

Анализ применимости существующих моделей расчета риска при облучении радоном для оценки эффективности радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях

Д.В. Кононенко

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

В статье представлены результаты расчета пожизненного атрибутивного популяционного риска при облучении радоном до и после осуществления радонозащитных мероприятий в детском образовательном учреждении. Снижение уровня ЭРОА радона в 2,1 раза (с 231 до 109,6 Бк/м³) в долгосрочной перспективе может привести к уменьшению количества радон-индуцированных случаев смерти от рака легкого на популяционном уровне на 2,2–2,4% для всего населения (в зависимости от используемого стандарта возрастного распределения), на 2,7% – для мужчин, на 1,2% – для женщин. Эти результаты получены по модели «FCZ». Модели «ЕРА-2003» и «Wismit-2006» оказались недостаточно чувствительными для использования в подобных задачах.

Ключевые слова: радон и короткоживущие дочерние продукты распада, радон-индуцированный рак легкого, оценка риска, модель, пожизненный атрибутивный риск, стандарт возрастного распределения населения.

Введение

В публикации представлены результаты анализа практического применения трех современных моделей оценки риска при облучении радоном и его короткоживущими дочерними продуктами распада (ДПР) в сложном сценарии облучения, в комплексе с российскими медико-демографическими данными (МДД), а также влияния используемого стандарта возрастного распределения населения на результат оценки риска на популяционном уровне. По сути, это очередной интеракционный шаг на пути к выработке методики оценки риска здоровью населения при облучении радоном и его ДПР, являющейся, в соответствии с трехуровневой структурой методик оценки риска [1, 2], частной методикой, центральными элементами которой являются математическая модель зависимости «экспозиция – ответ» и описание необходимых для расчетов МДД. Этот процесс представляется невозможным без апробации существующих в мире современных моделей. Результаты первой подобной работы по апробации модели, разработанной Агентством по охране окружающей среды США, которая показала реальную возможность использования данного математического аппарата с российскими МДД, были представлены в публикации [3].

В данной работе в качестве тестовой была использована задача по оценке эффективности радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях. Методы расчета риска позволяют дополнить обычную в таких случаях оценку снижения прямого показателя радиационной безопасности (эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона) долгосрочным прогнозом последствий, заключающихся в уменьшении количества радон-индуцированных случаев смерти от рака легкого на популяционном уровне. Материалом для расчетов послужили результаты радонозащитных меро-

приятий, осуществленных специалистами ФБУН «Научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», в том числе автором работы, в школе-интернате № 289 Красносельского района Санкт-Петербурга в 2002–2006 гг.

Материалы и методы

К концу XX в. на основе результатов объединенных эпидемиологических исследований когорт шахтеров урановых и некоторых других рудников был разработан ряд моделей оценки риска возникновения радон-индуцированного рака легкого, которые, в соответствии с рекомендациями Публикации 65 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [4, 5], имели мультипликативную форму. Однако в течение последних 20 лет продолжались дискуссии о применимости этих моделей для оценки риска при облучении радоном в жилых и общественных зданиях. В начале 2000-х гг. были опубликованы результаты нескольких объединенных эпидемиологических исследований связи облучения людей радоном в жилищах с раком легкого методом «случай – контроль», начатых еще в конце 1980-х гг. [6–10], а также нескольких объединенных эпидемиологических исследований среди шахтеров с относительно низкими уровнями суммарной экспозиции [11–13]. Эти результаты были тщательно проанализированы специально созданной в 2005 г. Рабочей группой МКРЗ, и в ноябре 2009 г. Комиссия одобрила «Заявление по радону», а в 2010 г. была выпущена Публикация 115 [14, 15], в которой подтверждается, что дополнительный абсолютный риск возникновения рака легкого, обусловленный радоном и его ДПР, рассчитанный для облучения в жилищах, сопоставим с оценками, полученными для шахтеров при низких уровнях экспозиции. Кроме того, в Публикации подтверждается, что доказательства повышенного риска для населения, облучаю-

щегося при ЭРОА радона даже менее 100 Бк/м³, являются убедительными и неоспоримыми.

В Публикации 115 МКРЗ отдается предпочтение моделям оценки риска возникновения радон-индуцированного рака легкого, разработанным по результатам объединенных анализов (а не отдельных исследований). К таким моделям относятся следующие:

- модель, предложенная Национальной академией наук США (United States National Academy of Sciences, NAS) в докладе «BEIR VI» (1999 г.) [16] – является одной из наиболее признанных в мире [17–20] и основой для ряда более совершенных моделей;

- модель «EPA-2003» [17], разработанная в 2003 г. Агентством по охране окружающей среды США на основе модели «BEIR VI»;

- модель «Wismut-2006» [18], разработанная в 2006 г. в Германии также на основе модели «BEIR VI»;

- франко-чешская объединенная модель «FCZ» [12, 21], разработанная в 2003 г. международным коллективом по контракту с Еврокомиссией [11].

В соответствии с мультипликативным характером зависимости, смертность от радон-индуцированного рака легкого связана с фоновой возраст-специфической смертностью от рака данной локализации с помощью коэффициента избыточного относительного риска (ERR – excess relative risk). Модель «BEIR VI» трактует избыточный относительный риск как линейную функцию от экспозиции радоном и его ДПР, является мультипликативной и беспороговой. В этой модели ERR зависит от уровня ЭРОА радона в воздухе, при котором формировалась полученная экспозиция; времени, прошедшего с момента облучения; достигнутого возраста, для которого производится оценка риска. Общий вид модели представлен выражением:

$$ERR(t) = \beta \cdot (\theta_{5-14} \cdot \omega_{5-14} + \theta_{15-24} \cdot \omega_{15-24} + \theta_{25+} \cdot \omega_{25+}) \cdot \phi_{age} \cdot \gamma_z, \quad (1)$$

где β – основной параметр зависимости «экспозиция – ответ», WLM⁻¹;

ω_{5-14} , ω_{15-24} , ω_{25+} – кумулятивная экспозиция радоном и его ДПР, полученная в интервалах времени от 5 до 14 лет, от 15 до 24 лет и от 25 лет и более до возраста t , для которого производится оценка риска, WLM;

θ_{5-14} , θ_{15-24} , θ_{25+} – коэффициенты, представляющие относительный вклад в риск возникновения рака легкого экспозиций, полученных в указанные интервалы времени до возраста t , отн.ед.;

ϕ_{age} – коэффициент пропорциональности, учитывающий уменьшение канцерогенной восприимчивости ткани легких с увеличением достигнутого возраста, отн. ед. (см. также [22]);

γ_z – параметр, зависящий либо от длительности облучения (в годах), либо от уровня ЭРОА радона, выраженного в единицах WL, при котором формировалась полученная экспозиция, отн.ед.

В модели также заложено наличие пятилетнего латентного периода в развитии рака легкого, поэтому экспозиция, полученная за последние 5 лет до возраста t , в выражении (1) не учитывается.

В отчете «BEIR VI» [16] было предложено два варианта модели, описываемой выражением (1), отличающихся параметром γ_z . Модель EAC (Exposure-Age-Concentration) предполагает, что риск на единицу экспозиции увеличивается с уменьшением мощности экспозиции до опре-

деленного уровня. Модель EAD (Exposure-Age-Duration) предполагает, что риск на единицу экспозиции увеличивается с увеличением времени экспозиции до определенного уровня. Очевидно, что эти два варианта тесно связаны между собой, поскольку для фиксированной кумулятивной экспозиции увеличение времени экспозиции означает уменьшение ее мощности. Поэтому в отчете «BEIR VI» предпочтение не было отдано ни одному из этих двух вариантов.

В данной работе для оценки риска при облучении радоном и его ДПР использовались модели «EPA-2003», «Wismut-2006» и «FCZ». В качестве показателя риска рассчитывался пожизненный атрибутивный популяционный риск (LAR_{pop}). Данный показатель представляет собой долю радон-индуцированных случаев смерти от рака легкого (от общего их числа в популяции). Согласно методологии, описанной в [23], расчет LAR_{pop} производится в два этапа: сначала рассчитывается индивидуальный пожизненный атрибутивный риск, представляющий собой вероятность преждевременной смерти от рака легкого, вызванного облучением, а затем уже пожизненный атрибутивный популяционный риск.

1. В 2003 г. Агентство по охране окружающей среды США выпустило второе по счету практическое руководство по оценке рисков за счет облучения населения радоном и его ДПР в жилищах [17]. На основе выше описанной двухвариантной модели «BEIR VI» Агентством была разработана модель «EPA-2003», которая дает результат, являющийся средним между результатами расчета по моделям EAC и EAD. При этом в качестве исходного варианта для модификации была выбрана модель EAC, поскольку в процессе расчетов по ней не возникает неясностей, связанных с тем, что уровень ЭРОА радона в жилищах может, вообще говоря, изменяться с течением времени.

Математически модель «EPA-2003» представлена вышеуказанным выражением (1). При расчетах значения коэффициентов модели β , θ , ϕ_{age} и γ_z были взяты из руководства [17].

2. Модель «Wismut-2006» была разработана на основе результатов исследования когорты немецких шахтеров, работавших на урановом руднике компании «Wismut» с 1946 по 1998 г. [18]. Важным достоинством проведенного исследования является численность когорты (59 001 человек, средняя продолжительность диспансерного наблюдения – 30,5 лет, в сумме 1 801 630 человеко-лет), которая сопоставима с численностью когорт в ряде объединенных исследований (например, общая численность 11 когорт в отчете «BEIR VI» составила 60 705 человек, в сумме 892 547 человеко-лет). Авторами также сделан вывод о том, что модель EAC является все же более предпочтительной, чем EAD.

Математически модель «Wismut-2006» представлена тем же выше указанным выражением (1). При расчетах значения коэффициентов модели β , θ , ϕ_{age} и γ_z были взяты из публикации [18].

3. Модель «FCZ», структура которой описана в публикациях [12, 21], была разработана на основе исследования когорты шахтеров французских и чешских урановых рудников (общая численность составила 10 100 человек, в сумме 248 782 человеко-лет) с низкими уровнями суммарной экспозиции.

Общий вид модели представлен выражением:

$$ERR(t) = \beta \cdot W \cdot \exp[\alpha \cdot (AE(t) - 30) + \theta \cdot (TE(t) - 20)], \quad (2)$$

где β – основной параметр зависимости «экспозиция – ответ», WLM^{-1} ;

W – кумулятивная экспозиция радоном и его ДПР, накопленная до возраста $t-5$, WLM ;

$AE(t)$ – возраст на момент медианной экспозиции, лет;

$TE(t)$ – время, прошедшее с возраста на момент медианной экспозиции, лет;

α, θ – коэффициенты пропорциональности, отн.ед.

При расчетах значения коэффициентов модели β, α и θ были взяты из публикации [21]. В модели учитывается пятилетний латентный период в развитии рака легкого, поэтому экспозиция, полученная за последние 5 лет до возраста t , в выражении (2) не учитывается.

Стоит отметить, что модель «FCZ» в вычислительном плане является наиболее сложной и громоздкой из трех рассмотренных в данной работе.

Пожизненный атрибутивный популяционный риск (LAR_{prop}) рассчитывался до возраста 100 лет, а для расчета кумулятивной экспозиции радоном и его ДПР был использован сценарий облучения, включавший в себя посещение ребенком в течение 5 лет детского сада № 52 Красносельского района Санкт-Петербурга (расположенного рядом со школой-интернатом), в котором также были выявлены уровни ЭРОА радона, превышающие установленный норматив, а также посещение школы-интерната № 289 в течение 11 лет (в варианте до и после проведения радонозащитных мероприятий). Для определения максимально возможного годового времени пребывания ребенка в помещениях детского сада использовались рекомендации СанПиН 2.4.1.3049-13 [24], а значения максимальной допустимой недельной образовательной нагрузки в различных классах школы были взяты из СанПиН 2.4.2.2821-10 [25] (в интернате дети не проживают). Остальное время человек по сценарию находился в помещениях при среднем значении ЭРОА радона в жилых и общественных зданиях, расположенных на территории Санкт-Петербурга (доля времени, проводимая человеком в помещениях, принята равной 0,8 в соответствии с [26]).

1. В данной работе были использованы исходные данные об уровнях ЭРОА радона в воздухе жилых и общественных зданий на территории Санкт-Петербурга, полученные по результатам измерений за 2002–2013 гг., которые содержатся в Федеральном банке данных по до-

зам облучения населения РФ за счет природного и техногенно измененного радиационного фона. Согласно общепринятым в мировом научном сообществе взглядам [13, 27], распределение значений ЭРОА радона подчиняется логнормальному закону. Поэтому в качестве среднего значения для расчета мощности экспозиции радоном и его ДПР использовалось медианное значение (табл. 1).

Для расчета ERR было сделано два допущения:

(А) отсутствие миграции на протяжении всей жизни;

(Б) постоянство уровня ЭРОА радона в жилище на протяжении всей жизни.

Причина, по которой необходимо было принять эти допущения, проста: полную и корректную реконструкцию условий облучения на протяжении столь длительного срока практически невозможно провести даже в условиях строгого эпидемиологического исследования. В ряде опубликованных работ с результатами исследований связи облучения людей радоном в жилищах с раком легкого методом «случай – контроль» [6–10] относительный риск оценивался на основе данных об уровнях облучения радоном и его ДПР только за 25–30-летний период, предшествовавший выявлению рака легкого; условия облучения в более ранний период восстановить не удалось. Т.е. суть принятых допущений (А) и (Б) состоит в том, что рассматривается ситуация равномерного пожизненного облучения за исключением 16 лет обучения в детских образовательных учреждениях.

Исходными данными для оценки ЭРОА радона в помещениях школы-интерната № 289 в период до и после осуществления радонозащитных мероприятий послужили результаты более 1000 измерений, проведенных с 2003 по 2012 г. мгновенными, квазиинтегральными и интегральными методами во все месяцы года, что обеспечивает корректную оценку среднегодового значения данного показателя, имеющего значительную сезонную вариабельность. В помещениях детского сада № 52 в период с 2008 по 2012 г. было проведено более 100 измерений мгновенными, квазиинтегральными и интегральными методами как в теплый, так и в холодный периоды года.

2. В официальных статистических данных по возрасту распределение вероятности дожития до определенного возраста отсутствует, однако его несложно построить на основе другого демографического показателя – возрастных коэффициентов смертности, которые были получены из Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) [28] (рис. 1).

Таблица 1

Характеристики массива данных и параметры логнормального распределения значений ЭРОА радона

Место измерения	N	Min	Max	Med	σ_g
Жилые и общественные здания в Санкт-Петербурге	53603	5	2045	23,0	1,5
Школа-интернат № 289 (до проведения радонозащитных мероприятий)	501	10	1816	231,0	2,4
Школа-интернат № 289 (после проведения радонозащитных мероприятий)	504	5	1859	109,6	3,1
Детский сад № 52	108	15	447	43,5	2,5

N – количество измерений; Min – минимум, Bq/m^3 ; Max – максимум, Bq/m^3 ; Med – медиана, Bq/m^3 ; σ_g – геометрическое стандартное отклонение.

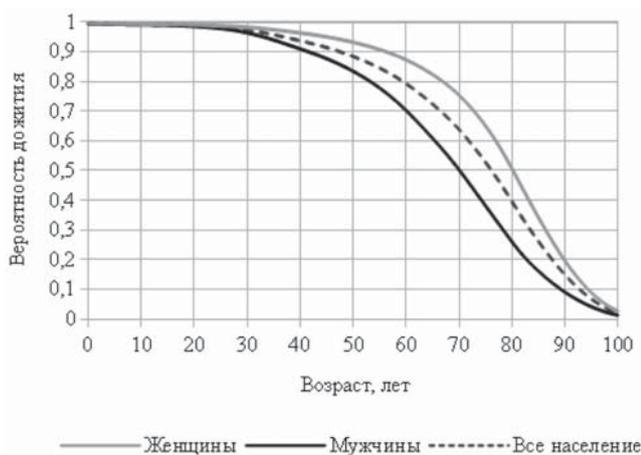


Рис. 1. График зависимости вероятности дожития человека от рождения до определенного возраста (кривая Гомпертца – Мейкхама), построенный по данным ЕМИСС за 2012 г. для населения Санкт-Петербурга

3. Сведения об абсолютном числе смертей от рака легкого, вызванного всеми причинами, и половозрастное распределение данного показателя для России в целом содержатся в справочнике «Злокачественные новообразования в России в 2012 г. (заболеваемость и смертность)» [29]. В нем, однако, отсутствует половозрастное распределение грубых показателей смертности от рака легкого, вызванного всеми причинами, для конкретных субъектов РФ, что является недостатком современной структуры отечественных МДД. Поэтому необходимо принять следующее допущение:

(В) *Половозрастное распределение показателей смертности от рака легкого, вызванного всеми причинами, для населения Санкт-Петербурга совпадает с общероссийским.*

Данное распределение было получено с использованием половозрастного распределения числа смертей от рака данной локализации и соответствующего распределения общей численности населения по методике [30].

Самая старшая возрастная группа в данных о заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований определена как «85+». Однако для расчета LAR_{pop} необходимо четко определить верхнюю границу возрастного интервала. Поскольку в демографических данных присутствуют возрастные группы «85–89», «90–94», «95–99» и «100+», граница была принята равной 100 годам. Для возрастных групп «85–89», «90–94», «95–100» значение показателя смертности было принято постоянным и равным таковому для группы «85+».

4. Данные о численности населения Санкт-Петербурга на 01.01.2013 г., представленные в виде половозрастного распределения (для расчетов по моделям «EPA-2003» и «Wismut-2006» – по возрастным группам; для модели «FCZ» – по отдельным годам), были получены из ЕМИСС [28]. Численность возрастной группы «95–100» рассчитывалась как простая сумма численностей возрастных групп «95–99» и «100+».

5. В данной работе, наряду с грубыми показателями смертности в расчетах LAR_{pop} были использованы стан-

дартизованные показатели: с использованием мирового стандарта возрастного распределения численности населения ВОЗ 2000–2025 (WHO World Standard Population – WSP) [31] и нового европейского стандарта ESP-2013 (European Standard Population – ESP) [32] (рис. 2). Стоит отметить, что фактически стандарт WSP предназначен и подходит для развивающихся стран. Стандарт ESP-2013, введенный взамен устаревшего так называемого «скандинавского» стандарта 1967 г., рассматривается как наиболее подходящий для развитых стран Евросоюза. Однако оба эти стандарта предназначены для всего населения, без разделения по половому признаку, что может приводить к необоснованному завышению значения показателя смертности для мужчин и занижению его для женщин, тем самым искусственно увеличивая и без того большую разницу в смертности мужчин и женщин в России [33].

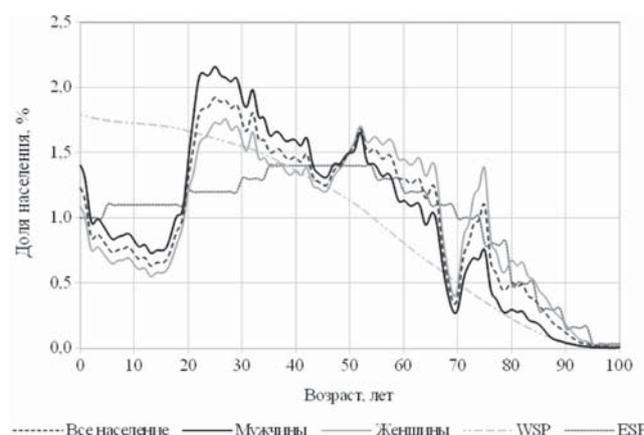


Рис. 2. Реальное возрастное распределение населения Санкт-Петербурга (по данным на 01.01.2013) в сравнении со стандартами WSP и ESP-2013

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов пожизненного атрибутивного популяционного риска LAR_{pop} с использованием трех выбранных моделей на основе всех описанных выше исходных данных и по разработанному сценарию облучения приведены в таблице 2. Дополнительно (для сравнения) приведены результаты расчетов по сценарию равномерного пожизненного облучения при ЭПОА радона, равной 23 Бк/м^3

Таблица 2

LAR_{pop} , %	Модель		
	EPA-2003	Wismut-2006	FCZ
До проведения радонозащитных мероприятий			
Все население	8,5	4,7	16,2
Мужчины	11,6	6,1	20,6
Женщины	3,9	2,3	8,5
Стандарт WSP	5,0	2,7	9,6
Стандарт ESP-2013	9,7	5,5	18,3

Окончание таблицы 2

LAR _{pop} , %	Модель		
	EPA-2003	Wismut-2006	FCZ
После проведения радонозащитных мероприятий			
Все население	8,5	4,7	14,0
Мужчины	11,6	6,1	17,9
Женщины	3,9	2,3	7,3
Стандарт WSP	4,9	2,7	8,3
Стандарт ESP-2013	9,7	5,5	15,9
Ситуация равномерного пожизненного облучения			
Все население	8,5	4,7	12,1
Мужчины	11,6	6,1	15,4
Женщины	3,9	2,3	6,2
Стандарт WSP	4,9	2,7	7,2
Стандарт ESP-2013	9,7	5,5	13,7

На рисунках 3–5 представлены графики зависимости избыточного относительного риска (ERR) от достигнутого возраста, полученные с использованием трех выбранных моделей по трем сценариям облучения. Общий характер полученных кривых вполне согласуется с приведенными в публикации [21].

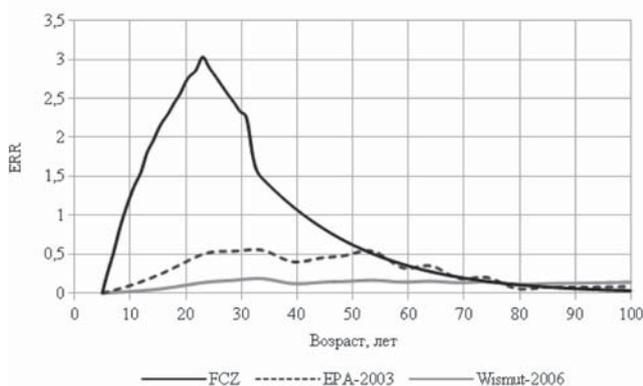


Рис. 3. Графики зависимости ERR(t): ситуация до проведения радонозащитных мероприятий

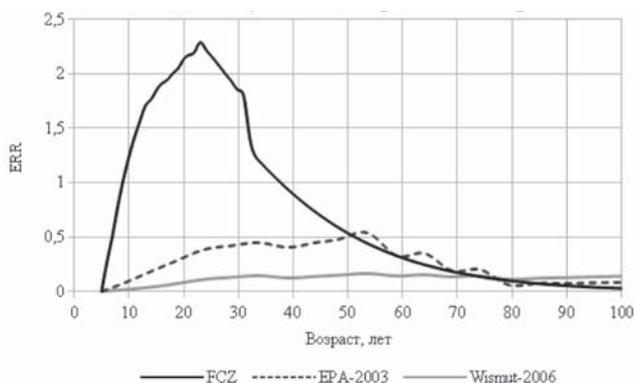


Рис. 4. Графики зависимости ERR(t): ситуация после проведения радонозащитных мероприятий

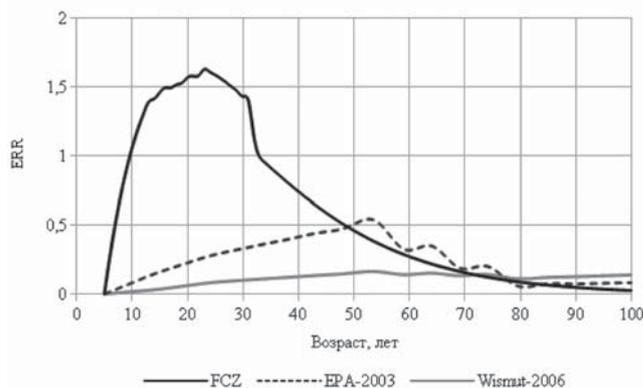


Рис. 5. Графики зависимости ERR(t): ситуация равномерного пожизненного облучения

В качестве важного итога проведенных расчетов следует рассмотреть парадоксальный, на первый взгляд, результат оценки LAR_{pop} в разных сценариях облучения с использованием моделей «EPA-2003» и «Wismut-2006»: как видно из таблицы 2, разница в экспозиции радоном и его ДПР, получаемой за 16 лет обучения в детских образовательных учреждениях, фактически не оказывает никакого влияния на конечный результат. В качестве дополнительного сравнения были рассмотрены варианты облучения при ЭРОА радона, равной 1000 и 2000 Бк/м³, при этом LAR_{pop} для всего населения увеличился до 8,6 и 8,7% соответственно. Причина такого поведения этих двух моделей, имеющих идентичную структуру и различающихся только коэффициентами, кроется в следующем: во-первых, больший вес имеют экспозиции, полученные в менее отдаленные от возраста на момент оценки сроки; во-вторых, низкие показатели общей смертности от рака легкого и высокие вероятности дожития на ранних возрастах еще более снижают вклад экспозиций, полученных в молодости, в пожизненную оценку риска. По всей видимости, обе эти модели, являющиеся производными от «BEIR VI» и разработанные на основе результатов эпидемиологических исследований шахтеров, работавших продолжительное время при относительно высоких уровнях ЭРОА радона, не подходят для сложных сценариев облучения с относительно низкими уровнями экспозиции радоном и его ДПР, полученными в отдаленный период времени и на ранних этапах жизни. В пользу этого говорит также тот факт, что модели использовались только с одним значением коэффициента γ_2 , соответствующим минимальному уровню ЭРОА радона (диапазон до 0,5 WL).

Модель «FCZ», также разработанная на основе результатов эпидемиологических исследований шахтеров, но работавших при невысоких уровнях ЭРОА радона, и имеющая кардинально иную математическую структуру и характер зависимости от возраста на момент экспозиции и времени, прошедшего с момента экспозиции, оказалась гораздо более чувствительной к изменению в пределах одного порядка (23–231 Бк/м³) значения ЭРОА радона, при котором формировалась экспозиция в отдаленный период времени. Расчеты с использованием этой модели дают самое высокое значение показателя риска, что согласуется с результатами, приведенными в публикации [20].

Анализ использования различных вариантов возрастного распределения численности населения показывает, что при использовании стандарта WSP показатель риска занижается в 1,7–2 раза (в зависимости от используемой модели) по сравнению с реальным распределением или стандартом ESP-2013. Это связано с тем, что в стандарте WSP преобладают доли младших возрастных групп (вариант, подходящий для развивающихся стран), что уменьшает вклад экспозиций, полученных в поздние периоды жизни, имеющих больший вес в пожизненном показателе риска.

Заключение

Достигнутое в результате проведения радонозащитных мероприятий снижение ЭРОА радона в 2,1 раза (с 231 до 109,6 Бк/м³) в долгосрочной перспективе может привести к уменьшению количества радон-индуцированных случаев смерти от рака легкого на популяционном уровне на 2,2–2,4% для всего населения (в зависимости от используемого распределения), на 2,7% для мужчин. Для женщин этот эффект не столь заметен (снижение на 1,2%), но это объясняется значительной разницей в показателях смертности от рака легкого, вызванного всеми причинами, для мужчин и женщин. Согласно статистическим данным [29], в структуре смертности от злокачественных новообразований мужского населения России опухоли трахеи, бронхов, легкого занимают первое место (26,8% всех случаев), тогда как женского населения – только четвертое (6,6%). Дальнейшее снижение ЭРОА радона в воздухе помещений детских образовательных учреждений до среднегогородского уровня в 23 Бк/м³, т.е. еще почти в 5 раз, приведет к незначительному снижению LAR_{pop} (до 2,5% для мужчин и 1,1% для женщин) и представляется нецелесообразным.

Эти результаты получены по модели «FCZ». Модели «EPA-2003» и «Wismut-2006» оказались недостаточно чувствительными для использования в подобных задачах. Мировой стандарт распределения численности населения ВОЗ 2000-2025 (WSP) гораздо хуже описывает текущую демографическую ситуацию в России (что наглядно подтверждается рисунком 3), чем новый европейский стандарт ESP-2013.

За рамками данной работы остался вопрос оценки риска за счет производственного облучения сотрудников школы-интерната № 289 радонотомом и его ДПР. Эта задача требует разработки отдельного сценария облучения и будет рассмотрена в ходе дальнейших апробаций различных современных моделей оценки риска здоровью населения при облучении радонотомом и его ДПР.

Литература

1. Демин, В.Ф. Общая методика оценки риска воздействия на здоровье человека разных источников опасности / В.Ф. Демин, С.И. Иванов, С.М. Новиков // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2009 – Т. 54, № 1. – С. 5–15.
2. Демин, В.Ф. Риск воздействия ионизирующего излучения и других вредных факторов на здоровье человека: методы оценки и практическое применение / В.Ф. Демин, И.Е. Захарченко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2012 – Т. 52, № 1. – С. 77–89.
3. Кононенко, Д.В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радонотомом / Д.В. Кононенко // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 31–37.
4. ICRP, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2). Pergamon Press, Oxford, 1993.
5. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 68 с.
6. Darby, S. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies / S. Darby [et al.] // Br. Med. J. 330. – 2005. – P. 223–227.
7. Darby, S. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe / S. Darby [et al.] // Scand. J. Work Environ. Health 32 (Suppl 1). – 2006. – P. 1–84.
8. Krewski, D. Residential radon and risk of lung cancer. A combined analysis of 7 North American case-control studies / D. Krewski [et al.] // Epidemiology 16. – 2005. – P. 137–145.
9. Krewski, D. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer / D. Krewski [et al.] // J. Toxicol. Environ. Health Part A 69 (7). – 2006. – P. 533–597.
10. Lubin, J.H. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies / J.H. Lubin [et al.] // Int. J. Cancer 109. – 2004. – P. 132–137.
11. Tirmarche, M. Quantification of Lung Cancer Risk After Low Radon Exposure and Low Exposure Rate: Synthesis from Epidemiological and Experimental Data. Final Scientific Report, February 2000 – July 2003. Contract FIGH-CT1999-0013. European Commission DG XI, Brussels, 2003.
12. Tomášek, L. Lung cancer in French and Czech Uranium Miners: Radon-Associated Risk at Low Exposure Rates and Modifying Effects of Time since Exposure and Age at Exposure / L. Tomášek [et al.] // Radiat. Res. 169. – 2008 – P. 125–137.
13. UNSCEAR, 2009. UNSCEAR 2006 Report, Annex E “Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces”. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York, 2009.
14. ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40 (1).
15. Риск возникновения рака легкого при облучении радонотомом и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина // Перевод публикации 115 МКРЗ. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2013. – 92 с.
16. NAS (National Academy of Sciences). Health Effects of Exposure to Radon (BEIR VI). National Academy Press, Washington, D.C., 1999.
17. U.S. Environmental Protection Agency. EPA assessment of risks from radon in homes. EPA 402-R-03-003. Washington, D.C., 2003.
18. Grosche, B. Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946-1998 / B. Grosche [et al.] // Br. J. Cancer 95. – 2006 – P. 1280–1287.
19. Walsh, L. The Influence of Radon Exposures on Lung Cancer Mortality in German Uranium Miners, 1946-2003 / L. Walsh [et al.] // Radiat. Res. 173. – 2010. – P. 79–90.
20. Catelinois, O. Lung Cancer Attributable to Indoor Radon Exposure in France: Impact of the Risk Models and Uncertainty Analysis. / O. Catelinois [et al.] // Environmental Health Perspectives. – 2006 – V. 115, 9. – P. 1361–1366.
21. Tomášek, L. Dose conversion of radon exposure according to new epidemiological findings / L. Tomášek [et al.] // Radiat. Prot. Dosim. 130. – 2008 – P. 98–100.
22. Кононенко, Д.В. Особенности оценки радиационного риска при облучении радонотомом в детском и подростковом возрасте / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Сб. тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения П.В. Рамзаева. – СПб, 2014. – С. 122–125.

23. Kellerer, A.M. On the conversion of solid cancer excess relative risk into lifetime attributable risk / Radiat. Environ. Biophys. 40. – 2001. – P. 249–457.
24. Санитарно-эпидемиологические требования к устройству, содержанию и организации режима работы дошкольных образовательных организаций (СанПиН 2.4.1.3049-13) : утв. 15.05.2013 г., введены в действие 30.07.2013 г.
25. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях (СанПиН 2.4.2.2821-10) : утв. 29.12.2010 г., введены в действие 01.09.2011 г.
26. Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона. Методические рекомендации. МР 2.6.1.0088-14. Утверждены 18.03.2014 г. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014. – 39 с.
27. UNSCEAR, 2000, Annex B «Exposures from natural radiation sources». United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York, 2000.
28. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [электронный ресурс]. – <http://www.fedstat.ru>. Введена в эксплуатацию совместным приказом Минкомсвязи России и Росстата от 16 ноября 2011 года № 318/461.
29. Злокачественные новообразования в России в 2012 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России», 2014. – 240 с.
30. Петрова, Г.В. Характеристика и методы расчета статистических показателей, применяемых в онкологии / Г.В. Петрова [и др.] – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2005. – 39 с.
31. Ahmad, O.B. Age Standardization of Rates: A New WHO Standard. GPE Discussion Paper Series: No.31 / O.B. Ahmad [et al.]. – WHO, 2011.
32. Revision of the European Standard Population – Report of Eurostat's task force. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. – 121 p.
33. Демин, В.Ф. Разработка национальных и международных стандартов возрастного распределения населения для медицинской статистики, медико-демографического анализа и оценки риска / В.Ф. Демин, М.А. Пальцев, Е.А. Чабан // Гигиена и санитария. – 2013. – № 6. – С. 14–21.

Д.В. Кононенко
E-mail: radon-and-life@yandex.ru

Поступила: 10.11.2014 г.

Analysis of the applicability of some risk assessment models associated with exposure to radon for evaluation of effectiveness of radon mitigation actions in schools

D.V. Kononenko

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

The paper presents the results of risk assessment from exposure to radon before and after radon mitigation actions in school. Twofold reduction of radon EEC (from 231 to 109.6 Bq/m³) in the long term can lead to decrease of lifetime attributable risk by 2.2–2.4% for the entire population (depending on the standard population used), 2.7% for men, 1.2% for women. These results were obtained using «FCZ» model. Models «EPA-2003» and «Wismut-2006» were not sensitive enough for use in such tasks.

Key words: *radon and progeny, radon-induced lung cancer, risk assessment, model, lifetime attributable risk, standard population.*

Introduction

The paper presents the results of the analysis of practical application of three modern lung cancer risk assessment models associated with exposure to radon and progeny (further – radon) in complex exposure scenarios, in combination with Russian medical and demographic data, and the impact of different standard populations on the results of risk assessment at the population level. In fact, it is the next iteration step towards the development of method of lung cancer risk assessment associated with exposure to radon that could be officially used in Russia. According to the three-level structure of risk assessment methods [1,2], it is a particular method. The exposure-response relation

and the description of necessary medical and demographic data are the central elements of the method. The choice of an exposure-response relation doesn't seem possible without practical tests of some existing modern models. The results of the first test application of the model developed by the United States Environmental Protection Agency (EPA) in 2003 were published earlier [3].

In this original work the evaluation of effectiveness of radon mitigation actions in schools was used as a test task. In such cases it is usual to evaluate the reduction of directly measured value (radon equivalent equilibrium concentration (EEC)), which is the radiation safety indicator. Methods of risk assessment allow to produce a long-term forecast of the