DigiDART» производства фирмы ORTEC, USA, с детектором NaI(Tl) 75×75 мм.

В положении обследуемого «сидя» детектор располагали торцом к нижней части живота. Измеряли количество импульсов в энергетическом диапазоне гамма-излучения 585–725 кэВ («окно»  $^{137}\text{Cs}$ ). Время измерения – 100 с, относительная погрешность – до 30%. Минимальная детектируемая активность (МДА) при использовании детекторов размером 75×75 мм составляла около 700 Бк  $^{137}\text{Cs}$  в теле человека при проведении измерений в кирпичных помещениях, характеризующихся низким гамма-фоном.

Анализ проб пищевых продуктов на содержание  $^{137}\text{Cs}$  гамма-спектрометрическим методом выполняли на гамма-спектрометрах со сцинтилляционным или полупроводниковым детектором. МДА для таких приборов обеспечивала возможность определения  $^{137}\text{Cs}$  в пробах на уровне от 10 Бк/кг и ниже.

Если предполагалось, что активность радионуклида в исходной пробе окажется меньше МДА, выполняли либо отбор пробы в объеме, большем, чем рекомендованный в п. 5.2.2 методических рекомендаций 2.6.1.0006-10, и проводили предварительное концентрирование пробы (выпаривание, сушка, озоление) с ее последующим повторным гамма-спектрометрическим анализом, либо радиохимический анализ пробы по стандартным методикам [11, 12].

В рамках работ по федеральной целевой программе «Преодоление последствий радиационных аварий на период до 2015 года» и «Программа совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской

катастрофы в рамках Союзного государства на период до 2016 года», учреждения Роспотребнадзора отбирали пробы пищевых продуктов и проводили исследования по определению содержания в них  $^{137}\text{Cs}$ . Для выполнения задач, поставленных в настоящей работе, были использованы данные мониторинга содержания радионуклидов в основных дозообразующих пищевых продуктах (молоке и грибах), произведенных и собранных за период 1987–2016 гг. на территориях Брянской области с плотностью загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  в 1986 г. от 5 до 30 Ки/км<sup>2</sup> (где фактически не применялись контрмеры) и на всех радиоактивно загрязненных территориях Тульской области. Всего было отобрано и исследовано 7201 проба молока и 10 505 проб грибов в Брянской области, а в Тульской – 615 проб молока и 221 проба грибов. В отобранных пробах определяли удельную активность  $^{137}\text{Cs}$ . Анализы выполнялись в испытательной лаборатории ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и в испытательном лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Брянской области». Все результаты определения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах молока были получены с помощью радиохимических методов анализа, а в пробах грибов – с использованием как гамма-спектрометрических, так и радиохимических методов.

Общее количество использованных в настоящей работе данных СИЧ-измерений, выполненных нами в 170 населенных пунктах Брянской области в период 1987–2016 гг. на территориях с плотностью загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  в 1986 г. от 5 до 30 Ки/км<sup>2</sup> (где фактически не применялись контрмеры), составляет 14 663.

Методические указания МУ 2.6.1.2222-07<sup>4</sup> «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду», утвержденные в 2007 г., 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 ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ).

В соответствии с МУ 2.6.1.2222-07 основными параметрами, определяющими порядок расчета прогнозируемых доз внутреннего облучения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС, являются «медленные» эффективные периоды полуочистки основных дозообразующих пищевых продуктов (молока и грибов) от  $^{137}\text{Cs}$  за счет радиоактивного распада последнего и природного самоочистки 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.

<sup>3</sup> Методические рекомендации МР 2.6.1.0006-10 «Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения». М., 2010. [Methodical guidelines MR 2.6.1.0006-10 “Conduction of a complex expeditionary radiation-hygienic survey of a residential area for the assessment of the doses to the public”, Moscow, 2010]

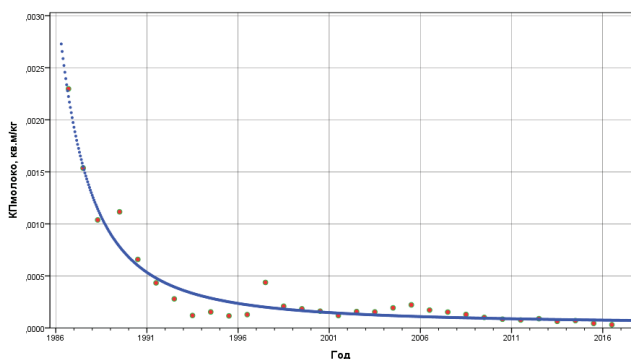
<sup>4</sup> Методические указания МУ 2.6.1.2222-07 «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду». М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2007 [Methodical guidelines MU 2.6.1.2222-07 “Estimate of the doses to the public from the radionuclides of strontium and cesium in the environment” Rospotrebnadzor, Moscow, 2007]

**Результаты и обсуждение**

Согласно таблице 6.6 МУ 2.6.1.2222-07, «медленные» эффективные периоды получищения основных дозообразующих пищевых продуктов (молока и грибов) от <sup>137</sup>Cs составляют 15 и 17 лет соответственно.

С даты утверждения МУ 2.6.1.2222-07 прошло уже 12 лет, и количественные характеристики основных параметров дозиметрических моделей, используемых в расчетах, в том числе численные значения эффективного годового потребления молока и грибов лесных и «медленных» эффективных периодов получищения молока и грибов от <sup>137</sup>Cs, могли измениться. Поэтому для решения поставленных в данной работе задач необходимо было в первую очередь выявить эти изменения и скорректировать прогнозируемые дозы облучения населения на период до 2056 г.

На рисунке 1 приведена динамика изменения коэффициентов перехода (КП) <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко за период 1987–2016 гг. для территорий Брянской области, где преобладают дерново-подзолистые песчаные и супесчаные почвы, 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). Мы не использовали данные 1986 г. по молоку, чтобы исключить влияние на итоговые результаты наличия в выпадениях короткоживущих радионуклидов и поверхностного загрязнения растительности выпавшими радионуклидами.



**Рис. 1.** Динамика изменения коэффициентов перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко (КП<sub>молоко</sub>) за период 1987–2016 гг. (Брянская область)

**[Fig. 1.** Dynamics of the change in the transfer factors of <sup>137</sup>Cs from soil to milk (TF<sub>milk</sub>) in 1987–2016 (Bryansk region)]

В общем виде формула для расчета коэффициентов перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко (КП<sub>молоко</sub>) за период 1987–2016 гг. в Брянской области аппроксимируется следующей функцией:

$$КП_{\text{молоко}} = a \times \exp(-0,693 \times (\text{Год} - 1986) / T_1) + c \times \exp(-0,693 \times (\text{Год} - 1986) / T_2), \quad (1)$$

где:

$a = (0,00145 \pm 0,0002)$ , м<sup>2</sup>/кг;  $T_1 = (1,8 \pm 0,5)$ , лет;  
 $c = (0,00023 \pm 0,00004)$ , м<sup>2</sup>/кг;  $T_2 = (21 \pm 5)$ , лет.

Коэффициент детерминации R<sup>2</sup> составляет 0,89.

Формула для расчета коэффициентов перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в грибы (КП<sub>грибы</sub>) в Брянской области аппроксимируется функцией:

$$КП_{\text{грибы}} = a \times \exp(-0,693 \times (\text{Год} - 1986) / T), \quad (2)$$

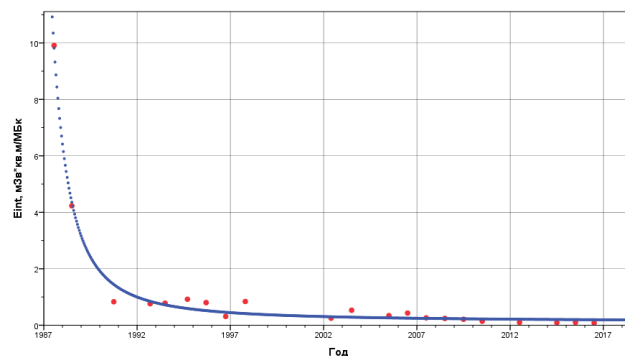
где:

$a = (0,014 \pm 0,002)$ , м<sup>2</sup>/кг;  $T = (19 \pm 6)$ , лет.

Коэффициент детерминации R<sup>2</sup> составляет 0,33.

Таким образом, в настоящее время «медленные» периоды полуснижения КП<sub>молоко</sub> и КП<sub>грибы</sub> составляют 21 и 19 лет соответственно, а «медленные» эффективные периоды получищения молока и грибов от <sup>137</sup>Cs составляют около 12 лет, что несколько отличается в меньшую сторону от значений, приведенных в таблице 6.6 МУ 2.6.1.2222-07.

На рисунке 2 приведена динамика изменения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения E<sub>int</sub>, проживающего на территориях 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), нормированных на плотность загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs в соответствующий год (по данным выполненных нами СИЧ-измерений жителей Брянской области за период 1987–2016 гг.). При этом, чтобы исключить случайные выбросы, из всех имеющихся результатов по каждому году удалены данные со значениями, выходящими за пределы интервала  $\ln(E_{\text{int}}) - \ln(2\sigma) < \ln(E_{\text{int}}) < \ln(E_{\text{int}}) + \ln(2\sigma)$ , где  $\sigma$  – стандартное отклонение.



**Рис. 2.** Динамика средних годовых эффективных доз внутреннего облучения (E<sub>int</sub>) жителей Брянской области за период 1987–2016 гг., нормированных на плотность загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs в соответствующий год

**[Fig. 2.** Dynamics of the average annual effective doses from the internal exposure (E<sub>int</sub>) of the residents of Bryansk region in 1987–2016, normalized by the contamination density of the soil by <sup>137</sup>Cs in the corresponding year]

В общем виде формула для расчета E<sub>int</sub> за период 1987–2016 гг. в Брянской области аппроксимируется следующей функцией:

$$E_{\text{int}} = a \times \exp(-0,693 \times (\text{Год} - 1986) / T_1) + c \times \exp(-0,693 \times (\text{Год} - 1986) / T_2), \quad (3)$$

где:

$a = (34 \pm 2)$ , мЗв×м<sup>2</sup>×МБк<sup>-1</sup>;  $T_1 = (0,6 \pm 0,1)$ , лет;

$c = (1,3 \pm 0,4)$ , мЗв×м<sup>2</sup>×МБк<sup>-1</sup>;  $T_2 = (15 \pm 3)$ , лет.

Коэффициент детерминации R<sup>2</sup> составляет 0,95.

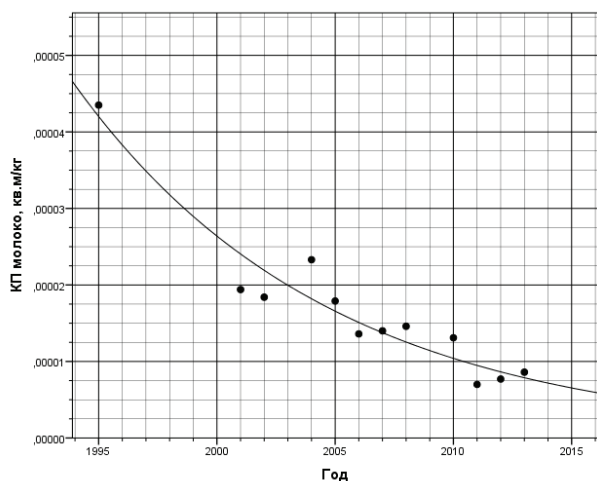
Таким образом, по данным СИЧ-измерений, «медленный» период полуснижения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения жителей Брянской области, нормированных на плотность загрязнения почвы <sup>137</sup>Cs в соответствующий год, составляет около 15 лет, а

с учетом радиоактивного распада последнего – около 10 лет (это по сути «медленный» эффективный период полуснижения доз внутреннего облучения жителей, то есть параметр, необходимый для расчета прогнозируемых доз), что достаточно близко к «медленным» эффективным периодам получищения молока и грибов от <sup>137</sup>Cs.

Обработку всех имеющихся результатов по молоку, грибам и СИЧ-измерениям проводили с использованием пакета прикладных программ статистической обработки данных IBM SPSS Statistics.

Для территорий Тульской области, где преобладают черноземные почвы, «медленный» период полуснижения КП<sub>молоко</sub> составляет 8,7 лет, а «медленный» эффективный период получищения молока от <sup>137</sup>Cs составляет 6,7 года, что почти в 2 раза отличается в меньшую сторону от значений, приведенных для Брянской области. Возможно, это связано с относительно небольшим количеством имеющихся результатов по сравнению с Брянской областью и их близостью к МДА, а также более быстрым заглублиением <sup>137</sup>Cs в почве на территориях Брянской области, характеризующихся бедными дерново-подзолистыми песчаными и супесчаными почвами, и его уходом из верхних (корневых) слоев.

На рисунке 3 приведена динамика изменения коэффициентов перехода (КП) <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко за период 1993–2013 гг. для территорий Тульской области.



**Рис. 3.** Динамика изменения коэффициентов перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко (КП<sub>молоко</sub>) за период 1995–2013 гг. (Тульская область)

**[Fig. 3.** Dynamics of the changes in the transfer factors of <sup>137</sup>Cs from soil to milk (TF<sub>milk</sub>) in 1995–2013 (Tula region)]

В общем виде формула для расчета коэффициентов перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в молоко (КП<sub>молоко</sub>) за период

1995–2013 гг. в Тульской области аппроксимируется следующей функцией:

$$A = 0,000094 * \exp(-0.693 * (\text{Год} - 1986) / 7,5 (4))$$

Коэффициент детерминации R<sup>2</sup> составляет 0,92.

«Медленный» эффективный период получищения грибов от <sup>137</sup>Cs за счет радиоактивного распада последнего и природного самоочищения данного продукта со временем от этого химического элемента также отличается в меньшую сторону от значений, приведенных для Брянской области.

В таблице 1 приведено эффективное годовое потребление молока и грибов лесных (дозовые эквиваленты потребления сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов) взрослыми жителями европейской части России.

Таблица 1

**Эффективное годовое потребление молока и грибов лесных (дозовые эквиваленты потребления сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов) взрослыми жителями европейской части России, кг/год**  
[Table 1  
Effective annual consumption of milk and forest mushrooms (dose equivalents of the consumption of agricultural and natural food products) by the adult residents of European part of Russia, kg/year]

Продукт [Product]	Тип НП [Type of residential area]		
	НП с количеством жителей менее 10 тысяч человек [<10000 inhabitants]	НП с количеством жителей от 10 до 100 тысяч человек [10000-100000 inhabitants]	НП с количеством жителей более 100 тысяч человек [>100000 inhabitants]
Молоко [Milk]	170/300	140/250	110/200
Грибы (сырой вес) [Mushrooms (raw weight)]	9/10	7/8	5/5

В числителе – в соответствии с МУ 2.6.1.3152-13; в знаменателе – в соответствии с табл. 6.4 МУ 2.6.1.2222-07.

[Note: in numerator – according to MU 2.6.1.3152-13; in denominator – according to the table 6.4 of MU 2.6.1.2222-07].

Для расчета прогнозируемых доз мы использовали результаты, приведенные в методических указаниях МУ 2.6.1.3152-13<sup>5</sup>, которые оказались также близки к приведенным в статье [13].

Из данных таблицы 1 следует, что в настоящее время эффективное годовое потребление грибов уменьшилось незначительно, а молока – снизилось в 1,8 раза.

Используя полученные результаты, можно выполнить расчет прогнозируемых средних годовых эффектив-

<sup>5</sup> Методические указания МУ 2.6.1.3152-13 «Изменения № 1 к МУ 2.6.1.2003-05 «Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». Роспотребнадзор, 2013. [Methodical guidelines MU 2.6.1.3152-13 “Adjustment № 1 to the MU 2.6.1.2003-05 “Assessment of the average annual effective doses of the critical groups of the public living on the territories of Russian Federation radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident”, Rosпотребнадзор, 2013]

ных доз внутреннего облучения населения Российской Федерации в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС на период до 2056 г.

Что касается прогноза средних годовых эффективных доз внешнего облучения, то, по мнению автора работы [14], 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», утвержденных в 2007 г.

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).

При этом из консервативных соображений для расчетов в качестве «медленных» эффективных периодов получения молока и грибов от <sup>137</sup>Cs мы будем использовать численные значения, полученные нами для Брянской области.

В таблице 2 приведено распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радио-

активного загрязнения, по величине прогнозируемой средней по НП годовой эффективной дозы облучения жителей в разные годы (вплоть до 2056 г.), а в таблице 3 – максимальные прогнозируемые на разные годы средние по НП годовые эффективные дозы облучения жителей, проживающих в населенных пунктах, расположенных на всех остальных радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях 13 субъектов Российской Федерации.

В таблице 4 приведено распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой средней по НП годовой эффективной дозы облучения критических групп населения в разные годы (вплоть до 2056 г.), а в таблице 5 – максимальные прогнозируемые на разные годы средние по НП годовые эффективные дозы облучения критических групп населения, проживающих в населенных пунктах, расположенных на всех остальных радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях 13 субъектов Российской Федерации.

Таблица 2

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

[Table 2

**Distribution of the Bryansk region settlements referred to the zones of the radioactive contamination by the average settlement prognosed annual effective dose to the public]**

Год [Year]	Количество НП, в интервалах доз, мЗв/год [Number of settlements in the dose intervals, mSv/year]			Максимум [Maximum]
	< 0,3	0,3–1,0	≥ 1,0	
	Брянская область [Bryansk region]			
2018	553	180	16	3,3
2026	623	120	6	2,4
2036	691	55	3	1,6
2046	733	15	1	1,1
2056	745	4	–	0,74

Таблица 3

**Максимальные прогнозируемые на разные годы средние по НП годовые эффективные дозы облучения жителей, проживающих в населенных пунктах, расположенных на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях 13 субъектов Российской Федерации**

[Table 3

**Maximal prognosed average annual effective doses to the public residing in settlements located on the radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident territories of 13 subjects of the Russian Federation]**

Год [year]	Калужская область [Kaluga region]	Орловская область [Orel region]	Тульская область [Tula region]	Другие субъекты РФ [Other subjects of RF]
2018	0,15	0,25	0,35	0,21
2026	0,11	0,17	0,26	0,16
2036	0,075	0,11	0,18	0,11
2046	0,051	0,073	0,12	0,074
2056	0,035	0,048	0,083	0,051

Таблица 4

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

[Table 4

Distribution of the Bryansk region settlements referred to the zones of the radioactive contamination by the average settlement prognosed annual effective dose to the critical groups of the public]

Год [Year]	Количество НП, в интервалах доз, мЗв/год [Number of settlements in the dose intervals, mSv/year]			Максимум [Maximum]
	< 0,3	0,3–1,0	≥ 1,0	
	Брянская область [Bryansk region]			
2018	372	281	96	6,6
2026	450	258	41	4,7
2036	562	173	14	3,1
2046	649	97	3	2,1
2056	704	44	1	1,4

Таблица 5

Максимальные прогнозируемые на разные годы средние по НП годовые эффективные дозы облучения критических групп населения, проживающих в населенных пунктах, расположенных на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях 13 субъектов Российской Федерации

[Table 5

Maximal prognosed mean annual effective doses to the critical groups of the public residing in settlements located on the radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident territories of 13 subjects of the Russian Federation]

Год [year]	Калужская область [Kaluga region]	Орловская область [Orel region]	Тульская область [Tula region]	Другие субъекты РФ [Other subjects of RF]
2018	0,29	0,57	0,66	0,39
2026	0,21	0,39	0,49	0,29
2036	0,14	0,25	0,33	0,20
2046	0,096	0,16	0,22	0,14
2056	0,065	0,10	0,15	0,093

### 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 и Тульской областей нами выполнена оценка эффективных периодов полураспада основных дозообразующих пищевых продуктов (молока и грибов) от  $^{137}\text{Cs}$ , а также периодов полуснижения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения, нормированных на плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  в соответствующий год (по данным СИЧ-измерений). Это позволило уточнить 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.

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

Полученные результаты позволили нам выполнить расчет прогнозируемых доз облучения населения и его критических групп, проживающих на всех радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС территориях 14 субъектов Российской Федерации, на период вплоть до 2056 года, что дает возможность заранее выделить населенные пункты, в которых до определенного момента времени оправдано проведение соответствующих защитных мер, и спланировать предстоящие расходы на их осуществление.

### 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. Константинов, Ю.О. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / Ю.О. Константинов, Г.В. Архангельская, К.Г. Андерссон, А.Б. Базюкин, М.И. Балонев, А.Н. Барковский, А.А. Братилова, Г.Я. Брук, Н.М. Вишнякова, В.Ю. Голиков, А.В. Громов, Э.Б. Ершов, Т.В. Жеско, И.А. Звонова, И.А.

- Зыкова, М.В. Кадука, Г.Н. Кайдановский, О.С. Кравцова, А.Н. Либерман, А.С. Мишин, В.И. Пархоменко, А.В. Пономарев, Т.В. Пономарева, О.Н. Прокофьев, В.П. Рамзаев, В.С. Репин, И.К. Романович, И.Г. Травникова, Н.С. Швыдко, В.Н. Шутов, В.А. Яковлев; Под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. – СПб, 2016. – Т.1. – 448 с.
3. Брук, Г.Я. Развитие единой системы оценки и прогноза доз облучения населения, проживающего в реперных населенных пунктах приграничных территорий Союзного государства, пострадавших вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС / Г.Я. Брук, А.А. Братилова, А.В. Громов, Т.В. Жеско, А.Н. Кадука, М.В. Кадука, О.С. Кравцова, И.К. Романович, Н.В. Титов, В.А. Яковлев // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2017. – № 1(17). – С. 168-175.
  4. Балонов, М.И. Динамика средних годовых и накопленных доз облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС / М.И. Балонов, И.К. Романович, Г.Я. Брук, В.Ю. Голиков, А.Б. Базюкин, А.А. Братилова // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. – СПб, 2018. – С. 24-29.
  5. Брук, Г.Я. 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 / Г.Я. Брук, А.А. Братилова, А.Б. Базюкин, А.Ю. Власов, Т.В. Жеско, М.В. Кадука, В.А. Яковлев, В.В. Кучумов // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. – СПб, 2018. – С. 68-72.
  6. Власов, О.К. Разработка и верификация метода реконструкции динамики эффективных доз облучения населения РФ после аварии на ЧАЭС / О.К. Власов, Г.Я. Брук, Н.В. Щукина // Радиация и риск. – 2017. – Т. 26, № 3. – С. 28-45.
  7. Балонов, М.И. Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС / М.И. Балонов, Г.Я. Брук, В.Ю. Голиков, В.Г. Еркин, И.А. Звонова, В.И. Пархоменко, В.Н. Шутов // Бюлл. «Радиация и риск», 1996. – Т. 7. – С. 39-71.
  8. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Balonov M.I., Parhomenko V.I., Pavlov I.J. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation doses to the population. The Chernobyl Papers, Vol. 1, Research enterprises, Washington, 1993, pp. 167-218.
  9. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Basalaeva L.N., Kaduka M.V. Balonov M.I. 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, pp. 48-49.
  10. Bruk G.Ya., Shutov V.N., Balonov M.I., Basalaeva L.N., Kislov M.V. 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, pp. 169-178.
  11. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / Под ред. А.Н. Марья и А.С. Зыковой. – М.: МЗ СССР, 1980. – 88 с.
  12. Методика выполнения измерений. Удельная активность цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой и сельскохозяйственной продукции, почвы и других объектов внешней среды. Свидетельство ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Федерального государственного агентства по техническому регулированию и метрологии № 1730/08 от 08 декабря 2008 г. – 21 с.
  13. Братилова, А.А. Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС / А.А. Братилова, Г.Я. Брук // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 53-59.
  14. Голиков, В.Ю. Анализ долгосрочной динамики доз внешнего облучения населения после Чернобыльской аварии / В.Ю. Голиков // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 39-50.

Поступила: 25.04.2019 г.

**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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: Gen-Bruk@yandex.ru

**Базюкин Анатолий Борисович** – кандидат биологических наук, ведущий 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, Санкт-Петербург, Россия

**Братилова Анжелика Анатольевна** – 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, Санкт-Петербург, Россия

**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, Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:** Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-10-2s-66-74.

## 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

Gennadiy Ya. Bruk, Anatoliy B. Bazyukin, Anzhelika A. Bratilova, Vyacheslav A. Yakovlev

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

*An article is devoted to the peculiarities of exposure doses forming of adult population due to the main dose-forming foodstuffs in the remote period after Chernobyl accident. On an example of the Bryansk and Tula regions, we carried out the assessment of the effective purification half-periods of the main dose-forming food products (milk and mushrooms) from  $^{137}\text{Cs}$  due to its radioactive decay and natural self-purification and the assessment of the periods of half-reduction of the average annual effective internal doses for the population of the Bryansk region divided on the  $^{137}\text{Cs}$  soil surface activity actual in the corresponding year (based on whole body measurements data). Obtained results allowed fulfilling the prognosis of the internal doses for the population of the Bryansk region for the time period up to 2056.*

**Key words:** Chernobyl NPP, radioactive contamination,  $^{137}\text{Cs}$ , exposure dose, transfer factor.

### 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. Konstantinov Yu.O., Arkhangelskaya G.V., Andersson K.G., Bazyukin A.B., Balonov M.I., Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Vishnyakova N.M., Golikov V.Yu., Gromov A.V., Ershov E.B., Zhesko T.V., Zvonova I.A., Zykova I.A., Kaduka M.V., Kaydanovsky G.N., Kravtsova O.S., Liberman A.N., Mishin A.S., Parkhomenko V.I., Ponomarev A.V., Ponomareva T.V., Prokofyev O.N., Ramzaev V.P., Repin V.S., Romanovich I.K., Travnikova I.G., Shvydko N.S., Shutov V.N., Yakovlev V.A. Radiological and hygienic issues of the Chernobyl NPP accident consequences. Saint-Petersburg, 2016, Vol. 1, 448 p. (In Russian)
3. Bruk G.Ya., Bratilova A.A., Gromov A.V., Zhesko T.V., Kaduka A.N., Kaduka M.V., Kravtsova O.S., Romanovich I.K., Titov N.V., Yakovlev V.A. Development of the joint system of the assessment and estimate of the doses to the public residing the control settlements in the border territories of the Union state, affected by the Chernobyl NPP accident. Mediko-biologicheskiye problemy zhiznedeyatel'nosti = Medical and Biological Problems of Life Activity, 2017, no 1(17), pp. 168-175. (In Russian)
4. Balonov M.I., Romanovich I.K., Bruk G.Ya., Golikov V.Yu., Bazyukin A.B., Bratilova A.A. Trends of the mean annual and accumulated doses to the adult population of the Russian Federation after the Chernobyl NPP accident. Actual issues of the radiation hygiene: proceedings of the international scientific-practical conference. Actual issues of radiation hygiene, St-Petersburg, 2018, pp. 24-29. (In Russian)
5. Bruk G.Ya., Bratilova A.A., Bazyukin A.B., Vlasov A.Yu., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Yakovlev V.A., Kuchumov V.V. Justification of the list of the settlements of the Russian Federation affected by Chernobyl NPP accident for the transition from the radiation accident conditions to the normal life conditions. Actual issues of the radiation hygiene: proceedings of the international scientific-practical conference. Actual issues of radiation hygiene, St-Petersburg, 2018, pp. 68-72. (In Russian)
6. Vlasov O.K., Bruk G.Ya., Shchukina N.V. Development and verification of the method of reconstruction of the effective doses of the public of the Russian Federation after the Chernobyl NPP accident. Radiatsiya i risk = Radiation and risk, 2017, no 26(3), pp. 28-45. (In Russian)
7. Balonov M.I., Bruk G.Ya., Golikov V.Yu., Erkin V.G., Zvonova I.A., Parkhomenko V.I., Shutov V.N. Exposure of the public of the Russian Federation due to the Chernobyl NPP accident. Radiatsiya i risk = Radiation and risk, 1996, no. 7, pp. 39-72. (In Russian)
8. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Balonov M.I., Parkhomenko V.I., Pavlov I.J. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation doses to the population. The Chernobyl Papers, Vol. 1, Research enterprises, Washington, 1993, pp. 167-218.
9. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Basalaeva L.N., Kaduka M.V. Balonov M.I. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  transfer from soil into forest mushrooms and berries after the Chernobyl accident. UIR Topical meeting, Mol – Belgium. Book of abstracts, 1998, pp. 48-49.
10. Bruk G.Ya., Shutov V.N., Balonov M.I., Basalaeva L.N., Kislov M.V. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident. Radiat. Prot. Dosimetry, Vol. 76, No. 3, 1998, pp. 169-178.
11. Methodical guidelines on the sanitary control of the content of the radioactive substances in the objects of the environment. Ed. By A.N. Marey and A.S. Zykova. M.: MZ USSR, 1980, 88 p. (In Russian)
12. Method of measurement. Volume activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in samples of food and agricultural products, soil and other objects of the environment. Certificate of FGUP «VNIIM after D.I. Mendeleev» of the Federal state agency on technical regulation and metrology № 11730/08, 08.12.2008, 21 p. (In Russian)

Gennadiy Ya. Bruk

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

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: gen-bruk@yandex.ru



13. Bratilova A.A., Bruk G.Ya. Influence of the consumption of different foodstuffs on the internal exposure dose formation in the adult population of the Russian Federation after the accident at the Chernobyl NPP. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, No 11(2), pp. 53-59. (In Russian)
14. Golikov V.Yu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, No 11(4), pp. 39-50. (In Russian)

Received: April 25, 2019

**For correspondence: 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 (Mira str., 8, St.-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: gen-bruk@yandex.ru)

**Anatoliy B. Bazyukin** – Leading 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, Saint-Petersburg, Russia

**Anzhelika A. Bratilova** – 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, Saint-Petersburg, Russia

**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, Saint-Petersburg, Russia

**For citation: Bruk G.Ya., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Yakovlev V.A. 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, Vol. 12, No. 2 (special issue), pp. 66-74. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2s-66-74.**