

Дозиметрия внешнего облучения населения: сравнение аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»

В.Ю. Голиков

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 сравнению моделей и оцениваемых с их помощью доз внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений после аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». В случае аварии на АЭС «Фукусима-1» использовали модель, предложенную НКДАР ООН. Как значения доз гамма-излучения в окружающей среде, так и значения эффективных доз внешнего облучения сопоставимых групп населения, нормированные на одинаковую поверхностную активность радионуклидов, для обеих аварий оказались близки. Причинами этого явились как схожесть изотопных составов радиоактивных выпадений, так и тот факт, что «японская» модель внешнего облучения была основана на «чернобыльской», вплоть до использования одинаковых численных значений для некоторых параметров, из-за недостатка специфических японских послеварийных данных к моменту первых оценок доз облучения жителей Японии. Для более корректного сравнения доз внешнего облучения жителей после двух аварий необходимо верифицировать значения параметров японской модели с помощью результатов измерений мощностей доз гамма-излучения в окружающей среде и индивидуальных доз внешнего облучения жителей, выполненных после аварии на АЭС «Фукусима-1».

Ключевые слова: радиационная авария, ЧАЭС, АЭС «Фукусима-1», модели внешнего облучения, гамма-излучение, эффективная доза.

Введение

В конце XX в. (апрель 1986 г.) и в начале XXI в. (март 2011 г.) с разницей всего лишь в 25 лет в СССР и в Японии произошли две крупнейшие радиационные аварии, существенно подорвавшие веру в безопасность атомной энергетики. Эти аварии сопровождались значительным радиоактивным загрязнением окружающей среды и облучением сотен тысяч людей [1, 2, 3].

Среди возможных путей облучения населения при крупномасштабных выбросах в окружающую среду радиоактивных веществ внешнее облучение от выпадений является одним из наиболее значимых. После аварии на АЭС «Фукусима-1» внешнее облучение от выпавших радионуклидов определяло более 90% от суммарной эффективной дозы облучения населения в наиболее загрязненной префектуре Фукусима в Японии [3]. В случае Чернобыльской аварии вклады внешнего и внутреннего облучения в суммарную эффективную дозу зависели от типа почв региона: в пользу внутреннего облучения в случае торфяных почв или в пользу внешнего облучения в случае черноземных почв [1]. На соотношение доз внешнего и внутреннего облучения населения влияла также и эффективность защитных мероприятий, которая была более высока применительно к снижению дозы внутреннего облучения населения [1].

Несмотря на то, что причины двух аварий были различны, однако их последствия, особенно в контексте формирования доз внешнего облучения населения, оказались весьма схожи. Исторически сложилось так, что предложенная в 1990 г. структура модели внешнего облучения населения при крупномасштабных выбросах в окружающую среду радиоактивных веществ [4] получила свое развитие после исследования последствий Чернобыльской аварии. Численные значения параметров модели были определены на базе результатов многолетних дозиметрических исследований в загрязненных регионах путем проведения фантомных экспериментов, в результате опросов населения [5, 6, 7]. Верификация модельных оценок на основе результатов измерений индивидуальных доз у жителей методом термолюминесцентной дозиметрии показала, что оценки доз, полученные согласно модельным расчетам, не отличались от экспериментальных результатов с погрешностью до фактора 1,5 при доверительной вероятности 95% [8]. Разработанная модель была положена в основу официальных действующих документов по оценке текущих [9] и реконструкции накопленных доз внешнего облучения населения, проживающего на территориях РФ, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС [10].

Голиков Владислав Юрьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

После аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. международными группами экспертов были выполнены оценки доз у населения Японии [2, 3]. При этом в основу оценки доз внешнего облучения была положена чернобыльская модель, параметры которой, насколько возможно, были адаптированы к японским условиям. Хронологически первая попытка оценки доз у населения Японии и соответствующая модель, использовавшаяся ВОЗ [2], была более консервативна, в основном, из-за нехватки данных натуральных измерений к моменту подготовки материалов. Материалы НКДАР ООН [3], опубликованные в 2014 г., уже во многом были основаны на результатах измерений, выполненных после аварии, и параметры модели внешнего облучения населения более реалистично отражали развитие ситуации в Японии.

Цель исследования – сравнение исходных данных, параметров моделей и результатов расчетов эффективных доз внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений в случае Чернобыльской аварии и аварии на АЭС «Фукусима-1». В случае аварии на АЭС «Фукусима-1» использовали модель НКДАР ООН [3].

Формулировка модели внешнего облучения населения

При любой ситуации внешнего облучения человека в полях гамма-излучения для оценки эффективной дозы необходима следующая информация:

- характеристики поля внешнего гамма-излучения;
- характеристики поведения человека в этом поле;
- коэффициенты перехода от характеристик поля гамма-излучения к эффективной дозе у человека.

При радиоактивном загрязнении окружающей среды в качестве базовой используется модель облучения человека над открытым целинным участком почвы, а в качестве характеристики поля излучения – значение кермы в воздухе на высоте 1 м над подстилающей поверхностью. В этом случае на ее величину, кроме поверхностной активности выпавших радионуклидов, оказывают влияние такие естественные факторы, как начальное заглубление радионуклидов в почву, их радиоактивный распад, вертикальная миграция долгоживущих радионуклидов, наличие снежного покрова.

При облучении населения в антропогенной среде характеристики поля излучения изменяются. Учет этого в модели проводится с помощью факторов места (location factors) f_j , определяемых как отношение мощности дозы в воздухе в точке j внутри населенного пункта (НП) или в его ареале, обусловленной гамма-излучением радиоактивных выпадений, к аналогичной величине над открытым целинным участком почвы [4, 7, 11].

Поведение человека в поле излучения источника описывается с помощью факторов поведения (occupancy factors) p_{ij} , представляющих собой долю времени, в течение которого представители i -й группы населения находятся в j -й точке НП [4, 7].

Третий необходимый для оценки эффективной дозы внешнего облучения блок данных представлен коэффициентами перехода, связывающими измеряемые на практике величины (поглощенная доза в воздухе, амбиентный эквивалент дозы) с оцениваемым критерием воздействия излучения – эффективной дозой [4, 7].

Учитывая вышеизложенное, запишем уравнение модели для оценки мощности эффективной дозы внешнего облучения от выпавших радионуклидов у представителей i -й группы населения $\dot{E}_i^{dep}(t)$ следующим образом:

$$\dot{E}_i^{dep}(t) = \dot{K}_{air}(t) \cdot k_E \cdot k_S \cdot \sum_j f_j(t) \cdot p_{ij} \quad (\text{нЗв ч}^{-1}) \quad (1)$$

$$\dot{K}_{air}(t) = r(t) \cdot \sum_k A^k \cdot k_k^{dep} \cdot \exp(-\lambda^k \cdot t) \quad (\text{нГр ч}^{-1}) \quad (2)$$

где: $\dot{K}_{air}(t)$ – мощность кермы в воздухе на высоте 1 м над открытым целинным участком почвы, нГр ч⁻¹; k_E – коэффициент перехода от кермы в воздухе к эффективной дозе, Зв Гр⁻¹; k_S – коэффициент влияния снежного покрова на величину эффективной дозы, отн. ед.; f_j – фактор места, отн. ед.; p_{ij} – фактор поведения, отн. ед.; A^k – поверхностная активность k -го радионуклида на дату окончания радиоактивных выпадений, кБк м⁻²; k_k^{dep} – удельная мощность кермы в воздухе гамма-излучения k -го радионуклида для геометрии плоского изотропного источника, расположенного на глубине 0,5 г см⁻² в почве, (нГр ч⁻¹)/(кБк м⁻²); $r(t)$ – функция, описывающая влияние миграции радионуклидов в почву на мощность кермы в воздухе и равная отношению мощности кермы в момент времени t над почвой с наблюдаемым распределением нуклидов в почве к мощности кермы от плоского источника с той же поверхностной активностью, расположенного на глубине 0,5 г см⁻² в почве, отн. ед.; λ^k – постоянная радиоактивного распада k -го радионуклида (час⁻¹); t – время, прошедшее с момента окончания радиоактивных выпадений (час).

Тогда значение эффективной дозы за период времени облучения T (час) от выпавших радионуклидов $E_i^{dep}(T)$ может быть рассчитано следующим образом:

$$E_i^{dep}(T) = 10^{-6} \int_T \dot{E}_i^{dep}(t) \cdot dt \quad \text{мЗв} \quad (3)$$

Уравнения (1), (2) и (3) использовали для расчетов как мощности кермы и накопленной кермы в воздухе, так и накопленной эффективной дозы у разных групп населения, различающихся условиями проживания и работы.

Сравнение исходных данных и параметров моделей внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений в случае аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»

Радиоактивное загрязнение окружающей среды в результате аварии на АЭС «Фукусима-1», в основном, было образовано выбросом легколетучих радионуклидов Cs, I, Te [3, 12]. Наиболее интенсивные влажные выпадения наблюдались в северо-западном направлении от АЭС «Фукусима-1». Поэтому для сравнения с Чернобыльской аварией в качестве региона сравнения была выбрана юго-западная часть Брянской области, где изотопный состав выпадений также был представлен в основном легколетучими соединениями радионуклидов, а пятнистость радиоактивного загрязнения была обусловлена наличием дождевых фронтов во время прохождения радиоактивного облака [13].

Изотопный состав радиоактивных выпадений

Изотопный состав радиоактивных выпадений для обеих аварий был определен на основании результа-

тов спектрометрического анализа проб почвы. В случае Чернобыльской аварии пробы почвы впервые были отобраны 22–23 мая 1986 г. в 19 точках Брянской области [13]. Позже в работе [14] была представлена общая картина результатов моделирования переноса радиоактивных веществ от разрушенной Чернобыльской АЭС и результатов анализа проб почвы, собранных к началу 1990-х гг. из всех зон радиоактивного загрязнения РФ.

Регулярный отбор проб почвы после аварии на АЭС «Фукусима-1» начался в июне–июле 2011 г. К моменту подготовки материалов для доклада НКДАР ООН имелись данные по анализу 2200 образцов почвы из префектуры Фукусима [3].

В таблице 1 представлен относительный радионуклидный состав выпадений в случае аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». Активности всех радионуклидов нормированы на активность долгоживущего радионуклида ^{137}Cs и приведены на дату аварии.

Таблица 1

Активность выпавших гамма-излучающих радионуклидов по отношению к активности ^{137}Cs после аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»

[Table 1]

Activity of the ground-deposited gamma-emitting radionuclides relative to activity of ^{137}Cs after the Chernobyl and Fukushima NPP accidents]

Радионуклид [Radionuclide]	Авария на ЧАЭС, Брянская область (на 26.04.1986) [Chernobyl accident, the Bryansk region, on 4/26/1986]	Авария на АЭС «Фукусима-1», (на 15.03.2011) [Fukushima-1 NPP accident, on 3/15/2011]
^{95}Zr	0,065	–
^{95}Nb	0,064	–
^{103}Ru	1,68	–
^{106}Ru	0,50	–
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	–	0,0028
$^{129\text{m}}\text{Te}$	–	1,1
^{131}I	11	11,5
$^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$	16,6	8,0
^{134}Cs	0,54	1,0
^{136}Cs	0,27	0,17
^{137}Cs	1,0	1,0
^{140}Ba	0,72	–
^{140}La	0,84	–
^{144}Ce	0,26	–

Как видно из приведенных в таблице 1 данных, радионуклидный состав выпадений после обеих аварий похож. Тем не менее, различия активностей пары $^{132}\text{Te} + ^{132}\text{I}$ и наличие большего количества короткоживущих радионуклидов в «чернобыльских» выпадениях по сравнению с «фукусимскими» должны обуславливать большее значение мощности кермы в воздухе в начальный период времени после выпадений в этом случае. С другой стороны, двукратное превышение активности радионуклида ^{134}Cs в случае аварии на АЭС «Фукусима-1» должно обуславливать большее значение мощности кермы в воздухе в период времени от года до нескольких лет после выпадений по отношению к чернобыльской ситуации.

Начальное заглобление радионуклидов после выпадений было оценено путем сравнения измеренных значений мощности поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью почвы с его расчетным значением для различных вариантов заглобления плоского источника в почву. В обоих случаях наилучшее соответствие между измеренными и расчетными значениями мощностей доз в воздухе достигалось при использовании заглобления плоского источника в почву на глубину 0,5 г см⁻², что соответствует влажным выпадениям [6, 7]. В случае аварии на ЧАЭС регрессионный анализ дал следующие результаты:

$$D_{\text{возд}}^{\text{изм}} = 0,97 \cdot D_{\text{возд}}^{\text{расч}}; R=0,97; N=16.$$

где $D_{\text{возд}}^{\text{изм}}$ и $D_{\text{возд}}^{\text{расч}}$ – измеренная и расчетная мощность поглощенной дозы в воздухе, R – коэффициент корреляции, а N – число точек измерений.

В случае аварии на АЭС «Фукусима-1» среднее значение отношения расчетной величины к измеренной и его стандартная ошибка составляли: $D_{\text{возд}}^{\text{расч}} / D_{\text{возд}}^{\text{изм}} = 0,92 \pm 0,03; N = 92.$

Дозовые коэффициенты для начального заглобления радионуклидов в почве

Значения удельной мощности кермы в воздухе k_m^{dep} для плоского изотропного источника, расположенного на глубине 0,5 г см⁻² в почве (начальное заглобление радионуклидов в почве), используемые для расчета кермы в воздухе над целинными участками почвы с помощью формулы (2), представлены в таблице 2 [15]. Эти значения для расчета мощности кермы в воздухе были одинаковы для обеих аварий.

Таблица 2

Значения удельной мощности кермы в воздухе k_m^{dep} для плоского изотропного источника, расположенного на глубине 0,5 г см⁻² в почве, используемые в формуле (2) [15]

[Table 2]

The values of k_m^{dep} kerma rate coefficients for flat isotropic source at the depth of 0.5 g cm⁻² in soil to be used in formula (2) [15]

Радионуклид [Radionuclide]	k_m^{dep} (нГр/ч)/(кБк/м ²) $[k_m^{\text{dep}}$ (нГу/ч)/(кБк/м ²)]
Ag-110m+Ag-110	8,12
Te-129m+Te-129	0,23
Te-132	0,71
I-131	1,18
I-132	6,66
Cs-134	4,68
Cs-136	6,34
Cs-137+ Ba-137m	1,72

Функция, описывающая влияние миграции радионуклидов в почву на мощность кермы в воздухе

Для выполнения расчетов прогнозных накопленных доз, вплоть до значений доз за 50–70 лет (доза за жизнь), необходимо учитывать уменьшение мощности дозы в воздухе со временем. Очевидным механизмом уменьшения дозы со временем является радиоактивный распад нуклидов в выпадениях. Однако мощность дозы гамма-излуче-

ния уменьшается со временем также за счет процессов миграции долгоживущих радионуклидов в окружающей среде (природной и антропогенной). Учет влияния природной вертикальной миграции радионуклидов цезия в почве представлен в «чернобыльской» модели внешнего облучения населения, проживающего в дальней зоне выпадений (более 150 км от АЭС), функцией ослабления $r(t)$ [7, 16]:

$$r(t) = p_1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_1} \cdot t\right) + p_2 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_2} \cdot t\right) \quad (4)$$

Параметры этой функции были определены на основе гамма-спектрометрического анализа более чем 400 образцов почвы, отобранных в течение 1986–2003 гг. в загрязненных регионах Германии (Бавария), Российской Федерации (Брянская, Тульская, Орловская, Ленинградская области), Швеции. В отсутствие японских данных к моменту подготовки доклада НКДАР ООН и с учетом того, что долговременное облучение японских жителей будет обусловлено теми же самыми радионуклидами ^{137}Cs и ^{134}Cs в форме легколетучих соединений, как и в дальней зоне чернобыльской аварии, было предложено и в «японской» модели внешнего облучения населения использовать функцию $r(t)$ в том же виде и с теми же параметрами, что и в чернобыльской дальней зоне: $p_1=0,5$, $p_2=0,5$, $T_1=1,5$ г. и $T_2=50$ лет [7, 16].

Влияние вертикальной миграции цезия на значение мощности дозы в воздухе показано на рисунке 1.

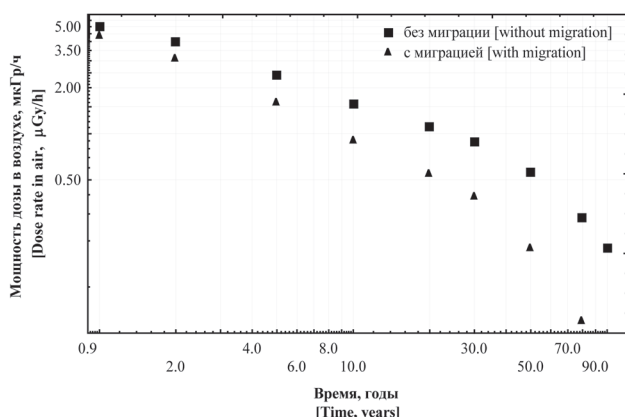


Рис. 1. Влияние миграции цезия в почву на мощность дозы в воздухе для изотопного состава выпадений после аварии на АЭС «Фукусима-1» (начальная поверхностная активность ^{137}Cs полагалась равной 1 MBq m^{-2})

[Fig. 1. The influence of cesium migration in soil depth on dose rate in air for isotopic composition of deposition after the accident on Fukushima-1 NPP (initial ^{137}Cs surface activity of 1 MBq m^{-2})

Антропогенные факторы уменьшения дозы внешнего облучения населения

При облучении населения в антропогенной среде характеристики поля излучения изменяются по сравнению с таковыми над целинными участками почвы. Мощность дозы гамма-излучения в антропогенной среде всегда меньше, чем над открытыми участками почвы, особенно внутри зданий из-за поглощения излучения их конструкциями. Кроме того, естественные процессы смыва радионуклидов с дождем и снегом, а также хозяйственная деятельность человека (движение транспорта, чистка улиц и др.) обеспечивают вынос радионуклидов через дренаж-

ные системы за пределы НП. Учет этого проводится с помощью факторов места (location factors), определяемых как отношение мощности дозы в воздухе в выбранных точках внутри НП или в его ареале, обусловленной гамма-излучением радиоактивных выпадений, к аналогичной величине над открытым целинным участком почвы. Поведение человека в поле излучения источника описывают с помощью факторов поведения (occupancy factors), представляющих собой долю времени, в течение которого представители разных групп населения находятся в выбранных точках внутри НП или в его ареале.

Таким образом, факторы места зависят от времени. После чернобыльской аварии их зависимость от времени была установлена на основании результатов многочисленных измерений, выполненных на загрязненных территориях Европы [17, 18, 19] и РФ [16].

Поскольку информации о специфических факторах места для японских НП, применимых к их особой национальной строительной традиции, отсутствовали к моменту подготовки материалов НКДАР ООН, для расчета дозы использовали следующие факторы места, основанные на чернобыльском опыте: внутри жилых и производственных зданий и вне помещений (над асфальтированными и неасфальтированными поверхностями). Здания подразделяли на три типа с учетом японской национальной статистики: одноэтажный деревянный дом, одноэтажный деревянный огнеупорный дом и трехэтажный бетонный дом с начальными значениями факторов места 0,4, 0,2 и 0,1 соответственно. Зависимость факторов места от времени экстраполировали на основе чернобыльских измерений [11, 16] следующим образом:

– для твердых поверхностей (асфальт, бетон и т.п.):

$$f_{hard} = 0.50 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{0.9 \text{ г}}\right) + 0.1 \quad (5)$$

– для нетвердых поверхностей (почва, луг и т.п.):

$$f_{dirt} = 0.50 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{2.2 \text{ г}}\right) + 0.25 \quad (6)$$

– для зданий:

$$f_{build} = a_1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}\right) + a_2 \quad (7) \text{ (табл. 3).}$$

На рисунке 2 в качестве примера показана зависимость от времени факторов места для чернобыльской и японской моделей расчета доз внешнего облучения населения.

Значения параметров в формуле (7) Таблица 3

Parameter values for formula (7)			
Тип здания [Type of building]	a_1 , отн.ед. [rel. un.]	a_2 , отн.ед. [rel. un.]	T, лет [years]
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,2	0,2	1,8
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,1	0,1	1,8
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete building]	0,05	0,05	1,8

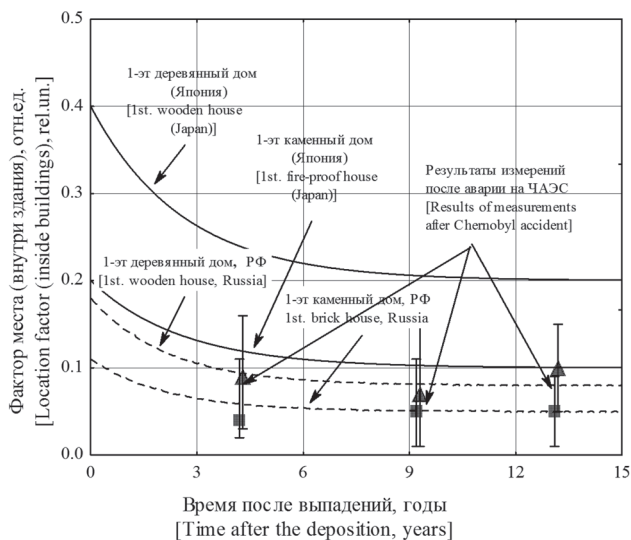


Рис. 2. Зависимость от времени факторов места для чернобыльской и японской моделей расчета доз внешнего облучения населения
[Fig. 2. The time influence of location factors after the Chernobyl and Japan models for external dose calculation of people]

Значения факторов времени для различных групп населения Японии были оценены на основе национальных данных опроса населения и представлены в таблице 4 [4]. Эти значения в комбинации со значениями факторов места характеризуют уменьшение доз облучения 12 социально-возрастных групп населения Японии в антропогенной среде по сравнению с облучением над открытым целинным участком почвы и называются антропогенными факторами уменьшения дозы. В таблице 5 для сравнения представлены их значения для чернобыльской и японской моделей расчета доз внешнего облучения взрослого населения, усредненные за 1 год, 10 и 80 лет после радиоактивных выпадений.

Коэффициенты перехода от значений кермы в воздухе к эффективной дозе

Значения коэффициентов перехода от кермы в воздухе на высоте 1 м к эффективной дозе для плоского изотропного источника фотонов с энергией 0,1–1 МэВ, залегающего на глубине 0,5 г см⁻² в почве, были получены расчетным путем для набора воксельных расчетных моделей тела человека различных размеров, включая фантом МКРЗ (the ICRP reference computational phantom) [20]. Они представлены в таблице 6.

Таблица 4

Набор значений факторов поведения для Японии

[Table 4

Set of annual occupancy factors p_{ij} for Japan

Тип локации [Type of location]	Фактор поведения, p_{ij} отн. ед. [Occupancy factor, p_{ij} (dimensionless)]			
	Ребенок 1 год [Child 1 y]	Ребенок 10 лет [Child 10 y]	¹ Взрослые, группа 1 [Adult, group 1]	² Взрослые, группа 2 [Adult, group 2]
Внутри помещений [indoors]	0,80	0,85	0,70	0,90
Вне помещений, включая: [outdoors including]:				
Асфальтированные поверхности [paved surfaces]	0,10	0,05	0,20	0,05
Неасфальтированные поверхности [unpaved surfaces]	0,10	0,10	0,10	0,05

¹группа 1 – представители профессий, работающих преимущественно вне помещений; ²группа 2 – представители профессий, работающих преимущественно внутри помещений.
 [group 1 – people working predominantly outdoors; group 2 – people working predominantly indoors].

Таблица 5

Усредненные по времени антропогенные факторы уменьшения дозы для РФ и Японии

[Table 5

Time-averaged dose reduction factors for Russia and Japan

Жилой дом/офис [Living house/Office]	Чернобыльская авария (село/город) [Chernobyl accident (rural/urban)]		Авария на АЭС «Фукусима-1» [Fukushima-1 accident]	
	Группа 1 [Group 1]	Группа 2 [Group 2]	Группа 1 [Group 1]	Группа 2 [Group 2]
	1 год облучения [1 st year exposure]			
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,43/0,35	0,38/0,24	0,41	0,38
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,37/0,31	0,30/0,19	0,29	0,22

Жилой дом/офис [Living house/Office]	Чернобыльская авария (село/город) [Chernobyl accident (rural/urban)]		Авария на АЭС «Фукусима-1» [Fukushima-1 accident]	
	Группа 1 [Group1]	Группа 2 [Group2]	Группа 1 [Group1]	Группа 2 [Group2]
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete buildings]	0,32/0,27	0,24/0,13	0,22	0,14
10 лет облучения [10 years exposure]				
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,33/0,22	0,27/0,16	0,25	0,25
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,29/0,20	0,22/0,13	0,16	0,14
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete buildings]	0,26/0,17	0,18/0,093	0,12	0,085
80 лет облучения [80 years exposure]				
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,29/0,17	0,23/0,14	0,20	0,20
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,26/0,16	0,19/0,11	0,12	0,11
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete buildings]	0,23/0,13	0,15/0,082	0,085	0,065

Таблица 6

Коэффициенты перехода k_{Ei}^{dep} (Зв/Гр) для плоского изотропного источника фотонов с энергией 0,1–1 МэВ, залегающего на глубине 0,5 г см⁻² в почве

[Table 6]

Dose conversion coefficients k_{Ei}^{dep} (Sv/Gy) for infinite plane source at a depth of 0.5 g cm⁻² in the ground with photon energy of 0.1-1 MeV [20]

Показатель [Indicator]	Фантом МКРЗ [ICRP Reference phantom (adult)]	Фантом Jo [Phantom Jo (7-12 y)]	Фантом Baby [Phantom Baby (8 weeks)]
Рассчитано для диапазона энергий фотонов (измерено) [Calculated for different photon energies (measured)]	0,73-0,7 (0,69) ¹⁾	0,80-0,81 (0,77) ¹⁾	1,04-0,99 (0,88) ¹⁾
Рекомендовано [Recommended]	0,72	0,80	0,93 ²⁾

¹⁾ В скобках приведены результаты фантомных экспериментов, выполненных на загрязненных после Чернобыльской аварии территориях [5] [In brackets are shown the results of phantom measurements in the Chernobyl affected area [5]. ²⁾ Получено экстраполяцией от фантома Baby весом 4,2 кг к фантому годовалого ребенка весом 10 кг [Extrapolated from phantom Baby of 4.2 kg to 1y old infant of 10 kg].

На рисунке 3 результаты этих расчетов сравниваются с результатами измерений в физических фантомах годовалого, пятилетнего ребенка и взрослого человека, выполненных в реальных условиях радиоактивного загрязнения в Брянской области РФ [5]. Результаты измерений и расчетов для взрослого фантома и фантома 5-летнего ребенка соотносились в пределах 4–7%. Расчетных данных для модели весом 10 кг (возрастом 1 год) не было,

а различия между значениями коэффициентов перехода для 10 кг физического фантома (ребенок возрастом 1 год) и 4,2 кг расчетной модели ребенка возрастом 8 недель достигали 15%. Рекомендованные значения коэффициентов перехода для 10 кг ребенка возрастом 1 год, указанные в таблице 6, были получены интерполяцией расчетных значений для фантомов Baby и Child (см. примечание (2) к таблице 6).

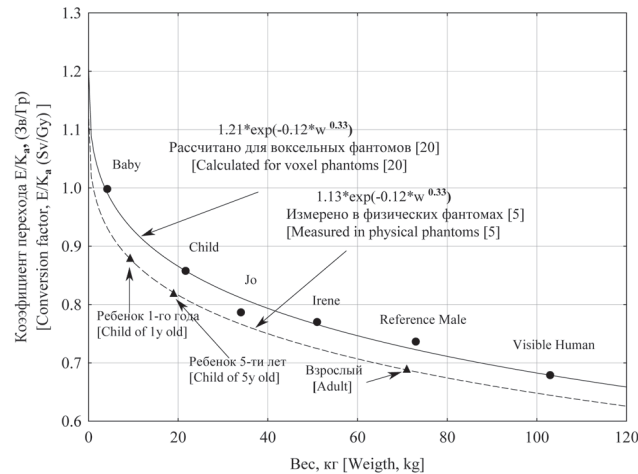


Рис. 3. Сравнение коэффициентов перехода от кермы в воздухе на высоте 1 м к значению эффективной дозы, полученных расчетным путем в воксельных расчетных моделях различного размера и измеренных с помощью физических фантомов в условиях радиоактивного загрязнения в Брянской области РФ

[Fig. 3. Comparison of the conversion coefficients from kerma in air at a height of 1 m to the effective dose obtained by calculation in human voxel calculation models of various sizes and measured using physical phantoms under conditions of radioactive contamination in the Bryansk region of the Russian Federation]

Сравнение результатов расчета доз согласно моделям внешнего облучения от радиоактивных выпадений в случае аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»

Как следует из вышеизложенного, структура модели внешнего облучения населения Японии от радиоактивных выпадений после аварии на АЭС «Фукусима-1» полностью соответствует аналогичной чернобыльской модели. Однако изотопный состав выпадений и ряд других параметров японской модели отличались от чернобыльских, что обуславливало и различие доз.

На рисунке 4 представлена зависимость от времени мощности кермы в воздухе на высоте 1 м над почвой в случае «чернобыльских» и «фукусимских» радиоактивных выпадений. В первые дни после выпадений мощность кермы в воздухе от «чернобыльских» выпадений превышала аналогичную величину от «фукусимских» выпадений приблизительно в два раза за счет присутствия таких короткоживущих радионуклидов, как ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁶Ru, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La. Затем в период времени от 1 года до нескольких лет после выпадений мощность кермы в воздухе от «фукусимских» выпадений превышала аналогичную величину от «чернобыльских» выпадений до 30% за счет в два раза большей активности ¹³⁴Cs. Наконец, по прошествии 10 лет после выпадений мощности кермы в воздухе от «фукусимских» и «чернобыльских» выпадений сравнялись, т.к. практически определялись лишь одним долгоживущим радионуклидом ¹³⁷Cs в равновесии с ^{137m}Ba.

Зависимость от времени накопленной кермы в воздухе после радиоактивных выпадений в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» представлена на рисунке 5. В этом случае различия более сглажены: через год после выпадений накопленная керма в воздухе в случае «чернобыльских» выпадений лишь на 7% больше аналогичной величины для «фукусимских» выпадений; через 10 лет соотношение изменяется в обратную сторону (за счет ¹³⁴Cs), и накопленная керма в воздухе в случае

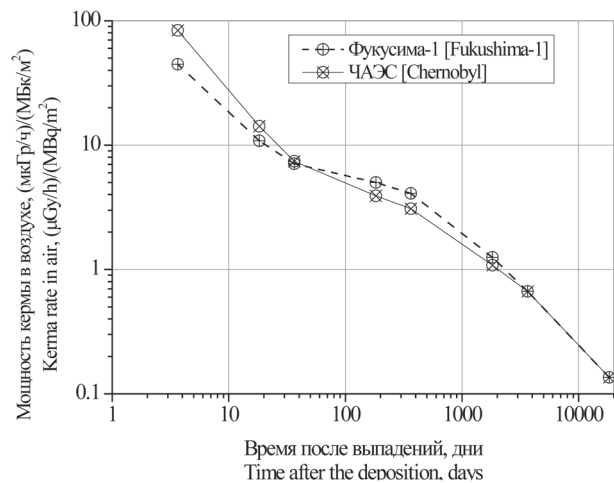


Рис. 4. Зависимость от времени мощности кермы в воздухе после радиоактивных выпадений в результате аварий на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»: ⊕ – «Фукусима-1»; ⊗ – ЧАЭС (нормировано на 1 МБк м⁻² ¹³⁷Cs).

[Fig.4. Time dependence of kerma rate in air after radioactive deposition as a result of Chernobyl and Fukushima-1 accidents: ⊕ – Fukushima-1; ⊗ – Chernobyl (Normalized on 1 MBq m⁻² of ¹³⁷Cs)]

«фукусимских» выпадений становится больше, чем для «чернобыльских», на 10%, а дальше это различие медленно уменьшается, достигая через 25 лет +6% в пользу «фукусимских» выпадений.

В случае расчетов значений накопленной эффективной дозы у различных групп населения Японии и России дополнительную роль играли различия в антропогенных факторах уменьшения дозы (факторы места и поведения). Кроме того, в российской модели внешнего облучения существует подразделение групп населения по типу антропогенной среды (сельское, городское). В японской модели внешнего облучения населения такого подразделения нет.

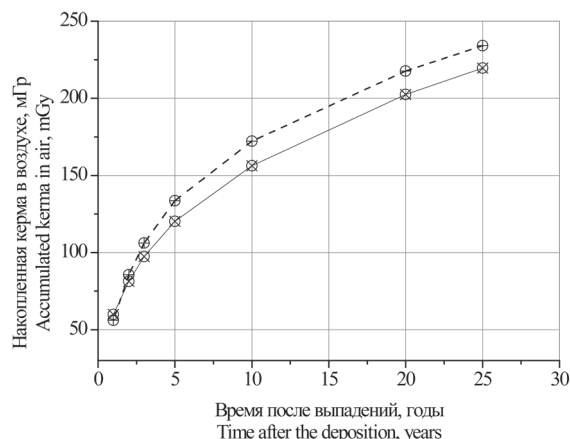


Рис. 5. Зависимость от времени накопленной кермы в воздухе после радиоактивных выпадений в результате аварий на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»: ⊕ – «Фукусима-1»; ⊗ – ЧАЭС (нормировано на $1 \text{ MBq m}^{-2} \text{ }^{137}\text{Cs}$).

[Fig. 5. Time dependence of accumulated kerma in air after the radioactive deposition as a result of Chernobyl and Fukushima-1 accidents: ⊕ – Fukushima-1; ⊗ – Chernobyl. (Normalized on $1 \text{ MBq m}^{-2} \text{ of } ^{137}\text{Cs}$)

На рисунке 6 в качестве примера представлены результаты сравнения накопленных эффективных доз внешнего облучения для двух групп японского и двух групп российского взрослого населения (Брянская область РФ), различающихся условиями работы (вне или внутри помещения) и проживания (тип дома) в антропогенной среде.

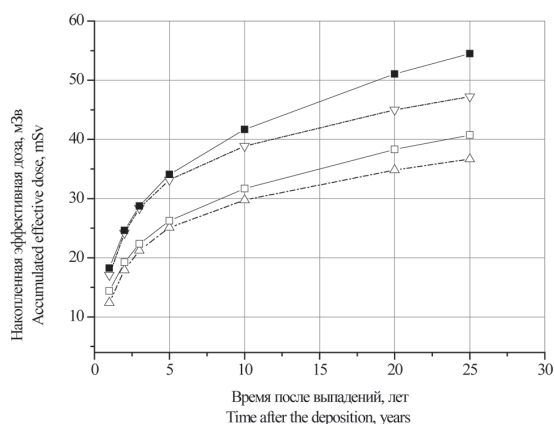


Рис. 6. Зависимость от времени накопленной эффективной дозы у различных групп взрослого населения после радиоактивных выпадений в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: ■ – российское сельское население, работающее вне помещений и проживающее в деревянных домах; ▽ – японское население, работающее вне помещений и проживающее в деревянных домах; △ – японское население, работающее внутри многоэтажных зданий и проживающее в деревянных домах; □ – российское сельское население, работающее внутри многоэтажных зданий и проживающее в деревянных домах.

[Fig. 6. Time dependence of accumulated effective dose in different groups of adult population after the radioactive deposition as a result of Chernobyl and Fukushima accidents: ■ – Russian rural population working outdoors and living in wooden houses; ▽ – Japan population working outdoors and living in wooden houses; △ – Japan population working indoors in multi storey houses and living in wooden houses; □ – Russian rural population working indoors in multi storey houses and living in wooden houses]

Оказалось, что накопленные эффективные дозы у японцев, проживающих в деревянных домах (большинство населения в наиболее загрязненной префектуре Фукусима) и работающих как вне, так и внутри помещений (группа 1 и группа 2 соответственно), близки к аналогичным величинам у сельских жителей Брянской области с такими же условиями работы и проживания. Городское население Брянской области с аналогичными условиями работы и проживания подвергалось облучению в более низких дозах по сравнению с японским, в основном из-за лучших защитных свойств зданий.

Заключение

В работе представлено сравнение моделей и оцениваемых с их помощью доз внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений после аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1». Как дозы гамма-излучения в окружающей среде, так и эффективные дозы внешнего облучения сопоставимых групп населения, нормированные на одинаковую поверхностную активность радионуклидов, для обеих аварий оказались близки. Причинами этого явились как схожесть изотопного состава выпадений, так и тот факт, что «японская» модель внешнего облучения была основана на «чернобыльской», вплоть до использования одинаковых численных значений для некоторых параметров, из-за недостатка специфических японских послеварийных данных к моменту первых оценок доз облучения жителей Японии. Для более корректного сравнения доз внешнего облучения жителей после двух аварий необходимо верифицировать значения параметров японской модели с помощью результатов измерений мощностей доз гамма-излучения в окружающей среде и индивидуальных доз внешнего облучения жителей, выполненных после аварии на АЭС «Фукусима-1».

Анализируя публикации, вышедшие после 2013 г., НКДАР ООН пришел к выводу, что большинство из них поддерживают или подтверждают основные предположения, сделанные в докладе 2013 г. [21], в частности:

- дозы внешнего облучения населения Японии, полученные с помощью индивидуальных измерений или оцененные на основе измерений мощности дозы в сочетании с национальными антропогенными факторами уменьшения дозы, в целом согласуются с выводами отчета 2013 г.;
- дозы внешнего облучения населения Японии продолжают снижаться в соответствии с выводами доклада 2013 г.

Более подробному анализу результатов натурных исследований, выполненных после 2013 г. в контексте их использования для верификации «японской» модели внешнего облучения населения будет посвящена отдельная статья.

Литература

1. International Atomic Energy Agency 2006. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty years of experience. IAEA: Vienna.
2. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, 2012.
3. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan

- Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
4. Jacob P., Meckbach R. External exposure from deposited radionuclides. Proceedings of the seminar on methods and codes for assessing the off-site consequences of nuclear accidents. Brussels: Commission of the European Communities; EUR 13013; 1990.
 5. Golikov V., Wallstrom E., Wohni T., et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // *Radiat Environ Biophys.* 2007;46(4): 375-382.
 6. Golikov V.Yu., Balonov M. I., Ponomarev A.V. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov M.I. and Merwin S.E., eds. *The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.*
 7. Jacob P., Pröhl G., Likhtarev I., et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN: 1-130; 1996.
 8. Golikov V., Balonov M., Erkin V., et al. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident // *Health Phys.* 1999;77(6): 654-661.
 9. Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения. Методические указания МУ 2.6.1.784-99. Минздрав России, М., 1999. 19 с.
 10. Реконструкция накопленной в 1986-1994 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Методические указания МУ 2.6.1-96. Минздрав России, 1996. 33 с.
 11. Jacob P., Meckbach R., Müller H.M. Reduction of external exposure from deposited Chernobyl activity by run-off, weathering, street cleaning and migration in the soil. *Radiat. Prot. Dosim.* 1987;21: 51-57.
 12. Романович И.К. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / Под ред. Г.Г. Онищенко. СПб.: НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.
 13. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Ponomarev A.V. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov M.I. and Merwin S.E., eds. *The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.*
 14. Pitkevich V.A., Shershakov V.M., Duba V.V. et al. Reconstruction of composition of the Chernobyl radionuclide fallout in the territories of Russia // *Radiation and Risk.* 1993;(3): 62-93.
 15. Jacob P., Rosenbaum H., Petoussi N., Zankl M. Calculation of organ doses from environmental gamma rays using human phantoms and Monte Carlo methods. Part II: Radionuclides distributed in the air or deposited on the ground. GSF-National Research Center on Environment and Health. Neuherberg, Germany: GSF-Bericht 12/90; 1990.
 16. 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. Biophysics.* 2002;41(10): 185-193.
 17. Andersson K.G., Roed J., Jacob P., Meckbach R. Weathering of Cs-137 on various surfaces in inhabited areas and calculated location factors. In: *Deposition of radionuclides, their subsequent relocation in the environment and resulting implications. Report EUR 16604 EN, European Commission, Luxembourg; 1995: 47-56.*
 18. Meckbach R., Jacob P. Gamma exposures due to radionuclides deposited in urban environments. Part II: Location factors for different deposition patterns // *Radiat. Prot. Dosim.* 1988;25: 181-190.
 19. Jacob P., Meckbach R. Measurements after the Chernobyl accident regarding the exposure of an urban population. IN: *Restoration of environments affected by residues from radiological accidents: Approaches to decision making*, pp. 34-41. IAEA-TECDOC-1131. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2000.
 20. Petoussi-Hens N., Schlattl H., Zankl M., et al. Organ doses from environmental exposures calculated using voxel phantoms of adults and children // *Phys. Med. Biol.* 2012;57: 5679-5713.
 21. Developments since the 2013 UNSCEAR report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the Great East-Japan earthquake and tsunami. A 2017 white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. New York, 2017.

Поступила: 09.01.2020 г.

Голиков Владислав Юрьевич – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

Для цитирования: Голиков В.Ю. Дозиметрия внешнего облучения населения: сравнение аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 27-37. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-27-37

Dosimetry of external population exposure: a comparison of the Chernobyl and Fukushima accidents

Vladislav Yu. Golikov

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

The paper is devoted to comparing the models and the doses of the population external exposure from radioactive fallout after the accident at the Chernobyl and Fukushima-1 NPPs estimated with their help. In the case of the Fukushima-1 accident, the model proposed by the UNSCEAR was used. Both the values of the doses of gamma radiation in the environment and the values of the effective doses of external exposure of comparable population groups normalized to the same surface activity of radionuclides were close for both accidents. The reasons for this are both the similarity of the isotopic compositions of the radioactive fallout and the fact that the "Japanese" model of external exposure was based on the "Chernobyl" model up to using the same numerical values for some parameters, due to the lack of specific Japanese post-accident data for the moment of the first dose estimates for the inhabitants of Japan. For a more accurate comparison of the external exposure of residents after two accidents it is necessary to verify the values of the parameters of the Japanese model using the results of measurements of gamma radiation dose rates in the environment and individual external doses of the residents after the accident at the Fukushima-1 NPP.

Key words: radiation accident, Chernobyl NPP, Fukushima-1 NPP, models of external exposure, gamma-radiation, effective dose.

References

- International Atomic Energy Agency 2006. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty years of experience. IAEA: Vienna.
- WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, 2012.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
- Jacob P, Meckbach R. External exposure from deposited radionuclides. Proceedings of the seminar on methods and codes for assessing the off-site consequences of nuclear accidents. Brussels: Commission of the European Communities; EUR 13013; 1990.
- Golikov V, Wallstrom E, Wohni T, et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiat Environ Biophys.* 2007;46(4): 375-382.
- Golikov Vy, Balonov MI, Ponomarev AV. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov MI and Merwin SE, eds. The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.
- Jacob P, Pröhl G, Likhtarev I, et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN: 1-130; 1996.
- Golikov V, Balonov M, Erkin V, et al. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident. *Health Phys.* 1999;77(6): 654-661.
- Methodological guidelines MG 2.6.1.784-99. Zoning of the Russian Federation settlements contaminated as a result of the Chernobyl accident according to the criterion of the annual population dose. Moscow: Minzdrav of Russia; 1999: 19 (In Russian).
- Methodological guidelines MG 2.6.1.579-96. The reconstruction of population average accumulated in 1986 – 1995 effective exposure dose in radioactively contaminated Russian settlements after 1986 Chernobyl NPP accident. Moscow: Minzdrav of Russia; 1996: 33 (In Russian).
- Jacob P, Meckbach R, Müller HM. Reduction of external exposure from deposited Chernobyl activity by run-off, weathering, street cleaning and migration in the soil. *Radiat. Prot. Dosim.* 1987;21: 51-57.
- Romanovich IK, et al. The accident at the «Fukushima-1» NPP: the preventive measures organization aimed at the preservation of the Russian Federation public health. Ed.: GG Onischenko. St. Petersburg: Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev. 2012: 336 (In Russian).
- Golikov Vy, Balonov MI, Ponomarev AV. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov MI and Merwin SE, eds. The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.
- Pitkevich VA, Shershakov VM, Duba VV, et al. Reconstruction of composition of the Chernobyl radionuclide fallout in the territories of Russia. *Radiation and Risk.* 1993;(3): 62-93.
- Jacob P, Rosenbaum H, Petoussi N, Zankl M. Calculation of organ doses from environmental gamma rays using human phantoms and Monte Carlo methods. Part II: Radionuclides distributed in the air or deposited on the ground. GSF-National Research Center on Environment and Health. Neuherberg, Germany: GSF-Bericht 12/90; 1990.
- Golikov Vy, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Radiat. Environ. Biophys.* 2002;41(10): 185-193.
- Andersson GG, Roed J, Jacob P, Meckbach R. Weathering of Cs-137 on various surfaces in inhabited areas and calcu-

Vladislav Yu. Golikov

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

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru

- lated locations factors. In: Deposition of radionuclides, their subsequent relocation in the environment and resulting implications. Report EUR 16604 EN, European Commission, Luxemburg. 1995: 47-56.
18. Meckbach R, Jacob P. Gamma exposures due to radionuclides deposited in urban environments. Part II: Location factors for different deposition patterns. *Radiat. Prot. Dosim.* 1988;25: 181-190.
19. Jacob P, Meckbach R. Measurements after the Chernobyl accident regarding the exposure of an urban population. IN: Restoration of environments affected by residues from radiological accidents: Approaches to decision making, pp. 34-41. IAEA-TECDOC-1131. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2000.
20. Petoussi-Hens N, Schlattl H, Zankl M, Endo A, Saito K. Organ doses from environmental exposures calculated using voxel phantoms of adults and children. *Phys. Med. Biol.* 2012;57: 5679–5713.
21. Developments since the 2013 UNSCEAR report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the Great East-Japan earthquake and tsunami. A 2017 white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. New York, 2017.

Received: January 09, 2020

For correspondence: Vladislav Yu. Golikov – Senior Researcher of the Medical Protection 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, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru)

For citation: Golikov V.Yu. Dosimetry of external population exposure: a comparison of the Chernobyl and Fukushima accidents. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene.* 2020;13(1): 27-37. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-27-37