

Верификация модели внешнего облучения населения Японии после аварии на 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 верификации модели внешнего облучения населения Японии от радиоактивных выпадений после аварии на АЭС «Фукусима-1», опубликованной НКДАР ООН в 2014 г. Для верификации модельных оценок в качестве независимого набора экспериментальных данных использовали результаты измерений в Японии индивидуальных доз внешнего облучения у различных групп населения в разные периоды времени после выпадений. При верификации детерминированной версии модели показано, что через год после выпадений для взрослого населения, работающего преимущественно вне помещений (строительные рабочие и сельскохозяйственные рабочие), относительные расхождения между средними значениями эффективных доз, предсказанных моделью и полученных на основе измерений, были менее 20%. Для офисных работников это различие было больше — от 34 до 70% в зависимости от того, являлись ли здания их офисов деревянными или многоэтажными бетонными. Применительно к детям младше 16 лет и более отдаленному периоду времени измерений индивидуальных доз после радиоактивных выпадений (2011–2015 гг.) различия между модельными средними значениями эффективных доз и оцененными на основании измерений колебались в пределах от -24% до +32% в разные периоды времени. При верификации стохастической версии модели показано, что для трех рассмотренных групп взрослого населения распределения индивидуальных доз подчиняются логарифмически нормальному закону, и различия в значениях расчетных и экспериментальных геометрических средних варьируют от -7% до +20%. Значения геометрического стандартного отклонения, полученные в случае моделирования, всегда были несколько выше аналогичных значений, оцененных на основе результатов измерений.

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

Введение

После аварии на АЭС «Фукусима-1» международными группами экспертов были выполнены предварительные прогнозные оценки доз у населения Японии [1, 2]. Они показали, что внешнее облучение от выпавших радионуклидов определяло более 90% от суммарной эффективной дозы облучения населения в наиболее загрязненной префектуре Фукусима [2].

В основу оценки доз внешнего облучения населения Японии 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 [1], были основаны на консервативных предположениях, в основном из-за нехватки данных реальных послеаварийных измерений к моменту подготовки материалов. Материалы НКДАР ООН и соответствующая модель, опубликованные в докладе 2014 г. [2], более широко использовали результаты измерений, полученные после аварии, и поэтому параметры модели

внешнего облучения населения НКДАР ООН более реалистично отражали развитие послеаварийной ситуации в Японии.

Верификация модельных оценок доз внешнего облучения населения после Чернобыльской аварии была выполнена как на основе результатов измерений мощностей доз в окружающей среде и последующего учета антропогенных факторов уменьшения дозы и коэффициентов перехода к эффективной дозе, так и на основе результатов измерений индивидуальных доз у жителей методом термолюминесцентной дозиметрии. Она показала, что оценки доз, полученные согласно модельным расчетам, не отличались от экспериментальных результатов с погрешностью до фактора 1,5 при доверительной вероятности 95% [3, 4].

Цель исследования – верификация параметров модели НКДАР ООН [2] и результатов расчетов с ее помощью эффективных доз внешнего облучения населения Японии от радиоактивных выпадений после аварии на

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

АЭС «Фукусима-1». Для этого использовались результаты измерений характеристик поля гамма-излучения в окружающей среде и индивидуальных доз жителей Японии в разные периоды времени после аварии.

Верификация отдельных параметров модели внешнего облучения населения

Изотопный состав выпадений

Изотопный состав и начальное заглубление радиоактивных выпадений в случае аварии на АЭС «Фукусима-1» были определены на основе измерений, выполненных на загрязненных территориях Японии, и являлись исходными данными для выполнения последующих расчетов эффективных доз внешнего облучения у населения.

В качестве верификации изотопного состава выпадений, что наиболее интересно в первые недели после выпадений, когда присутствуют короткоживущие радионуклиды, мы выполнили сравнение динамики относительного уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, оцененного на основе измерений, с одной стороны, и расчетов, согласно изотопному составу выпадений, с другой. На рисунке 1 результаты такого сравнения представлены для территории г. Нами (Nami Town), расположенного в 24 км по направлению на северо-запад от АЭС «Фукусима-1». Видно, что в течение первых 3 месяцев после аварии относительное уменьшение мощности дозы в воздухе составило порядок величины и в разные периоды времени следовало радиоактивному распаду выпавшей смеси радионуклидов, что подтверждается результатами измерений. Далее мощность дозы в воздухе практически полностью определялась гамма-излучением радионуклидов $^{137}\text{Cs} + ^{134}\text{Cs}$.

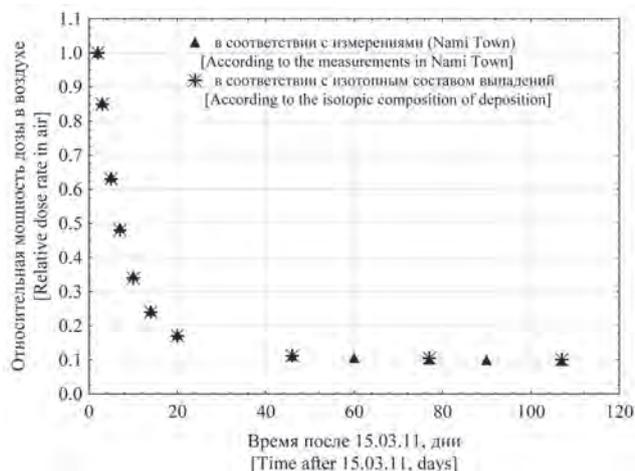


Рис. 1. Изменение относительной мощности дозы в воздухе в первые недели после выпадений

[Fig. 1. Change in relative dose rate in air in the first weeks after deposition]

Коэффициенты перехода от кермы в воздухе к эффективной дозе

Расчетные значения коэффициентов перехода от кермы в воздухе к эффективной дозе [5], используемые в модели оценки доз внешнего облучения населения Японии, были верифицированы результатами прямых фантомных экспериментов, выполненных ранее в реальных условиях

радиоактивного загрязнения в Брянской области РФ после аварии на ЧАЭС [6]. Относительные расхождения результатов измерений и расчетов находились в пределах 4–7%. Полагалось также, что изменением со временем значений коэффициентов перехода можно пренебречь. Необходимо отметить, что, в отличие от «чернобыльской» ситуации, измерения характеристик поля гамма-излучения в воздухе в Японии проводились приборами, откалиброванными в единицах амбиентного эквивалента дозы, а не поглощенной дозы в воздухе. Соотношение между амбиентным эквивалентом дозы и поглощенной дозой в воздухе для гамма-излучения радионуклидов $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ и ^{134}Cs полагалось равным 1,25 [7]. Значение этого соотношения было верифицировано результатами многочисленных одновременных измерений амбиентного эквивалента дозы и поглощенной дозы в воздухе, выполненных в период с декабря 2011 г. по декабрь 2012 г. на загрязненных территориях Японии [7].

Влияние вертикальной миграции радионуклидов цезия в почве на мощность дозы гамма-излучения

Учет влияния вертикальной миграции радионуклидов цезия в почве на мощность дозы гамма-излучения над целинными участками почвы (reference site) в модели НКДАР ООН осуществляли с помощью двухэкспоненциальной функции $r(t)$ с теми же параметрами, что и в чернобыльской дальней зоне [8, 9]. Сугубо предварительную верификацию ее параметров из-за относительно короткого периода наблюдений (~5 лет) можно выполнить на основе наблюдений:

- за изменением с течением времени значений мощности амбиентного эквивалента дозы;
- за изменением вертикального распределения радионуклидов цезия в почве, которое в течение первых лет после выпадений можно полагать экспоненциальным.

К сожалению, массовых систематических измерений характеристик поля гамма-излучения в воздухе над открытыми целинными участками почвы в доступной литературе обнаружено не было. Поэтому использовали результаты пятилетних наблюдений (апрель 2011 г. – сентябрь 2016 г.) за изменением значений мощностей амбиентного эквивалента дозы, измеренных методами аэрогамма-съёмки, над всей совокупностью загрязненных поверхностей вдоль траектории движения самолета (асфальтовые, грунтовые, целинные) [10]. Относительные результаты измерений, нормированные на результаты, полученные в ходе первой кампании измерений (апрель 2011 г.) и откорректированные с учетом радиоактивного распада радионуклидов цезия, были аппроксимированы двухэкспоненциальной функцией, аналогичной функции $r(t)$. Ее параметры оказались равными: $p_1=0,41$, $p_2=0,67$, $T_1=0,61$ года и $T_2=57$ лет, что хорошо соотносится с аналогичными значениями параметров этой функции, используемыми в модели НКДАР ООН ($p_1=0,5$, $p_2=0,5$, $T_1=1,5$ года и $T_2=50$ лет), за исключением, пожалуй, значения короткого полупериода T_1 , который оказался меньше модельного в 2,5 раза. Объяснение этому состоит в том, что в первое время после выпадений снижение мощности дозы в воздухе над твердыми поверхностями происходит гораздо быстрее, чем над почвой, за счет удаления с них части активности при уборке улиц, за счет смыва с осадками, при движении автомобилей и т.п.

Более адекватно для верификации параметров функции $r(t)$ использовать наблюдения за изменением с течением времени вертикального распределения радионуклидов цезия в верхнем почвенном слое [11, 12], полагаемого экспоненциальным и характеризующегося в этом случае единственным параметром β (г·см⁻²) [13]. Этот параметр определяет массовую глубину, на которой активность радионуклида в почве убывает в e раз по отношению к его активности на поверхности. Сразу после выпадений его можно считать равным 1 г·см⁻². Через 1,75 года (декабрь 2012 г.) и 5,5 лет (сентябрь 2016 г.) этот параметр соответствовал значениям 2 г·см⁻² и 3 г·см⁻² соответственно [11, 12]. Используя данные [7], можно рассчитать, что отношение мощностей доз в воздухе через 1,75 года ($\beta=2$ г·см⁻²) и 5,5 лет ($\beta=3$ г·см⁻²) к начальной мощности дозы сразу после выпадений ($\beta=1$ г·см⁻²) будет равно 0,84 и 0,74 соответственно. Аналогичные значения, рассчитанные с помощью функции $r(t)$, будут равны 0,70 и 0,50 соответственно, т. е. на 15% и 32% меньше. Это может быть связано: 1) с меньшей скоростью вертикальной миграции цезия в японских почвах; 2) с плохой аппроксимацией профилей вертикального распределения цезия в почве экспоненциальной функцией, особенно через 5,5 лет после выпадений.

Антропогенные факторы уменьшения дозы

Наиболее важными среди антропогенных факторов, влияющих на характеристики поля гамма-излучения, являются защитные свойства зданий (факторы места), которые в Японии, исходя из национальной архитектурной специфики, должны были бы отличаться от аналогичных европейских значений, используемых в модели НКДАР ООН. Напомним, что в этой модели здания подразделяли на три типа: одноэтажный деревянный дом, одноэтажный деревянный огнеупорный дом и трехэтажный бетонный дом с начальными значениями факторов места 0,4, 0,2 и 0,1 соответственно [14]. Далее зависимость факторов места от времени экстраполировали на основе чернобыльских измерений [9, 15].

Систематическая инструментальная оценка защитных свойств зданий началась в Японии через несколько месяцев после аварии [16, 17, 18]. Результаты этих измерений (более 200 зданий), обобщенные в работе [19], свидетельствуют, что начальные значения факторов уменьшения дозы внутри деревянных зданий и одно- и двухэтажных бетонных зданий находились в пределах 0,38–0,55 и 0,10–0,19 соответственно. Это укладывается в диапазон разброса значений этих факторов, сообщаемых МАГАТЭ в отношении европейских зданий, – 0,4 (0,2–0,5) и 0,2 (0,04–0,4) [14]. Оценить изменения этих начальных значений со временем пока что не представляется возможным.

Необходимо также отметить, что скорость уменьшения мощности дозы в воздухе над асфальтовыми поверхностями в Японии была больше, чем в Европе и России после аварии на ЧАЭС. Согласно измерениям, выполненным в г. Фукусима [20], так называемый «экологический» полупериод уменьшения мощности дозы над асфальтом (т.е. связанный только с миграцией радионуклидов, исключая их радиоактивный распад) составлял 0,54 года, тогда как в модели НКДАР ООН использовали значение 0,9 года.

Верификация эффективных доз внешнего облучения населения Японии, предсказываемых с помощью модели НКДАР ООН

Если выше речь шла о верификации отдельных параметров модели НКДАР ООН внешнего облучения населения Японии, то теперь мы перейдем к верификации получаемых с ее помощью эффективных доз внешнего облучения различных групп населения в разные периоды времени после радиоактивных выпадений.

Одной из первых работ по инструментальной оценке индивидуальных доз внешнего облучения жителей после аварии на АЭС «Фукусима-1» явились измерения, выполненные в антропогенной среде, на территории наиболее загрязненной префектуры Фукусима в феврале – апреле 2012 г., т.е. через год после аварии [21, 22].

Измерения индивидуальных доз у жителей выполнялись индивидуальными дозиметрами, калиброванными в единицах индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$. Его значение в условиях ротационной (ROT) геометрии облучения для энергий фотонного излучения выше 0,1–0,2 МэВ, что соответствовало реальным условиям облучения жителей, можно полагать равным эффективной дозе [23]. В случае измерений индивидуальных доз накопленная в течение времени измерения доза включала вклад природного фона: 18 мкЗв·мес⁻¹ (0,024 мкЗв·ч⁻¹) и 28 мкЗв·мес⁻¹ (0,038 мкЗв·ч⁻¹) за счет космического и терригенного излучения соответственно [24]. В измерениях участвовали 4 группы взрослого населения, отличающихся условиями работы. Для верификации модели НКДАР ООН мы использовали результаты измерений в марте 2012 г. у представителей трех групп населения – офисные работники (indoor workers) и две группы работников (строительные и сельскохозяйственные рабочие), производственная деятельность которых проходит преимущественно вне помещений (outdoor workers). Распределение результатов измерений индивидуальных доз у всех групп взрослого населения подчинялось логарифмически нормальному закону с геометрическими средними (ГС) и геометрическими стандартными отклонениями (ГСО), равными 115, 153 и 153 мкЗв·мес⁻¹ и 1,32, 1,26 и 1,49 для офисных работников, строительных и сельскохозяйственных рабочих соответственно [21].

Для расчета накопленной за март 2012 г. средней эффективной дозы у вышеуказанных групп населения, различающихся условиями проживания и работы, использовали формулы, описывающие модель НКДАР ООН [25]. Интегрирование проводили в пределах времени от 340 до 371 дня после принятой в модели даты радиоактивных выпадений – 15.03.2011 г. Для всех трех групп населения (офисные работники, строительные и сельскохозяйственные рабочие) в качестве дома проживания использовали деревянные дома, т.к. их в общем числе обследованных домов было 90%. Для офисных работников были выделены две группы, отличающиеся типом офисных зданий, – деревянные и многоэтажные бетонные дома. В результате расчетов были получены следующие месячные эффективные дозы, нормированные на единичную поверхностную активность ¹³⁷Cs (на 15.03.2011 г.): 0,62, 0,79, 0,82 и 0,89 (мкЗв·мес⁻¹) · (кБк·м⁻²)⁻¹ для двух групп офисных ра-

ботников, строительных рабочих и сельскохозяйственных рабочих соответственно. Подавляющее количество обследованных офисных работников и сельскохозяйственных рабочих проживали и работали в г. Фукусима и его окрестностях. Однако часть строительных рабочих проживала (работала) в соседнем г. Дате (Date City), где поверхностная активность ^{137}Cs была в 1,5 раза меньше. Не имея возможности учесть это, мы использовали для получения абсолютных значений эффективных доз среднюю поверхностную активность ^{137}Cs для г. Фукусима, равную $160 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ [26]. Так как в работе [21] в качестве характеристик логнормальных распределений измеренных индивидуальных доз приводятся значения ГС и ГСО, то средние арифметические были рассчитаны нами на основании этих значений логнормальных распределений. После этого для получения дозы только за счет выпадений из средних арифметических значений был вычтен вклад естественного фона в показания индивидуальных дозиметров, равный $46 \text{ мкЗв}\cdot\text{мес}^{-1}$. Так как соотношение мощностей доз терригенного излучения на открытой местности и внутри деревянных домов составляло $0,86 \pm 0,17$ [17], а данными об аналогичном соотношении в японских бетонных домах мы не располагали, то никакие поправки в месячное значение дозы терригенного излучения на открытой местности $28 \text{ мкЗв}\cdot\text{мес}^{-1}$ не вводились. То есть это же значение использовалось при нахождении человека внутри зданий. Месячное значение дозы космического излучения на открытой местности $18 \text{ мкЗв}\cdot\text{мес}^{-1}$ также не корректировалось для учета его ослабления внутри зданий.

Результаты сравнения средних арифметических значений эффективных доз, оцененных на основании результатов моделирования и измерений, представлены в таблице 1. Прежде чем перейти к их комментариям, отметим, что неопределенность фиксированной (детерминированной) величины в отношении конечной оценки (end-point) называется неопределенностью типа В (систематическая составляющая погрешности), а если в качестве конечной оценки используется распределение индивидуальных доз, то неопре-

деленность оценки дозы индивида, случайно выбранного из этого распределения, называется неопределенностью типа А (случайная составляющая погрешности) [27].

Из представленных в таблице 1 данных видно, что для групп населения, работающих преимущественно вне помещений (строительные рабочие и сельскохозяйственные рабочие), расхождения между предсказаниями модели и измерениями менее 20%. Для офисных работников это различие больше – от 34% до 70% в зависимости от того, являются их офисы деревянными или многоэтажными бетонными зданиями. Учитывая состав зданий в обследуемом регионе (см. выше), реальное различие для офисных работников будет, по-видимому, менее 50%. Таким образом, детерминированная версия модели НКДАР ООН предсказывает оценки средних значений эффективных доз внешнего облучения различных групп населения, находящиеся в удовлетворительном согласии с измеренными в г. Фукусима значениями. К сожалению, более обоснованной количественной оценки неопределенности типа В, предсказываемых моделью средних значений эффективных доз, пока что сделать нельзя, т. к. для этого требуется провести аналогичные исследования во многих населенных пунктах, чтобы построить функцию распределения различий между модельными и измеренными значениями доз. Такая работа была проделана после Чернобыльской аварии в России, и было показано, что модельные оценки средних эффективных доз у жителей не отличаются от их аналогов, основанных на измерениях индивидуальных доз методом ТЛД до коэффициента 1,5 с доверительной вероятностью 95% [28].

Средние значения доз облучения населения полезны для оценки возможных медицинских последствий. Тем не менее, необходимы также оценки распределения доз облучения у населения, позволяющие понять, не может ли часть населения облучаться дозами за рамками диапазона малых доз (т.е. $> 100 \text{ мЗв}$). Кроме того, это необходимо для оценки уровней облучения критической группы населения или репрезентативного индивидуума (representative individual) и прогнозирования необходимости проведения за-

Таблица 1
Сравнение средних эффективных доз у трех групп взрослого населения г. Фукусима через 1 год после выпадений, оцененных на основании измерений и предсказанных моделью НКДАР ООН

[Table 1

Comparison of mean effective doses in three population groups in Fukushima City one year after fallout estimated from measurements and predicted by the UNSCEAR model]

| Группа населения [Population group] | Средняя эффективная доза за счет радиоактивных выпадений (март 2012 г.), $\text{мкЗв}\cdot\text{мес}^{-1}$ [Mean effective dose due to radioactive deposition (March 2012), $\mu\text{Sv}\cdot\text{month}^{-1}$] | |
|--|--|-----------------------------|
| | Предсказания модели [Model prediction] | Измерения [Measurements] |
| Офисные работники [Office workers] | ¹⁾⁹⁹ – ²⁾¹²⁶ | ²⁾⁷⁴ |
| Строительные рабочие [Contractor's Association] | 132 | 111 |
| Сельскохозяйственные рабочие [Agricultural Cooperatives] | 142 | 120 |

¹⁾ Первая цифра соответствует многоэтажным бетонным офисным зданиям, вторая – деревянным офисным зданиям.
[The first number corresponds to multi-story concrete buildings, the second one to wooden office buildings]

²⁾ Арифметические средние значения, рассчитанные на основании ГС и ГСО логнормальных распределений.
[Arithmetic means calculated on the base of GM and GSD of lognormal distributions].

щитных мероприятий. Кроме детерминированной версии модели НКДАР ООН, можно верифицировать также ее стохастическую модификацию (она не содержится в докладе НКДАР ООН [2]). В этом случае при расчете доз в качестве ряда исходных данных используют не средние значения параметров модели, а их распределения. Как следствие, на выходе расчета получают распределение доз, 95% перцентиль которого МКРЗ определила как дозу облучения репрезентативного индивидуума [29].

Для проведения стохастического моделирования использовали следующее уравнение для расчета эффективной дозы [25]:

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

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; f_j – фактор места, отн. ед.; p_{ij} – фактор поведения, отн. ед.

В модели внешнего облучения факторы места f_j (location factors) получаются делением мощности дозы гамма-излучения в данной локации на мощность дозы над целинным участком почвы с поверхностной активностью ¹³⁷Cs, равной ее среднему значению на исследуемой территории (reference site). То есть вариабельность значений факторов места содержит вариабельность значений поверхностной активности ¹³⁷Cs. Поэтому если при проведении стохастического моделирования используется распределение одной из этих величин (например, поверхностной активности ¹³⁷Cs), то значения второй (факторов места) следует считать постоянными, и наоборот. В противном случае, если при проведении стохастического моделирования в качестве исходных данных используют распределения обеих величин, то в результате мы получим неадекватно широкое распределение индивидуальных доз.

На рисунке 2 показано распределение поверхностной активности ¹³⁷Cs в г. Фукусима. Оно представляет собой логарифмически нормальное распределение с ГС = 125 кБк·м⁻² и ГСО = 2,13 (арифметическое среднее – 160 кБк·м⁻²) [26].

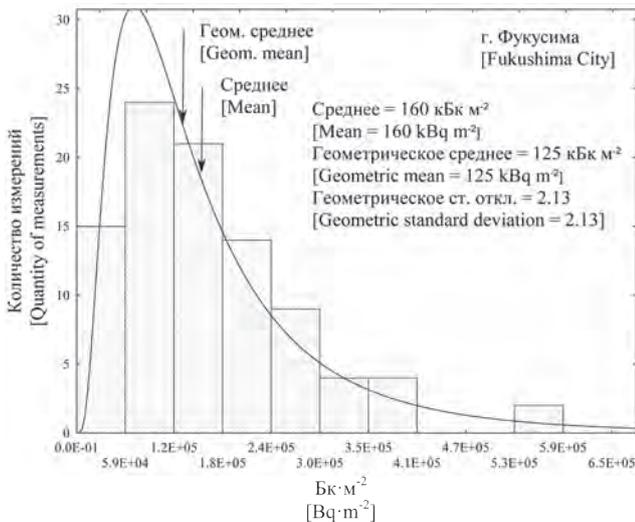


Рис. 2. Распределение поверхностной активности ¹³⁷Cs в г. Фукусима
[Fig.2. Distribution of ¹³⁷Cs surface activity in Fukushima City]

Для реализации метода стохастического моделирования использовали следующее выражение для стохастического моделирования распределения эффективной дозы через год после выпадений с помощью программы Crystal Ball [30]:

$$\dot{E}_i^{dep}(t) = (0,001 \cdot 31 \cdot LN(^{137}Cs, 125, 2, 13) \cdot 0,75 \cdot (1,72 \cdot 0,977 \cdot 0,81 + 4,68 \cdot 0,714 \cdot 0,81) \cdot \sum_j f_j(t) \cdot p_{ij}) + 46 \quad (2)$$

где: $LN(^{137}Cs, 125 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}, 2, 13)$ – логарифмически нормальное распределение поверхностной активности ¹³⁷Cs по территории г. Фукусима с ГС = 125 кБк·м⁻² и ГСО = 2,13; 0,001 – соотношение между нГр и мкГр; 31 – количество дней в марте; $(1,72 \cdot 0,977 \cdot 0,81 + 4,68 \cdot 0,714 \cdot 0,81)$ – среднее значение кермы в воздухе над целинной почвой от смеси радионуклидов ¹³⁷Cs+¹³⁴Cs через год после выпадений, (нГр·час⁻¹)/(кБк·м⁻²); 0,75 – коэффициент перехода от значения кермы в воздухе к эффективной дозе для взрослого человека, Зв·Гр⁻¹; $f_j(t)$ – фактор места через год после выпадений; p_{ij} – фактор поведения, час·день⁻¹; 46 мкЗв·мес⁻¹ – вклад естественного фона в месячное значение эффективной дозы.

Значения факторов места (location factors) через год после выпадений для соответствующих локаций внутри городской среды рассчитывали согласно соотношениям из [2, 25]:

$$f_{hard} = 0,50 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{0,9 \text{ г.}}\right) + 0,1 = 0,5 \cdot 0,46 + 0,1 = 0,33$$

$$f_{dirt} = 0,50 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{2,2 \text{ г.}}\right) + 0,25 = 0,5 \cdot 0,3 + 0,25 = 0,62$$

$$f_{build} = a_1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{1,8 \text{ г.}}\right) + a_2 = \begin{cases} 0,34(\text{деревянный дом}) \\ 0,17(1\text{-}2\text{-х этажный бетонный дом}) \\ 0,084(\text{многоэтажный бетонный дом}) \end{cases}$$

Далее усредняли f_{build} по типу зданий: f_{build} (среднее по типу здания) = $0,34 \cdot 0,9 + 0,17 \cdot 0,025 + 0,084 \cdot 0,075 = 0,32$.

Результаты моделирования распределения эффективной дозы внешнего облучения представителей разных групп взрослого населения представлены на рисунках 3–6.

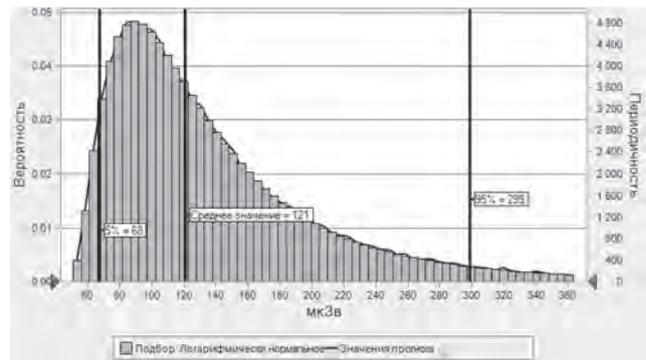


Рис. 3. Распределение индивидуальной дозы внешнего облучения офисных работников г. Фукусима, проживающих в деревянных и работающих в многоэтажных бетонных домах, в марте 2012 г.
[Fig. 3. Distribution of individual external dose for the office workers living in wooden houses and working in multi-story concrete buildings in Fukushima City in March 2012]

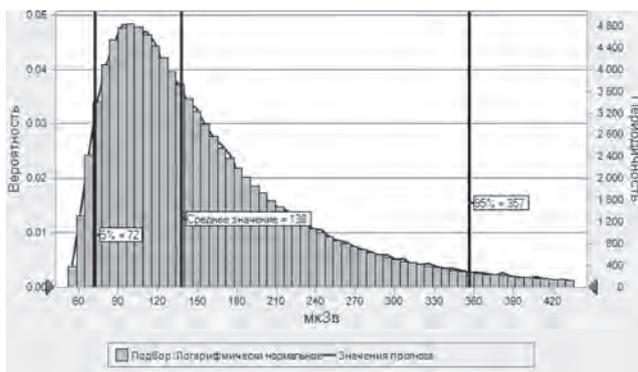


Рис. 4. Распределение индивидуальной дозы внешнего облучения офисных работников г. Фукусима, проживающих и работающих в деревянных домах, в марте 2012 г.

[Fig. 4. Distribution of individual external dose for the office workers living in wooden houses and working in wooden buildings in Fukushima City in March 2012]

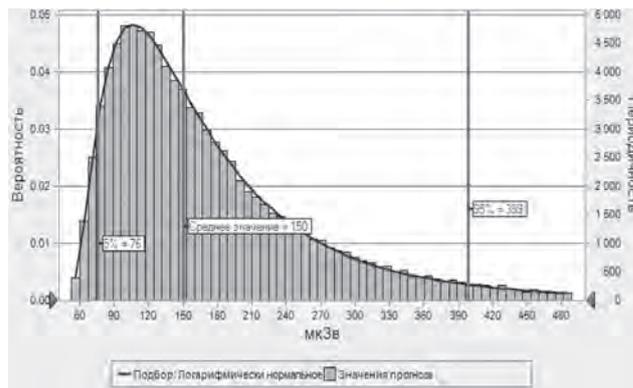


Рис. 6. Распределение индивидуальной дозы внешнего облучения сельскохозяйственных рабочих г. Фукусима, проживающих в деревянных домах, в марте 2012 г.

[Fig. 6. Distribution of individual external dose for the agricultural workers living in wooden houses in Fukushima City in March 2012]

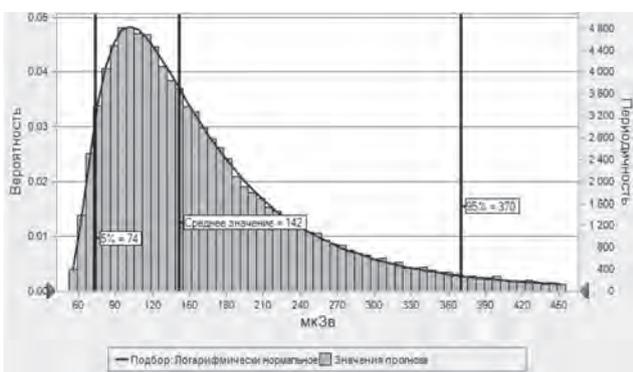


Рис. 5. Распределение индивидуальной дозы внешнего облучения строительных рабочих г. Фукусима, проживающих в деревянных домах, в марте 2012 г.

[Fig. 5. Distribution of individual external dose for the construction workers living in wooden houses in Fukushima City in March 2012]

В таблице 2 представлено сравнение параметров логнормальных распределений эффективных доз внешнего облучения у представителей разных групп взрослого населения, полученных путем моделирования и путем измерений индивидуальных доз. Видно, что для всех рассматриваемых групп населения относительные различия в значениях ГС варьируют в пределах от -7% до +20%. Значения ГСО, полученные в случае моделирования, всегда несколько выше аналогичных значений, оцененных на основе результатов измерений. Это соответствующим образом отражается на различии между значениями 5% и 95% перцентилей модельных распределений и значениями min и max, наблюдавшемся в экспериментальных распределениях. Меньший разброс экспериментальных значений, возможно, связан с тем, что испытуемые не всегда четко соблюдали правила ношения индивидуальных дозиметров. При выполнении аналогичных измерений после Чернобыльской аварии существовала специальная процедура отсеивания результатов на основе:

Сравнение параметров логнормальных распределений эффективных доз у трех групп взрослого населения г. Фукусима через год после выпадений, оцененных на основании измерений и предсказанных моделью НКДАР ООН Таблица 2

Comparison of parameters of lognormal distributions in three population groups in Fukushima City one year after fallout estimated from measurements and predicted by the UNSCEAR model] [Table 2]

| Группа населения [Population group] | Параметры логнормальных распределений [Parameters of lognormal distributions] | | | | | | | |
|--|--|--------------|-------|---------|---|--------------|-----|-----|
| | Согласно модели НКДАР [According to the UNSCEAR model] | | | | Согласно измерениям [21] [According to the measurements] | | | |
| | ГС [GM] | ГСО [GSD] | 5% | 95% | ГС [GM] | ГСО [GSD] | min | max |
| Офисные работники [Office workers] | ¹⁾ 121–138 | 1,57–1,62 | 68–72 | 299–357 | 115 | 1,32 | 70 | 211 |
| Строительные рабочие [Contractor's Association] | 142 | 1,63 | 74 | 370 | 153 | 1,26 | 97 | 229 |
| Сельскохозяйственные рабочие [Agricultural Cooperatives] | 150 | 1,65 | 76 | 399 | 153 | 1,49 | 64 | 414 |

¹⁾ Первая цифра соответствует многоэтажным бетонным офисным зданиям, вторая – деревянным офисным зданиям.
[The first number corresponds to multi-story concrete buildings, the second one to wooden office buildings]

1) их сравнения с минимально и максимально разумно возможными накопленными дозами в данном населенном пункте за период проведения измерений; 2) величины разброса в показаниях партии индивидуальных дозиметров, выданных жителям данного населенного пункта [28].

Неопределенность типа А модельных оценок часто выражают в виде отношения 95% и 5% квантилей в распределении конечной величины. В случае индивидуальной дозы неопределенность типа А ее оценки включает в себя и естественную ее вариабильность, т.к. условия поведения и проживания различных индивидуумов могут существенно различаться. В данном случае неопределенность типа А оценки индивидуальной дозы лежит в пределах значений 5,4–5,8, что хорошо согласуется с аналогичным значением ~5 после Чернобыльской аварии [3, 4, 9].

В качестве примера верификации модели НКДАР ООН для других возрастных групп населения и более отдаленного периода времени после радиоактивных выпадений используем результаты пятилетних измерений индивидуальных доз у детей не старше 16 лет в г. Сомы (Soma City) в 2011–2015 гг. [24]. Каждый цикл измерений проводился в течение 3 месяцев, а количество участников в цикле составляло от 2000 до 3000 человек. Среднее значение поверхностной активности (на 15.03.2011 г.) принималось равным 78,5 кБк·м⁻² [26]. Расчеты, согласно модели, проводились для 10-летних детей, проживающих в деревянных домах и учащихся в многоэтажном школьном здании, для следующих периодов времени: 1) 01.10.11–31.12.11; 2) 01.07.12–30.09.12; 3) 01.05.13–31.07.13; 4) 01.09.14–30.11.14; 5) 01.09.15–30.11.15. Расчеты выполнялись аналогично тому, как это было описано выше для взрослого населения. Сравнение средних значений эффективных доз внешнего облучения (за вычетом естественного фона) в указанные 3-месячные периоды времени представлены в таблице 3. Видно, что в первые 3 года после аварии модельные оценки превышали результаты измерений на 17–32%, а в следующие два года были меньше их на 13–24%. Т.е. и в следующие несколько лет предсказания модели можно считать вполне удовлетворительными.

Заключение

Не существует модели, которая могла бы точно описать поведение радионуклидов в окружающей среде и формирование доз облучения населения. Степень реа-

листичности оценок в значительной мере зависит от того, насколько сама формулировка модели и ее параметры соответствуют той конкретной ситуации, которую должна описывать модель. В связи с этим процедура верификации модельных расчетов является одним из наиболее важных этапов в разработке модели.

Анализируя публикации, посвященные исследованию радиационной обстановки и доз облучения населения Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1», вышедшие после публикации доклада в 2014 г., НКДАР ООН пришел к выводу, что большинство из них поддерживают или подтверждают основные предположения, сделанные в докладе на основании результатов моделирования [31]. Тем не менее, конкретных количественных критериев, численных примеров в отношении согласия (расхождения) как отдельных параметров модели, так и доз облучения жителей с реальными результатами наблюдений там не содержится.

В настоящей работе представлена попытка восполнить этот пробел, т.е. привести конкретные количественные примеры верификации модели внешнего облучения населения Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1». В качестве независимого набора экспериментальных данных использовали результаты измерений индивидуальных доз внешнего облучения у различных групп населения в разные периоды времени после выпадений.

При верификации детерминированной версии модели для взрослого населения показано, что для групп населения, работающих преимущественно вне помещений (строительные рабочие и сельскохозяйственные рабочие), относительные расхождения между средними значениями эффективных доз, предсказанных моделью и измерениями, были менее 20%. Для офисных работников это различие было больше – от 34 до 70% в зависимости от того, являются их офисы деревянными или многоэтажными бетонными зданиями. Учитывая состав зданий в обследуемом регионе, реальное различие для офисных работников будет, по-видимому, менее 50%.

При верификации детерминированной версии модели НКДАР ООН применительно к детям младше 16 лет различия между модельными средними значениями эффективных доз и оцененными на основании измерений колебались в пределах от -24% до +32% в разные периоды времени после выпадений (2011–2015 гг.).

Таблица 3

Сравнение средних эффективных доз у детей г. Сомы в разные периоды времени после выпадений, оцененных на основании измерений и предсказанных моделью НКДАР ООН

[Table 3

Comparison of mean effective doses in children in Soma City in different time periods after fallout estimated from measurements and predicted by the UNSCEAR model]

| Период измерений [Period of measurements] | Средняя эффективная доза за счет радиоактивных выпадений, мкЗв·мес ⁻¹ [Mean effective dose due to radioactive deposition, μSv·mo ⁻¹] | |
|--|--|-----------------------------|
| | Предсказания модели [Model prediction] | Измерения [Measurements] |
| 01.10.11–31.12.11 | 204 | 174 |
| 01.07.12–30.09.12 | 130 | 107 |
| 01.05.13–31.07.13 | 85 | 64 |
| 01.09.14–30.11.14 | 49 | 56 |
| 01.09.15–30.11.15 | 36 | 47 |

При верификации стохастической версии модели показано, что для трех групп взрослого населения распределения индивидуальных доз подчиняются логарифмически нормальному закону и относительные различия в значениях расчетных и экспериментальных геометрических средних варьируют от -7% до +20%. Значения геометрического стандартного отклонения, полученные в случае моделирования, всегда были несколько выше аналогичных значений, оцененных на основе результатов измерений.

Таким образом, как детерминированная, так и стохастическая версии модели НКДАР ООН предсказывают оценки параметров распределений индивидуальных доз внешнего облучения различных групп населения Японии, находящиеся в удовлетворительном согласии с их оценками, сделанными на основании измерений.

Литература

1. WHO – World Health Organization. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, 2012.
2. 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.
3. Golikov V., Balonov M., Erkin V., Jacob P Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident // *Health Phys.* 1999. Vol. 77, No 6. P. 654-661.
4. Golikov V.Yu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident // *Radiation Hygiene.* 2018. Vol. 11, No. 4. P. 39-50.
5. 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. No 57. P. 5679–5713.
6. 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. Vol. 46, No 4. P. 375-382.
7. Saito K., Petoussi-Hens N. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground // *Journal of Nuclear Science and Technology.* 2014. Vol. 51, No 10. P. 1274-1287. DOI: 10.1080/00223131.2014.919885.
8. Jacob P., Pröhl G., Likhtarev I., et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN: 1-130; 1996.
9. 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.
10. Sanada Y., Urabe Y., Sasaki M., et al. Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident // *Journal of Environmental Radioactivity.* 2018. Vol. 192. P. 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.09.014>.
11. Mikami S., Maeyama T., Hoshide Y., et al. The air dose rate around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant: its spatial characteristics and temporal changes until December 2012 // *J. Environ. Radioact.* 2015. No 139. P. 250-259.
12. Mikami S., Tanaka H., Matsuda H., et al. The deposition densities of radiocesium and the air dose rates in undisturbed fields around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant; their temporal changes for five years after the accident // *Journal of Environmental Radioactivity.* 2019. Vol. 210. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.03.017>.
13. International Commission on Radiation Units and Measurements, 1994. Gamma ray spectrometry in the environment. ICRU Report 53.
14. IAEA (International Atomic Energy Agency), 2000. Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency (IAEA-TECDOC-1162).
15. 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. No 21. P. 51-57.
16. Kamada N., Saito O., Endo S., et al. Radiation doses among residents living 37 km northwest of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant // *J. Environ. Radioact.* 2012. No 110. P. 84–89.
17. Yoshida-Ohuchi H., Hosoda M., Kanagami T., et al. Reduction factors for wooden house due to external γ -radiation based on in situ measurements after the Fukushima nuclear accident // *Sci. Rep.* 2014. Vol. 4, No 7541. P. 1–6.
18. Matsuda N., Mikami S., Sato T., Saito K. Measurements of air dose rates in and around houses in the Fukushima Prefecture in Japan after the Fukushima accident // *J. Environ. Radioact.* 2016. Vol. 166, Part 3. P. 427–435.
19. Yoshida-Ohuchi H., Matsuda N., Saito K. Review of reduction factors by buildings for gamma radiation from radiocesium deposited on the ground due to fallout. 2018. Vol. 187. P. 32-39: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.006> (Дата обращения: 20.04.2020)
20. Radiation monitoring and dose estimation of the Fukushima Nuclear Accident. Editor Takahashi S. 2014. ISBN 978-4-431-54582-8. DOI 10.1007/978-4-431-54583-5.
21. Takahara S., Abe T., Iijima M., et al. Statistical characterization of radiation doses from external exposures and relevant contributors in Fukushima prefecture // *Health Phys.* 2014. Vol. 107, No 4. P. 326-335.
22. Takahara S., Iijima M., Yoneda M., et al. A probabilistic approach to assess external doses to the Public considering spatial variability of radioactive contamination and inter population differences in behavior pattern // *Risk Analysis.* 2017. <https://doi.org/10.1111/risa.12900>
23. ICRP, 1996. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3/4).
24. Tsubokura M., Murakami M., Nomura S., et al. Individual external doses below the lowest reference level of 1 mSv per year five years after the 2011 Fukushima nuclear accident among all children in Soma City, Fukushima: A retrospective observational study // *PLoS ONE.* 2017. Vol. 12, No 2. P. e0172305. doi:10.1371/journal.pone.0172305
25. 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.
26. База данных: http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/017/shiryu/_icsFiles/fieldfile/2011/09/02/1310688_1.pdf (Дата обращения: 25.05.2020)
27. IAEA (1989) Evaluating the reliability of predictions made using environmental transfer models. IAEA Safety Series 100. International Atomic Energy Agency, Vienna
28. Golikov V, Balonov M, Erkin V. et al. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident // *Health Phys.* 1999. Vol. 77, No 6. P. 654-661.
29. ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimization of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).

30. Oracle Crystal Ball: <http://www.oracle.com/crystalball> (Дата обращения: 25.05.2020)
31. 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: 28.04.2020 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. Верификация модели внешнего облучения населения Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 31-40. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-31-40

Verification of model of external population exposure in Japan after the accident at the “Fukushima-1” NPP

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 the verification of the model of external exposure of the Japanese population from radioactive fallout after the accident at the “Fukushima-1” NPP published by UNSCEAR in 2014. The paper presents specific quantitative examples of the verification of the external exposure model of the Japanese population after the accident at the “Fukushima-1” nuclear power plant. As an independent set of experimental data for validation of the model estimates we used the results of measurements of individual doses of external radiation in various population groups in Japan in different time periods after fallout. In the case of the deterministic version of the model, it was shown that for the adult population working mainly outdoors (construction workers and agricultural workers), the differences between the average values of effective doses predicted by the model and those obtained on the basis of measurements were less than 20%. For office workers, this difference was larger, from 34 to 70%, depending on whether their office buildings are wooden or multi-story concrete. For children under 16 years of age and a longer period of time for measuring individual doses after radioactive fallout (2011 – 2015), the differences between the model average effective doses and those estimated on the basis of measurements ranged from –24% to +32% in different time periods. In the case of the stochastic version of the model, it was shown that for the three considered groups of the adult population the distributions of individual doses obey the logarithmically normal law and the differences in the values of the calculated and experimental geometric means ranged from –7% to +20%. The geometric standard deviation values obtained in the simulation were always slightly higher than the similar values estimated based on the measurement results.

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

References

1. WHO – World Health Organization. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, 2012.
2. 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.
3. Golikov V, Balonov M, Erkin V, Jacob P. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident. *Health Phys.* 1999;77(6): 654-661.

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

4. 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.
5. Petoussi-Henss NH, 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.
6. Golikov V, Wallstrom E, Wohni T, Tanaka K, Endo S, Hoshi M. 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.
7. Saito K, Petoussi-Henss N. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2014;51(10): 1274-1287. DOI: 10.1080/00223131.2014.919885.
8. Jacob P, Pröhl G, Likhtarev I, Kovgan L, Gluvchinsky R, Perevovnikov O, et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN: 1-130; 1996.
9. 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.
10. Sanada Y, Urabe Y, Sasaki M, Ochi K, Torii T. Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192: 417-425 <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.09.014>.
11. Mikami S, Maeyama T, Hoshide Y, Sakamoto R, Sato S, Okuda N, et al. The air dose rate around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant: its spatial characteristics and temporal changes until December 2012. *J. Environ. Radioact.* 2015;139: 250-259.
12. Mikami S, Tanaka H, Matsuda H, Sato S, Hoshide Y, Okuda N, et al. The deposition densities of radiocesium and the air dose rates in undisturbed fields around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant; their temporal changes for five years after the accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019; 210: 105941 <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.03.017>.
13. International Commission on Radiation Units and Measurements, 1994. Gamma ray spectrometry in the environment. ICRU Report 53.
14. IAEA (International Atomic Energy Agency), 2000. Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency (IAEA-TECDOC-1162).
15. 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.
16. Kamada N, Saito O, Endo S, Kimura A, Shizuma K. Radiation doses among residents living 37 km northwest of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant. *J. Environ. Radioact.* 2012;110: 84–89.
17. Yoshida-Ohuchi H, Hosoda M, Kanagami T, Uegaki M, Tashima H. Reduction factors for wooden house due to external γ -radiation based on in situ measurements after the Fukushima nuclear accident. *Sci. Rep.* 2014;4(7541): 1–6.
18. Matsuda N, Mikami S, Sato T, Saito K. Measurements of air dose rates in and around houses in the Fukushima Prefecture in Japan after the Fukushima accident. *J. Environ. Radioact.* 2016;166(Part3): 427–435.
19. Yoshida-Ohuchi H, Matsuda N, Saito K. Review of reduction factors by buildings for gamma radiation from radio-caesium deposited on the ground due to fallout. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019; 187: 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.006>
20. Radiation monitoring and dose estimation of the Fukushima Nuclear Accident. Editor Takahashi S. 2014. ISBN 978-4-431-54582-8. DOI 10.1007/978-4-431-54583-5.
21. Takahara S, Abe T, Iijima M, Shimada K, Shiratori Y. Statistical characterization of radiation doses from external exposures and relevant contributors in Fukushima prefecture. *Health Phys.* 2014; 107(4): 326-335.
22. Takahara S, Iijima M, Yoneda M, Shimada Y. A probabilistic approach to assess external doses to the Public considering spatial variability of radioactive contamination and inter population differences in behavior pattern. *Risk Anal* 2017; 39(1): 212-224. <https://doi.org/10.1111/risa.12900>
23. ICRP, 1996. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26(3/4).
24. Tsubokura M, Murakami M, Nomura S, Morita T, Nishikawa Y, Leppold C, et al. Individual external doses below the lowest reference level of 1 mSv per year five years after the 2011 Fukushima nuclear accident among all children in Soma City, Fukushima: A retrospective observational study. *PLoS ONE*. 2017; 12(2): e0172305. doi:10.1371/journal.pone.0172305
25. Golikov VYu. 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 (In Russian).
26. The data about activity per unit area of Cs-137 and Cs-134 were extracted from: http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/017/shiryo/___icsFiles/afieldfile/2011/09/02/1310688_1.pdf (Accessed May 25, 2020).
27. IAEA (1989) Evaluating the reliability of predictions made using environmental transfer models. IAEA Safety Series 100. International Atomic Energy Agency, Vienna
28. Golikov V, Balonov M, Erkin V, Jacob P. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident. *Health Phys.* 1999;77(6): 654-661.
29. ICRP, 2006a. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection of the public and the optimization of radiological protection: Broadening the process. ICRP Publication 101. Ann. ICRP 36(3).
30. Oracle Crystal Ball. – Available on: <http://www.oracle.com/crystalball> (Accessed May 25, 2020).
31. 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: April 28, 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. Validation of model of external population exposure in Japan after the accident on the “Fukushima-1” NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 2. P. 31-40. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-2-31-40