

Сравнение различных подходов к ограничению облучения населения при радиоактивном загрязнении окружающей среды (на примере внешнего облучения на территориях, загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС)

В.Ю. Голиков

ФГУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург

Работа посвящена сравнению различных подходов к ограничению облучения населения на примере внешнего облучения жителей территорий, загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС. На основании ранее разработанной модели внешнего облучения населения от чернобыльских выпадений сравнивали следующие критерии, уже используемые в России или рекомендованные к использованию Международной комиссией по радиологической защите:

- средняя доза в критической группе населения;
 - средняя доза у 10% жителей населенных пунктов, имеющих наибольшие по сравнению с остальными жителями индивидуальные дозы облучения;
 - концепция репрезентативного индивидуума (the Representative Person).
- Значения отношения годовой эффективной дозы, рассчитанные согласно этим подходам, к средней дозе у всех жителей населенных пунктов находятся в диапазоне от 1,7 до 1,85.*

Ключевые слова: население, внешнее облучение, Чернобыльская АЭС, эффективная доза, критическая группа.

Введение

Дозы облучения населения при радиоактивном загрязнении окружающей среды изменяются в широких пределах. Как правило, прямое измерение индивидуальных доз у населения является трудной задачей, а их годовые значения вряд ли измеримы вообще. Поэтому для ограничения доз облучения населения используют концепции, связанные с оценкой доз облучения у наиболее облучаемой (критической) группы жителей [1, 2], или у репрезентативного индивидуума (the Representative Person) [3].

Успешное решение задачи по оценке средних доз у критической группы населения зависит, в первую очередь, от определения критической группы и критериев ее выделения из общего состава населения. Согласно НРБ-99 [2], в качестве критической группы выбирается однородная по одному или нескольким признакам – полу, возрасту, социальному или профессиональным условиям, месту проживания, рациону питания, режиму поведения – группа населения, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию от данного источника излучения.

По данным многолетнего изучения закономерностей внешнего облучения жителей в отдаленные сроки после аварии на ЧАЭС, к наиболее облучаемой группе можно отнести лиц, по роду занятий или особенностям поведения значительную часть времени проводящих вне помещений на необрабатываемых участках почвы (лес, луг, целина) и проживающих в домах с наименьшими защитными свойствами. К такой группе жителей могут принадлежать, например, лесники или пастухи, проживающие в деревянных домах. На основе ранее разработанных мо-

делей [4, 5, 6] можно оценить среднее значение годовой эффективной дозы внешнего облучения у представителей такой критической группы населения.

В 2005 году в России, применительно к условиям проживания населения на территориях, загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС, под средней дозой облучения критической группы жителей населенного пункта (НП) было предложено понимать среднюю дозу у 10% жителей данного НП, имеющих наибольшие по сравнению с остальными жителями индивидуальные дозы облучения [7].

Наконец, в 2008 году МКРЗ в своей новой Публикации 103 [3] для целей защиты населения в различных ситуациях облучения предложила заменить концепцию критической группы населения на концепцию репрезентативного индивидуума (the Representative Person). Репрезентативный индивидуум определяется таким образом, чтобы любой случайно выбранный из всей совокупности облучаемого населения человек с вероятностью менее 5% облучался бы в дозе большей, чем доза облучения у репрезентативного индивидуума. Иными словами, МКРЗ определила дозу облучения репрезентативного индивидуума как 95% квантиль в распределении индивидуальных доз у всей рассматриваемой выборки облучаемой популяции. Такой более ясный количественный подход к ограничению доз облучения населения, недавно предложенный МКРЗ, близок к российскому подходу, уже используемому на загрязненных территориях.

Целью настоящей статьи является сравнение значений эффективных доз внешнего облучения, рассчитанных в соответствии с различными подходами к ограничению

облучения населения, применительно к ситуации, сложившейся в настоящее время на территориях, загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС.

Модель внешнего облучения населения, проживающего на загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях

В рассматриваемый отдаленный период после Чернобыльской аварии доза внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений в 1986 г. практически полностью определяется гамма-излучением пары радионуклидов ^{137}Cs + $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Значение эффективной дозы внешнего излучения в это время определяют следующие основные факторы:

- мощность дозы гамма-излучения на открытой местности, зависящая от поверхностной активности выпавшего ^{137}Cs , эффективного периода очищения окружающей среды, наличия снежного покрова (сезонный эффект);
- антропогенные факторы, зависящие от типа НП (город, поселок городского типа, село), такие, как защитные свойства жилых и производственных помещений, наличие асфальтовых поверхностей, а также факторы, связанные с поведением и профессиональной деятельностью самого человека;
- коэффициенты перехода от мощности дозы в воздухе к значению эффективной дозы у человека.

Исходными данными для построения модели оценки индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения жителей явились следующие результаты натурных дозиметрических исследований, выполненных на загрязненных территориях:

1. Результаты изучения глубинного распределения активности цезия в пробах почвы, отобранных в течение 1987–2003 гг. в Брянской, Тульской и Орловской областях России [4, 5, 8], а также в США через 24 года после выпадений цезия в результате проведения ядерных испытаний на Невадском полигоне [9] и в Германии через 30 лет после окончания глобальных выпадений [10]. Анализ всей совокупности данных позволил установить зависимость мощности поглощенной дозы в воздухе от времени, прошедшего после радиоактивных выпадений, за счет миграции цезия в глубь почвы (рис. 1).

2. Результаты инструментальных измерений мощности дозы, обусловленной гамма-излучением радионуклидов цезия, в различных точках НП, результаты опроса жителей о режиме поведения и работы в разные сезоны года, а также результаты измерений индивидуальных доз у населения методом термолюминесцентной дозиметрии. Эти данные позволили установить численные значения антропогенных факторов уменьшения дозы внешнего гамма-излучения. Результаты измерений индивидуальных доз у населения методом термолюминесцентной дозиметрии явились незаменимым набором данных, с помощью которых была осуществлена верификация расчетных значений доз внешнего облучения различных групп населения [6, 8].

Учитывая вышеизложенное, уравнение для расчета мощности эффективной дозы внешнего облучения представителей i -той группы населения в зависимости от времени $E_i(t)$, можно записать в следующем виде [4, 6, 8]:

$$E_i(t) = D(t) \cdot K^S \cdot K_i^E \cdot \sum_j f_j \cdot p_{ij}, \text{ мкЗв/год}, \quad (1)$$

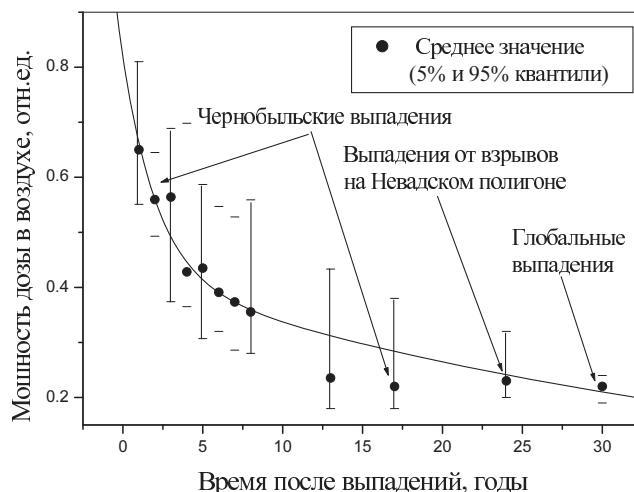


Рис. 1. Влияние заглупления в почве радионуклида ^{137}Cs на значение мощности дозы в воздухе на высоте 1 метр над поверхностью земли (значения мощности дозы нормированы на значение мощности дозы от источника, находящегося на границе раздела воздух-земля)

где: $D(t)$ — мощность поглощенной дозы в воздухе над открытым целинным участком почвы без учета сезонных колебаний за счет наличия снежного покрова зимой, мкГр/год;

K_i^E — коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к значению эффективной дозы у представителей i -той группы населения, (0,75 мкЗв/мкГр, для взрослого населения);

K^S — коэффициент влияния снежного покрова на величину среднегодовой эффективной дозы;

f_j — фактор места, отн. ед. (табл. 1);

p_{ij} — фактор поведения для i -той группы населения, отн. ед. (см. табл. 1);

t — время, прошедшее после выпадений, год.

Для расчета $D(t)$ используют выражение:

$$D(t) = A_0^{137} \cdot g_0^{137} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{137}}\right) \cdot r(t), \text{ мкГр/год} \quad (2)$$

где: A_0^{137} — средняя поверхностная активность ^{137}Cs на почве в НП на дату радиоактивных выпадений, кБк/м²;

$g_0^{137} = 22,3 \text{ (мкГр/год)/(кБк/м}^2\text{)}$ — мощность дозы в воздухе от плоского источника ^{137}Cs , расположенного на границе раздела воздух-земля;

T_{137} — период полураспада ^{137}Cs , год;

$r(t)$ — функция, учитывающая уменьшение мощности дозы гамма-излучения ^{137}Cs над целинной почвой из-за процессов естественной миграции (см. рис.1):

$$r(t) = p_1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_1}\right) + p_2 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_2}\right), \text{ отн. ед.} \quad (3)$$

где: $T_1=1,5$ года, $T_2=50$ лет, $p_1=0,4$ и $p_2=0,42$.

Таблица 1

Значения факторов места и факторов поведения для наиболее облучаемых групп сельского населения средней полосы России в отдаленный период после черныбыльских выпадений

Место в НП или в его ареале	Р _{фj} , отн.ед.			
	f _j , отн.ед.	Полеводы	Пастухи	Лесники
Жилая зона				
Дом (1-эт. деревянный)	0,13	0,45	0,45	0,54
Дом (1-эт. каменный)	0,07	0,45	0,45	0,54
Территории вне дома	0,55	0,14	0,18	0,21
Производственная зона				
Рабочие помещения	0,07	0,11	0,11	0,09
Рабочие дворы	0,30	0,08	0,06	0,00
Пахотные почвы	0,50	0,12	0,00	0,00
Целинные почвы	1,0	0,09	0,19	0,00
Лес	1,5	0,00	0,00	0,16
Зона отдыха				
Лес, луг	1,2	0,01	0,01	0,00

Результаты

Используя выше представленную модель формирования дозы внешнего облучения жителей, проживающих на территориях, загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС, оценим значения годовых эффективных доз согласно трем подходам к ограничению облучения населения, изложенным во введении. Для большей наглядности ниже результаты представлены в терминах отношений средней групповой или индивидуальной дозы внешнего облучения к средней дозе у всех жителей НП.

Зная структуру населения и структуру жилищного фонда в НП, можно, используя выражения (1)–(3), рассчитать как значение средней годовой эффективной дозы внешнего облучения у всего населения НП, так и у выбранной группы населения. На рисунке 2 представлено распределение нормированной средней дозы для различных групп населения сельского НП. Среднюю дозу рассчитывали для 28 групп населения, различающихся по профессионально-возрастным признакам (14 профессионально-возрастных групп, 2 типа жилых домов). Данные о структуре населения сельского НП, использовавшиеся в расчетах, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Структура населения сельского НП

Доярки	0,10	Полеводы	0,12
Скотники	0,09	Бухгалтеры, учителя,	
Пастухи	0,02	медицинские работники	0,05
Лесники	0,01	Агрономы, бригадиры,	
Механизаторы	0,09	администрация	0,03
Шоферы	0,05	Пенсионеры	0,26
Слесари, токари и т.п.	0,01	Школьники	0,09
Строители	0,01	Дошкольники	0,07

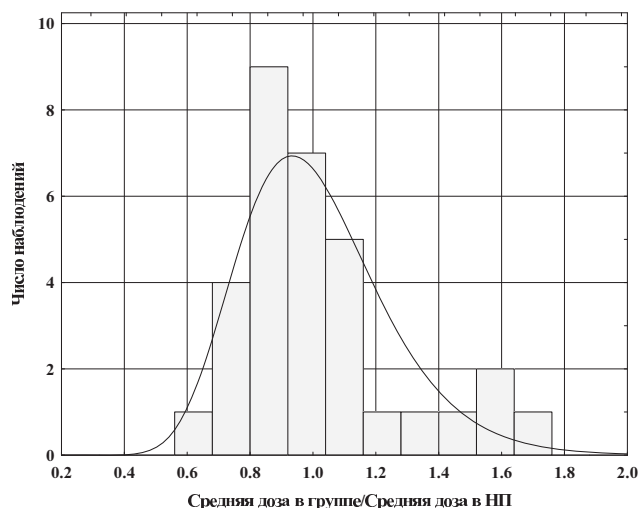


Рис. 2. Распределение средней групповой дозы в сельском НП (нормировано на среднюю дозу в НП)

Полученное распределение значения средней групповой дозы соответствует логарифмически нормальному распределению со средним геометрическим значением 0,98 и геометрическим стандартным отклонением 1,26. Согласно такому распределению, практически весь (99,9%) диапазон значений отношения "Средняя доза в группе/Средняя доза в НП" (K_D^{sp}) ограничен сверху значением 2,0. Иными словами, в настоящее время средняя доза внешнего облучения от черныбыльских выпадений для любой группы населения не превышает среднюю дозу у жителей сельского НП более чем в 2 раза. Наибольшие значения K_D^{sp} соответствуют таким профессиональным группам сельских жителей, как лесники и пастухи (1,7 и 1,6, соответственно). Однако эти группы жителей не всегда присутствуют в составе жителей НП и они малочисленны (как правило, не более 1–2% от общего количества жителей в НП). Для более многочисленной и практически всегда существующей в составе жителей сельского НП профессиональной группы полеводоов значение K_D^{sp} меньше и равно 1,3.

Если же определить критическую группу населения как часть населения, доза облучения которой больше чем 90% квантиль в распределении индивидуальной дозы у жителей НП, то в этом случае прежде всего надо определить закон распределения индивидуальной дозы внешнего облучения жителей НП. Одним из способов построения такого распределения может быть стохастическое моделирование с использованием законов распределения каждого из параметров, входящих в уравнения (1)–(3).

Для целей стохастического моделирования использовали следующие, установленные на основании результатов измерений, законы распределения каждого из параметров, входящих в уравнения (1)–(3) [8]:

- Логарифмически нормальное распределение для функции $r(t)$ со средним геометрическим, определяемым формулой (1.3) и независимым от времени геометрическим стандартным отклонением, равным 1,2.

- Логарифмически нормальные распределения для факторов места со средними геометрическими значениями, указанными в таблице 1, и следующими значениями

геометрических стандартных отклонений: территории внутри НП – 1,4; одноэтажные деревянные/каменные дома – 1,5; пахотные и целинные земли – 1,2;

- Нормальное распределение значений коэффициентов перехода от поглощенной дозы в воздухе к значению эффективной дозы у человека с относительным стандартным отклонением 0,05.

Значения факторов времени брали непосредственно из результатов опроса населения (около 800 значений) [4].

На рисунке 3 представлены результаты сравнения экспериментального (ТЛД – метод) и расчетного (стохастическое моделирование) распределений индивидуальной дозы, свидетельствующие о достоверности результатов, полученных расчетным методом.



Рис. 3. Сравнение экспериментального (ТЛД – метод) и расчетного (стохастическое моделирование) распределений индивидуальной дозы у жителей сельских НП

Ранее было показано [8], что закон распределения значения индивидуальной дозы внешнего облучения, нормированного на среднюю дозу в НП, одинаков для различных НП сельского типа. Таким образом, окончательно было принято, что это логарифмически нормальный закон со средним геометрическим значением, равным 0,9, и геометрическим стандартным отклонением, равным 1,5. При таких параметрах логарифмически нормального распределения практически весь диапазон значений (99,9%) отношения "Индивидуальная доза/Средняя доза в НП" (K_D^{ind}) ограничен сверху значением 3,2. При этом 90% квантиль в распределении K_D^{ind} равен значению 1,51, а среднее значение K_D^{ind} для группы жителей, K_D^{ind} которых превышают 90% квантиль в распределении индивидуальной дозы равно 1,85, что достаточно близко к значению 1,7, определенному выше, согласно "классической" концепции критической группы населения (в данном случае – лесников). Как правило, такие жители, уровень облучения которых в силу особенностей и привычек их поведения не меньше, а даже больше, чем у представителей "критических" профессиональных групп, всегда присутствуют в НП.

Наконец, если использовать недавно предложенную МКРЗ концепцию репрезентативного индивидуума, то для ограничения облучения населения необходимо использо-

вать 95% квантиль в распределении индивидуальной дозы. В рассматриваемой нами ситуации внешнего облучения ему соответствует значение K_D^{ind} , равное 1,75, что также незначительно отличается от значений K_D^{ind} , оцененных выше согласно двум другим подходам.

Заключение

Применительно к ситуации внешнего облучения населения, проживающего на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС в 1986 году, использование для ограничения облучения различных подходов и соответствующих им количественных критериев таких, как средняя доза в критической группе населения, средняя доза у 10% жителей НП, имеющих наибольшие по сравнению с остальными жителями, индивидуальные дозы облучения или новой концепции репрезентативного индивидуума не приводит к существенным различиям. Отношение значения годовой эффективной дозы, рассчитанное согласно любому из этих подходов, к средней дозе у всех жителей НП находится в узком диапазоне от 1,7 до 1,85.

Тем не менее использование более ясных в количественном отношении критериев, связанных с выделением определенных квантилей в распределении индивидуальных доз в облучаемой популяции, на наш взгляд, более предпочтительно по следующим соображениям:

1. Понятно, у какой части населения значение индивидуальной дозы может превысить выбранный критерий, что может послужить основанием для принятия дополнительных мер с целью оптимизации радиационной защиты населения.

2. Для других ситуаций или путей облучения населения может оказаться трудным или невозможным определить критическую группу населения по профессиональному или возрастному признаку. Такая ситуация сложилась, например, в отношении внутреннего облучения по пищевому пути у жителей "чернобыльских" территорий России.

3. При отсутствии убедительных доказательств о форме и параметрах закона распределения индивидуальных доз облучения населения, можно использовать, например, значения 95% квантилей в распределении параметров поведения населения в поле излучения (для оценки дозы внешнего облучения) или потребления загрязненных продуктов питания (для оценки дозы внутреннего облучения).

Список использованной литературы

1. Principles of Monitoring for the Radiation Protection of the Population [Текст]: ICRP Publication 43 // Annals of the ICRP. – 1985. – V. 15, No. 1.
2. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими ИИИ (СП 2.6.1.758-99) [Текст]: Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): утв. 02.07.99. – Взамен НРБ-96. – М.: Минздрав России, 1999. – 116 с.
3. Recommendation of the ICRP [Text]: ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. – 2008. – V. 37, No. 2-4.
4. Jacob, P. Pathway analysis and dose distributions Joint Study Project No.5 Final report [Текст] / edited by P. Jacob and I. Likhtarev // Luxembourg, EC EUR 16541 EN -1996.
5. Реконструкция средней накопленной в 1986-1995 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в

- 1986 г. [Текст]: МУ 2.6.1.579-96: утв. Зам. Главного государственного санитарного врача РФ 12.11.96. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996.
6. Golikov, V. Model validation for external doses due to environmental contamination by the Chernobyl accident [Текст] / V. Golikov, M. Balonov, V. Erkin, P. Jacob // Health Physics. – 1999. – V. 77, No. 6. – P. 654-661.
7. Оценка средних годовых эффективных доз облучения критических групп жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС [Текст]: МУ 2.6.1.2003-05: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 25.07.05.: ввод в действие с 01.10.05.
8. Golikov, V. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident [Текст] / V. Golikov, M. Balonov, P. Jacob // Radiat. Environ. Biophysics. – 2002. – V. 41, No. 10. – P. 185-193.
9. Miller, K. Cs-137 fallout depth distributions in forest versus field Sites: Implication for external dose rates [Текст] / K. Miller, I. Kuiper, I. Helfer // J. Environ. Radioactivity. – 1990. – V. 12. – P. 23-47.
10. Schimmack, W. Variability of water content and of depth profiles of global fallout ¹³⁷Cs in grassland soils and the resulting external gamma-dose rates [Текст] / W. Schimmack, H. Steindl, K. Bunzl // Radiat. Environ. Biophysics. – 1998. – V. 37. – P. 27-33.

V.Yu. Golikov

**Comparison of different approaches
to population exposure limitation at radioactive contamination
of the environment (at the example of external exposure
on territories contaminated after the Chernobyl accident)**

Federal Scientific Organization «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev»
of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Saint-Petersburg

Abstract. The article is dedicated to comparison of different approaches to population exposure limitation at the example of external exposure of population living on territories contaminated after the accident at Chernobyl NPP. On the basis of the earlier developed model of population external exposure from Chernobyl fallout, the following criteria already being used in Russia or recommended by International Commission on Radiological Protection were compared:

- *Average dose in critical group of population;*
- *Average dose of 10% of the settlement population having highest individual doses compared to others;*
- *The Representative Person concept*

The value of the relation of annual effective dose calculated according to these approaches to the average dose for all the population of the settlement is between 1.7 and 1.85.

Key words: *population, external exposure, Chernobyl NPP, effective dose, critical group.*

Поступила 13.08.08.