DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-4-63-73

Оценка радиационного риска и ущерба для здоровья населения от радона в воздухе помещений на примере города Владимира

Ширкин Л.А., Семченко М.И., Трифонова Т.А.

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), Владимир

Представленный материал относится к оценке воздействия малых доз радонового облучения на здоровье населения. На основе многолетних замеров на территории города Владимира набрана масштабная статистика распределения значений эквивалентной равновесной объемной активности радона, которая определяет полученные количественные показатели абсолютного и относительного риска. Показано, что радон в домах увеличивает риск заболевания раком лёгкого. На территории Владимира риск возрастает статистически значимо даже при умеренных содержаниях радона в жилых помещениях. Оценка относительного риска для субгруппы популяции со средним и высоким уровнем облучения даёт значение 11,85. Полученные оценки риска и ущерба обусловлены исключительно преждевременной смертностью от радон-индуцированного рака лёгкого. Суммарный среднегодовой популяционный ущерб или потери жизненного потенциала для всего населения Владимира в результате радон-индуцированного рака лёгкого оцениваются величинами: в соответствии с центральной тенденцией – 321,4 чел.-лет/год; в соответствии с верхней оценкой – 608 чел.-лет/год. Особенностью полученных данных является то, что наибольшие неопределённости в оценках рисков и ущербов возникают именно в области низких уровней радонового облучения.

Ключевые слова: радон, радиационный риск, малые эффективные дозы, индуцированный радоном рак лёгкого, ущерб для здоровья населения, экономический ущерб, объёмная активность, статистика распределения, региональные оценки, здоровье населения.

Введение

Наиболее значимым из природных источников облучения является радон [1] – радиоактивный газ, который выделяется из пород и почв и, как правило, концентрируется в воздухе помещений [2]. Радон – доминирующий источник облучения населения, его вклад в суммарную дозу оценивается величинами, превышающими 50% [3]. Радон считается причиной рака лёгких в 3-14% случаев и является второй по значимости (после курения) причиной рака лёгких [2, 4]. Тем не менее, проблему радиологического воздействия радона на человека нельзя считать исследованной [5].

Существуют проблемы, связанные с определением особенностей формирования доз облучения и радиационного риска от изотопов радона и их дочерних продуктов в условиях населённых пунктов [6]. Воздействие радона на здоровье человека носит стохастический характер, а вероятность заболеваний зависит от экспозиции [3, 4].

В связи с этим цель настоящего исследования – характеристика радиационной опасности среды помещений от радонового облучения на основе оценки радиационного риска и ущерба для здоровья населения г. Владимира.

Объекты и методы исследования

Оценка риска здоровью при анализе качества среды помещений подразумевает выполнение, как правило, следующих этапов: идентификация опасности; оценка зависимости «доза–

Ширкин Л.А. – доцент, к.х.н.; Семченко М.И.* – аспирант; Трифонова Т.А. – зав. каф., д.б.н., профессор. ВлГУ.

*Контакты: 600000, Владимир, ул. Горького, 87. Тел.: 89206232316; e-mail: maks77757@yandex.ru.

ответ»; оценка экспозиции; характеристика риска [7]. Заключительным этапом анализа является характеристика потенциальной опасности среды помещений в зданиях г. Владимира от радонового облучения, который по своему содержанию смыкается с этапом сравнительной характеристики рисков, реализуемым на стадии управления риском [7, 8].

На этапе «идентификация опасности» на основе данных замеров объёмной активности радона, проведённых в соответствии с методическими указаниями [9] за период 7 лет в зданиях, отобранных методом простого случайного отбора, получены характеристики для статистического закона распределения значений эквивалентной равновесной объёмной активности (ЭРОА). Полученные данные позволили оценить вероятность регистрации значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений и на территории Владимира [10]. Объёмную активность радона измеряли радиометром радона (марки РРА-01М-01 «Альфарад»), измерительным комплексом для мониторинга радона «Камера-01», радиометром радона РРА-01М-03, пробоотборным устройством ПОУ-04. Проанализированы результаты около 200 замеров по данным обследований помещений, расположенных в панельных, кирпичных и одноэтажных деревянных зданиях, на территории 3 административных районов г. Владимира, без пригородов. Также были включены данные более 300 замеров, проводимых в ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии во Владимирской области», полученных в 2009-2015 гг. в различных точках г. Владимира на первых, подвальных и полуподвальных этажах зданий различного назначения.

На этапе «оценка зависимости доза–ответ» переход от ЭРОА к эффективной дозе осуществлялся в соответствии с коэффициентом, равным 9 нЗв на Бк·ч·м⁻³ эквивалентной равновесной объёмной активности радона [3, 11]. Полученная таким образом статистика распределения доз облучения позволила оценить вероятность регистрации высоких (≥ 10 мЗв/год), средних (5-10 мЗв/год) и низких уровней облучения (≤ 5 мЗв/год) на территории Владимира [4, 12-14]. Уровни облучения населения изотопами радона определяют радиационную обстановку в жилых, общественных и других зданиях, в которых люди проводят большую часть времени, по оценке Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) – около 80% [11].

На этапе «оценка экспозиции» выделены и оценены численности для трёх субгрупп населения: 1) субпопуляция со средним и высоким уровнем облучения; 2) субпопуляция с низким уровнем облучения; 3) субпопуляция с минимальным (фоновым) уровнем радонового облучения. Для данных трёх групп проводилась оценка годовой экспозиции по скрытой энергии α -излучения, при этом использовалась величина удельной потенциальной энергии α -излучения дочерних продуктов радона на 1 Бк·м⁻³ радона в равновесии, равная $3,47 \cdot 10^4$ МэВ·м⁻³ или $5,56 \cdot 10^{-9}$ Дж·м⁻³ [3, 4].

На этапе «характеристика риска» реализована последовательность расчётов, включающая оценку: 1) дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска радиационно-индуцированного рака лёгкого, скорректированного на ущерб; 2) дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска радиационно-индуцированного смертельного рака лёгкого, взвешенного по летальности; 3) дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска возникновения радиационно-индуцированного рака лёгкого; 4) относительного риска радиационно-индуцированного рака лёгкого; 5) дополнительного популяционного среднегодового риска возникновения радиационно-индуцированного рака лёгкого.

Радиационный риск – вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения. Вычисления радиационных рисков произво-

дятся не для реальной популяции г. Владимира, а для номинальной популяции, т.е. для условной популяции мужчин и женщин с типовым возрастным распределением. Данный подход позволяет пересчитывать риски и для иных популяций с учётом особенностей их половозрастного состава.

Риск, взвешенный по ущербу ($\Delta ICRU$) – это вероятность возникновения радиационно-индуцированного стохастического эффекта с учётом модификаций данного параметра, позволяющих проводить оценки для отдельных компонентов ущерба при оценке тяжести последствия облучения [15, 16]. Расчёт осуществляется через экспозицию по скрытой энергии α -излучения по ф. 1:

$$\Delta ICRU = k_p \cdot P, \quad (1)$$

где k_p – значение номинального коэффициента риска, нормированного на единицу экспозиции 0,14 на Дж·ч·м⁻³ [3]; P – величина пожизненной экспозиции населения по скрытой энергии α -излучения, Дж·ч·м⁻³. Средняя продолжительность жизни населения во Владимире составляет 70 лет.

Так как риск, взвешенный по ущербу от конкретного радиационно-индуцированного онкологического заболевания, определяется так же, как произведение риска, взвешенного по летальности ($\Delta ICRL$), на коэффициент относительной потери времени жизни без рака, то обратный расчёт проводится по ф. 2:

$$\Delta ICRL = \frac{\Delta ICRU}{k_u}, \quad (2)$$

где $k_u=0,8$ – значение номинального коэффициента относительной потери времени жизни без рака [15, 16].

Риск возникновения злокачественных новообразований, индуцированных воздействием ионизирующих излучений (ΔICR) – это оценка риска, выстраиваемая с использованием математических моделей, основанных на данных эпидемиологических исследований, в т.ч. и для риска возникновения радиационно-индуцированного рака лёгкого. Так как риск, взвешенный по летальности ($\Delta ICRL$), рассматривается как сумма вероятности возникновения радиационно-индуцированного смертельного рака данной нозологии и вероятности с учётом вреда от несмертельных раков, зависящей от летальности данной нозологической формы, то обратный расчёт риска возникновения радиационно-индуцированного рака лёгкого проводится по ф. 3:

$$\Delta ICR = \frac{\Delta ICRL}{q + (1 - q) \cdot ((1 - q_{min}) \cdot q + q_{min})}, \quad (3)$$

где $q=0,89$ – доля летальности рака лёгкого; $q_{min}=0,1$ – минимальный вес для несмертельных раков [15, 16].

Относительный риск есть отношение показателя заболеваемости или показателя смертности от рассматриваемого заболевания (рак лёгкого) в облучённой популяции к таковому в необлучённой популяции [4]. Расчёт относительного риска (RR) осуществляется по данным о риске возникновения радон-индуцированного рака лёгкого для субпопуляции со средним и высоким уровнем облучения и субпопуляции с низким уровнем облучения.

Форма характеристики риска может быть разной – от описательной до полуколичественной и даже количественной, но чаще всего используется комбинация этих подходов. На данном этапе характеристика риска выполняется в строго количественной форме с обязательной оценкой неопределённостей. Характеристика риска является связующим звеном между оценкой риска для здоровья и его управлением.

Заключительный этап анализа представляет собой характеристику опасности среды помещений в зданиях г. Владимира от радонового облучения, произведённую на основе критериев: 1) среднего количества лет сокращения продолжительности жизни из-за преждевременной смерти или болезни; 2) количества потерянных человеко-лет здоровой жизни в популяции; 3) среднегодового экономического ущерба, обусловленного преждевременной смертностью от радиационно-индуцированного смертельного рака лёгкого.

Ущерб является концепцией Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Ущерб отражает суммарный вред здоровью, причинённый членам облучённой группы и их потомкам в результате воздействия на группу источника радиации. Ущерб – это многомерное понятие. Его главными составляющими являются стохастические величины: вероятность атрибутивного смертельного рака, взвешенная вероятность атрибутивного несмертельного рака, взвешенная вероятность тяжёлых наследственных эффектов и количество потерянных лет жизни в случае причинения вреда [3].

Среднее количество лет сокращения продолжительности жизни из-за преждевременной смерти или болезни в популяции (ΔICD) оценивается по ф. 4:

$$\Delta ICD = \Delta ICRU \cdot U, \quad (4)$$

где $U=15$ – среднее число потерянных лет жизни, характерное для всех онкологических заболеваний (стохастических эффектов) в целом [15, 16].

Суммарные экономические потери от дополнительной смертности в результате индуцированного радоном рака лёгкого для жителей Владимира оценивались через показатели годового валового регионального продукта на душу населения.

Результаты

На этапе «идентификация опасности» на основе данных замеров уточнён закон распределения значений ЭРОА в воздухе помещений в зданиях на территории г. Владимир. Экспериментальные данные удовлетворительно аппроксимируются функцией, относящейся к классу экспоненциальных распределений:

$$p(A) = \frac{0,364}{A} \exp \left(- \left| \frac{\ln(A) - 2,873}{1,523} \right|^{3,653} \right), \quad (5)$$

где $p(A)$ – плотность распределения вероятности; A – значения ЭРОА.

В данном случае получена кривая, где показатель степени $\alpha=3,653 > 2$ отличается от нормального распределения (рис. 1).

Рис. 1. Кривая плотности распределения вероятности $p(A)$ в воздухе помещений в зданиях на территории города Владимира.

Статистика распределения значений ЭРОА определяет количественные показатели, полученные на четырёх этапах оценки риска для здоровья, которые обобщены и приведены с оценкой неопределённостей, соответствующих границам 95% доверительного интервала (ДИ) (табл. 1).

Таблица 1

Результаты оценки радиационного риска

№	Параметр	Субпопуляция		
		со средним и высоким уровнем облучения	с низким уровнем облучения	с минимальным (фоновым) уровнем облучения
1	Численность, чел.	4545 ± 388	55653 ± 3911	275802 ± 5119
2	Оценка среднегодового значения ЭРОА дочерних продуктов изотопов радона в воздухе помещений, Бк/м³	94,6 ДИ 95%: 74 – 109	20,5 ДИ 95%: 6,5 – 74	6,5*
3	Индивидуальная эффективная доза за счёт материнских и короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона в воздухе, мЗв/год	6,4 ДИ 95%: 5,0 – 8,0	1,5 ДИ 95%: 0,2 – 5,0	0,5
4	Среднегодовая экспозиция по скрытой энергии, Дж·ч·м⁻³/год	$4,0 \cdot 10^{-3}$ ДИ 95%: $2,9 \cdot 10^{-3}$ – $4,3 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$ ДИ 95%: $3,2 \cdot 10^{-4}$ – $2,9 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
5	Оценка пожизненной экспозиции по скрытой энергии, Дж·ч·м⁻³	0,264 ДИ 95%: 0,210 – 0,300	0,061 ДИ 95%: 0,022 – 0,210	0,022
6	Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск радиационно-индуцированного рака лёгкого, скорректированный на ущерб	$3,7 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $2,9 \cdot 10^{-2}$ – $4,2 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$ ДИ 95%: $3,1 \cdot 10^{-3}$ – $2,9 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
7	Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск радиационно-индуцированного смертельного рака лёгкого, взвешенный по летальности	$4,6 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $3,6 \cdot 10^{-2}$ – $5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$ ДИ 95%: $3,9 \cdot 10^{-3}$ – $3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
8	Дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск возникновения радиационно-индуцированного рака лёгкого	$4,7 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $3,6 \cdot 10^{-2}$ – $5,4 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$ ДИ 95%: $3,9 \cdot 10^{-3}$ – $3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
9	Относительный риск рака лёгкого	11,85 ДИ 95%: 10,26 – 13,68	2,72 ДИ 95%: 2,47 – 3,01	–
10	Дополнительный популяционный среднегодовой радиационный риск возникновения рака лёгкого, год⁻¹	3,0 ДИ 95%: 2,2 – 3,8	8,5 ДИ 95%: 2,9 – 31,0	15,5

* в соответствии с данными о среднемировых значениях ЭРОА изотопов радона в приземном слое атмосферного воздуха [11].

На территории города насчитывается около 2,8 тыс. зданий. При этом численность популяции проживающих и работающих на первых этажах зданий оценивается величиной 74,3 тыс. человек. Критерии, характеризующие опасность среды помещений в зданиях г. Владимира от радонового облучения, связаны с натуральным и экономическим ущербами, обусловленными преждевременной смертностью от радиационно-индуцированного смертельного рака лёгкого (табл. 2).

Таблица 2

**Характеристика радиационной опасности среды помещений в зданиях
города Владимира от радонового облучения**

№	Параметр	Субпопуляция		
		со средним и высоким уровнем облучения	с низким уровнем облучения	с минимальным (фоновым) уровнем облучения
1	Среднее количество лет сокращения продолжительности жизни, лет	0,55 ДИ 95%: 0,43 – 0,64	0,13 ДИ 95%: 0,05 – 0,43	0,05
2	Количество потерянных человеко-лет здоровой жизни в популяции, чел.-лет/год	36 ДИ 95%: 26 – 45	101 ДИ 95%: 35 – 368	184
3	Среднегодовой экономический ущерб, обусловленный преждевременной смертностью от радиационно-индуцированного смертельного рака лёгкого, млн руб./год: – центральная тенденция – верхняя оценка	8,4 10,4	23,5 85,6	42,8 45,4

Обсуждение

Распределение значений ЭРОА изотопов радона имеет вид асимметричной кривой с крутым подъёмом и очень пологим спадом, который определяет вероятность регистрации умеренных и высоких значений ЭРОА в воздухе помещений г. Владимира (рис. 1). Данные о статистике распределения ЭРОА указывают на то, что максимальное значение ЭРОА изотопов радона, типичное для территории Владимира, может быть оценено величиной 109 Бк/м³. Характерной особенностью имеющихся эпидемиологических данных является то, что во всех подвыборках с объёмной активностью радона $C_{Rn} > 50$ Бк/м³ отношение шансов статистически достоверно больше единицы [3]. Вероятность регистрации значений объёмной активности, превышающих 50 Бк/м³ (или ЭРОА > 25 Бк/м³), составляет 37,4%.

Полученные значения для показателей дополнительного пожизненного абсолютного номинального риска не позволяют дать однозначное заключение о приемлемости (или неприемлемости) риска радиационно-индуцированного рака лёгкого, так как для этого необходимы дополнительные исследования для обоснования уровней приемлемого риска. Тем не менее, показатели абсолютного риска важны для процедур управления риском: сравнительной характеристики риска, контроля воздействия и мониторинга риска. Для целей оперативного управления риском от радонового облучения интерес представляют рассчитанные значения относительного риска. Так как дополнительный пожизненный абсолютный номинальный риск возникновения радиационно-индуцированного рака лёгкого в необлучённой популяции составляет 0,39%, то оценки относительного риска возникновения радон-индуцированного рака лёгкого для субгруппы популяции со средним и высоким уровнем облучения, а также для субгруппы с низким уровнем облучения дают значения, с учётом доверительных 95% интервалов, существенно превышающие 1. Таким образом, полученные данные оценки относительного риска могут считаться статистически значимыми.

Суммарный популяционный номинальный среднегодовой радиационный риск возникновения радиационно-индуцированного рака лёгкого для г. Владимира составляет: в соответствии с центральной тенденцией – 27,1 случаев рака лёгкого в год; в соответствии с верхней оценкой – 50,3 случаев рака лёгкого в год. Отсюда нормализованный показатель заболеваемости раком лёгкого на 100000 человек населения Владимира составляет: в соответствии с центральной тенденцией – 8,1; в соответствии с верхней оценкой – 16,0.

В 2014 г. в структуре онкологической заболеваемости населения третье место заняли злокачественные новообразования трахеи, бронхов, лёгкого (10,6%), а среди мужского населения – первое место (19%) [17]. Среднегодовое число регистрируемых случаев заболеваний злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов, лёгкого (С33, С34) на территории Владимира оценивается величиной 129 ± 21 [18]. Расчёты показывают, что вклад радонового облучения в заболеваемость злокачественными новообразованиями трахеи, бронхов и лёгкого (С33, С34) может составлять 38%.

Суммарный среднегодовой популяционный ущерб или потери жизненного потенциала для всего населения Владимира в результате радиационно-индуцированного рака лёгкого оцениваются величинами: в соответствии с центральной тенденцией – 321,4 чел.-лет/год; в соответствии с верхней оценкой – 608 чел.-лет/год. Отсюда суммарные экономические потери от дополнительной смертности в результате индуцированного радоном рака лёгкого, рассчитанные через внутренний региональный продукт, составляют (по ценам 2014 г.): в соответствии с верхней оценкой – 74,8 млн руб./год; в соответствии с верхней оценкой – 141,4 млн руб./год. Полученные оценки натурального и экономического ущербов обусловлены исключительно преждевременной смертностью от радон-индуцированного смертельного рака лёгкого на территории Владимира. Другие природные источники облучения не учитывались. При этом для расчёта риска было сделано два допущения: 1) радон-индуцированный риск рака лёгкого – результат изолированного воздействия радонового облучения, т.е. без учёта сочетанного воздействия радона и курения; 2) отсутствие миграции на протяжении всей жизни. Важной особенностью полученных данных является то, что наибольшие неопределённости в оценках рисков и ущербов возникают именно в области низких уровней радонового облучения.

При планировании выборочного наблюдения с заранее заданным значением допустимой ошибки выборки необходимо правильно оценить требуемый объём выборки. Этот объём может быть определён на основе допустимой ошибки при выборочном наблюдении, исходя из заданной вероятности, гарантирующей допустимую величину уровня ошибки (с учётом способа организации наблюдения).

При уровне надёжности 95%, доли со средним и высоким уровнем облучения – 6,2%, общим количеством зданий на территории Владимира 2,8 тыс. и предельной ошибкой выборки 5% получается, что минимально необходимое для обследования количество зданий, отобранных методом простого случайного отбора, должно составлять 86 зданий или 3,2% от общего числа зданий на территории Владимира. В настоящем исследовании общий объём выборки составил около 180 обследованных зданий.

Заключение

1. Вариабельность объёмной активности радона обуславливает высокую степень неоднородности распределения уровней облучения, что делает оправданным применение методов математической статистики для идентификации закона распределения вероятностей для зна-

чений ЭРОА и эффективной дозы. Вариабельность является также причиной неопределённости в оценках рисков, наиболее существенных именно в области низких концентраций радона ($\text{ЭРОА} < 74 \text{ Бк/м}^3$).

2. Радон в домах увеличивает риск заболевания раком лёгкого для всего населения. На территории Владимира риск возрастает статистически значимо даже при умеренных содержаниях радона в жилых помещениях ($\text{ЭРОА} = 74 - 149 \text{ Бк/м}^3$).

3. Большинство случаев заболевания раком лёгкого, обусловленных радоном, вызваны скорее низкими и средними концентрациями радона, чем высокими ($\text{ЭРОА} > 149 \text{ Бк/м}^3$). Вследствие этого целью должно быть как снижение индивидуального риска наиболее облучаемых лиц до разумно достижимого уровня, так и общего риска для всего населения. В то же время полное устранение облучения радоном невозможно.

4. Снижение риска для наиболее облучаемых лиц ($\geq 5 \text{ мЗв/год}$) до разумно достижимого уровня позволит снизить ущерб на 11%. По-видимому, для 350-тысячного населения Владимира уровень популяционного среднегодового ущерба в 184 чел.-лет/год следует рассматривать как целевой при планировании мероприятий по снижению радиационного риска радонового облучения.

При оценке и обосновании приоритетных мер по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия, экологической безопасности и охраны здоровья необходимо привлечение показателей натурального ущерба для здоровья и связанного с ними экономического ущерба [19]. Только показатели ущерба позволяют адекватно провести ранжирование различных по медико-биологическим последствиям и степени тяжести нозологий и, соответственно, проблем городов. Без подобных оценок невозможно обосновать приоритетность и эффективность мероприятий, направленных на снижение риска для здоровья и заболеваемости населения.

Литература

1. **Abdelzaher M.** Seasonal variation of radon level and radon effective doses in the Catacomb of Kom El-Shuqafa, Alexandria, Egypt //Pramana. 2011. V. 77, N 4. P. 749-757. doi: 10.1007/s12043-011-0150-z.
2. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. World Health Organization, 2009. P. 108.
3. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115 //Ann. ICRP. 2010. V. 40, N 1.
4. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126 //Ann. ICRP. 2014. V. 43, N 3.
5. **Петин В.Г., Пронкевич М.Д.** Анализ действия малых доз ионизирующего излучения на онкозаболеваемость человека //Радиация и риск. 2012. Т. 21, № 1. С. 39-57.
6. **Трифенова Т.А., Ширкин Л.А.** Оценка радиационной опасности от радонового облучения в помещениях городских зданий //Безопасность жизнедеятельности. 2004. № 5. С. 43-48.
7. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.
8. **Трифенова Т.А., Ширкин Л.А.** Оценка и сравнительный анализ рисков для здоровья населения (на примере г. Владимира). Владимир: ООО ВОИ ПУ «Рост», 2010. 80 с.
9. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: Методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 26 с.
10. **Семченко М.И., Трифенова Т.А., Ширкин Л.А.** Оценка объёмной активности радона в воздухе помещений на примере города Владимира //Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 4-5. С. 972-976.
11. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счёт природных источников ионизирующего излучения: Методические указания. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. 22 с.
12. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счёт источников ионизирующего излучения. Санитарные правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 40 с.
13. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 83 с.
14. **Семченко М.И., Трифенова Т.А., Ширкин Л.А.** Прогнозные оценки индивидуальной годовой эффективной дозы от радонового облучения на примере города Владимира //Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17, № 4-5. С. 977-980.
15. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 2-4.
16. **Репин Л.В.** Об использовании коэффициентов ущерба для количественной оценки последствий воздействия ионизирующего излучения //Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 1. С. 35-37.
17. Департамент здравоохранения Администрации Владимирской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://dz.avо.ru/home/3-2010-02-09-10-53-45/1130-4-.html> (дата обращения 08.10.2016).
18. Злокачественные новообразования в России в 2014 году (заболеваемость и смертность) /Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2016. 250 с.
19. Методические рекомендации к экономической оценке и обоснованию решений в области управления риском для здоровья населения при воздействии факторов среды обитания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 40 с.

Health risks and detriment of exposure to indoor radon among residents of Vladimir city

Shirkin L.A., Semchenko M.I., Trifonova T.A.

Vladimir State University, Vladimir

To estimate the health effects of radon exposure on the population long-term measurements of radon equivalent equilibrium volumetric activity were made in Vladimir city dwellings. The obtained data were used for estimating absolute and relative risks of radiation-induced lung cancer. In the city of Vladimir the increase in risk of lung cancer due to exposure to radon is statistically significant, even if the level of radon was medium. The value of relative risk of untimely death from lung cancer in a subgroup exposed to medium or high level of radon is 11.85. The total annual average population-based health detriment or reduction of lifetime opportunity among the residents of Vladimir city as a result of exposure to radon is 321.4 person-years; the upper level is 608 person-years. The highest uncertainties in risks and health detriment assessment are associated with exposure to low levels of radon.

Key words: *radon, radiation risk, low effective doses, lung cancer induced by radon, public health detriment, economic damage, volumetric activity, distribution statistics, regional assessments, health of the population.*

References

1. **Abdelzaher M.** Seasonal variation of radon level and radon effective doses in the Catacomb of Kom El-Shuqafa, Alexandria, Egypt. *Pramana*, 2011, vol. 77, no. 4, pp. 749-757. doi: 10.1007/s12043-011-0150-z.
2. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. World Health Organization, 2009, 108 p.
3. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115. *Ann. ICRP*, 2010, vol. 40, no. 1.
4. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. *Ann. ICRP*, 2014, vol. 43, no. 3.
5. **Petin V.G., Pronkevich M.D.** Analysis of effects of low dose radiation on cancer incidence. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 39-57. (In Russian).
6. **Trifonova T.A., Shirkin L.A.** Assessment of radiation hazards from radon exposure in urban buildings. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti – Life Safety*, 2004, no. 5, pp. 43-48. (In Russian).
7. Human health risk assessment from environmental chemicals. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2004. 143 p. (In Russian).
8. **Trifonova T.A., Shirkin L.A.** Assessment and comparative analysis of risks to public health (Vladimir city). Vladimir, 2010. 80 p. (In Russian).
9. Radiation monitoring and epidemiological assessment of residential, public and industrial buildings and facilities after completion of construction, major repairs, rehabilitation of radiation safety indicators. Instructional guidelines. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2011. 26 p. (In Russian).
10. **Semchenko M.I., Trifonova T.A., Shirkin L.A.** Estimation of the volume activity of radon in indoor air by the example of Vladimir. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN – Bulletin of Samara Scientific Center of the RAS*, 2015, vol. 17, no. 4-5, pp. 972-976. (In Russian).
11. Evaluation of individual effective radiation doses from natural sources of ionizing radiation. Instructional guidelines. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology, 2002. 22 p. (In Russian).
12. Hygienic requirements for limiting exposure of the population to sources of ionizing radiation. Sanitary regulations and standards. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2011. 40 p. (In Russian).

13. Basic health regulations for radiation safety (OSPORB-99/2010). Sanitary regulations and standards. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2010. 83 p. (In Russian).
14. **Semchenko M.I., Trifonova T.A., Shirkin L.A.** Estimation of the volume activity of radon in indoor air by the example of Vladimir. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN – Bulletin of Samara Scientific Center of the RAS*, 2015, vol. 17, no. 4-5, pp. 977-980. (In Russian).
15. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 2-4.
16. **Repin L.V.** On the use of detriment parameters for the quantitative evaluation of radiation exposure consequences. *Radiatsionnaya gigiena – Radiation Hygiene*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 35-37. (In Russian).
17. Department of Health, Administration of Vladimir Region. Available at: <http://dz.avo.ru/home/3-2010-02-09-10-53-45/1130-4-.html>. (Accessed 08.10.2016). (In Russian).
18. *Malignant neoplasms in Russia in 2014* (morbidity and mortality). Eds.: A.D. Kaprin, V.V. Starinskiy, G.V. Petrova. Moscow, P. Herzen Moscow Oncology Research Institute, 2016. 250 p. (In Russian).
19. Methodical recommendations for the economic assessment and rationalization of decisions in the area of health risk management in the effects of environmental factors. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2011. 40 p. (In Russian).