

**ОЦЕНКА ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА
В ВОЗДУХЕ ПОМЕЩЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ВЛАДИМИРА**

© 2015 М.И. Семченко, Т.А. Трифонова, Л.А. Ширкин

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Статья поступила в редакцию 23.11.2015

Были проведены инструментальные замеры в различных помещениях зданий города Владимира и получены новые данные о статистических параметрах распределения объёмной активности радона в воздухе помещений на территории города Владимира.

Ключевые слова: радон, эквивалентная равновесная объёмная активность, внутреннее облучение, опасность среды помещений от радонового облучения, радоноопасность территории.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее важным из природных источников облучения является радон [1]. Радон является радиоактивным газом, выделяется из горных пород и почв, как правило, концентрируется в воздухе помещений [2]. Концентрация Rn-222, из-за его полураспада намного больше, чем у его изотопов – 3,8 дней по сравнению с 55,8 сек. и 3,96 сек. для Tn и An соответственно [3].

Геолого-геофизические характеристики и параметры эксхалации радона для территорий большинства городов изучены недостаточно, также недостаточно данных о статистических параметрах распределения значений ЭРОА в воздухе помещений на урбанизированных территориях. В результате остаются не исследованными пространственно-временные закономерности распределения радона для регионов, оказывается недооценённым масштаб радиационной опасности радона на отдельно взятой территории. Например, эта проблема актуальна для территории города Владимира.

В связи с этим целью настоящего исследования оценка статистических параметров распределения ЭРОА радона в воздухе помещений на примере территории г. Владимир.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований явился воздух в помещениях, расположенные на первых, полуподвальных и подвальных этажах зданий, радон в которых накапливается в результате эксхалации с

Семченко Максим Игоревич, аспирант.

E-mail: maks77757@yandex.ru

Трифопова Татьяна Анатольевна, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой экологии.

Ширкин Леонид Алексеевич, кандидат химических наук, доцент.

поверхности грунта. Обследованию подвергались эксплуатируемые жилые и общественные здания различного типа на территории г. Владимира.

Предметом исследования являются статистические параметры распределения равновесной объёмной активности изотопов радона в различных частях города Владимира. Владимир – город в России, административный центр Владимирской области. Расположен преимущественно на левом берегу реки Клязьмы, в 176 км к востоку от Москвы. На территории города грунты сформированы на серых лесных и дерново-подзолистых почвах. Площадь города 124,59 км², численность населения на 2014 год составила 350 тыс. человек. На территории города насчитывается около 2,8 тыс. зданий. При этом численность экспонируемой популяции, т.е. популяции проживающих и работающих на первых этажах зданий оценивается нами величиной 76,89 тыс. чел.

Замеры объёмной активности радона в воздухе помещений проводились в жилых и общественных зданиях г. Владимира в разное время года на протяжении 3-х лет. Проанализированы результаты около 200 замеров по данным обследований 60 помещений, расположенных в панельных, кирпичных и одноэтажных деревянных зданиях, на территории 3 административных районов г. Владимир, без пригородов.

Объёмную активность радона измеряли радиометром радона (марки РРА-01М-01 «Альфа-рад»). Радиометр РРА-01М-01 предназначен для экспрессных измерений объёмной активности Rn²²² в воздухе помещений. Предел допускаемой основной относительной погрешности в поддиапазоне от 20 до 100 Бк·м⁻³ ± 30 %, в поддиапазоне от 100 до 2.0·10⁴ Бк·м⁻³ ± 20 %. Он применяется для комплексного радиационно-гигиенического обследования территорий и используется для работы в полевых условиях. При проведении измерений были установлены и закрыты все окна

и двери, закончены внутренние отделочные работы, производство которых обычно связано с периодическим открыванием окон и дверей [4].

Радиоактивное равновесие между радоном и его ДПР отсутствует из-за постоянного удаления ДПР из воздуха. Поэтому радиационную опасность реальной неравномерной смеси радона и его ДПР характеризуют некоторой равновесной смесью. Скрытая энергия радона такой равновесной смеси эквивалентна скрытой энергии ДПР радона данной неравновесной смеси. Это выражается как отношение полной энергии альфа-частицы, радона и его ДПР [5]. Поэтому ЭРОА_{Rn} (A_{Rn}) всегда меньше объёмной активности радона q_{Rn} и связана с ней формулой

$$A_{Rn} = F \cdot q_{Rn},$$

где F – коэффициент равновесия между радоном и его ДПР, принимается равным 0.5.

Величина среднегодовой эквивалентной равновесной объёмной активности дочерних продуктов радона-222 (радон) и радона-220 (торона) в воздухе помещений определяется следующим образом:

$$A = A_{Rn} + 4,6 \cdot A_{Tn},$$

где A – эквивалентная равновесная объёмная активность (ЭРОА) изотопов радона, Бк/м³; A_{Rn} и A_{Tn} – средние значения эквивалентной равновесной объёмной активности радона-222 и торона соответственно, Бк/кг³.

ЭРОА торона принимается нами равной 3.5% от ЭРОА радона-222. Что позволяет перейти от объёмной активности радона-222 к эквивалентной равновесной объёмной активности (ЭРОА) изотопов радона через поправочный коэффициент, который равен 1.16:

$$A = 1.16 \cdot q_{Rn},$$

где q_{Rn} – объёмная активность радона-222, Бк/м³.

Статистической обработке подлежали не сами значения объёмной активности (ОА), а их натуральные логарифмы, так как для описания плотности распределения вероятностей регистрации ОА и ЭРОА радона на территории часто используются логарифмически нормальная зависимость [6]. По полученной выборке значений натуральных логарифмов ОА радона была оценена медиана, так как она наилучшим образом характеризует центр распределения полученных значений. Вычисление центра распределения как среднее арифметическое дает принципиально неверные результаты для оценок центра распределения ОА и ЭРОА изотопов радона.

Гистограмма распределения частот встречаемости значений ЭРОА аппроксимируется функцией $p(A)$, которая по своему виду может быть отнесена к классу экспоненциальных распределений, описываемых единой аналитической моделью [7]:

$$p(A) = \frac{\alpha}{2\lambda\sigma\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - \ln(A_{II})}{\lambda\sigma}\right|^\alpha\right),$$

где λ – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\lambda = \sqrt{\Gamma(1/\alpha)/\Gamma(3/\alpha)},$$

где σ – стандартное отклонение для значений логарифма ЭРОА изотопов радона; A_{II} – координата центра распределения для ЭРОА изотопов радона; $\Gamma(z)$ – гамма-функция; α – некоторая характеристика для данного распределения постоянная – его показатель степени, который может принимать дробные положительные значения.

При $\alpha < 1$ модель описывает распределения с очень пологими спадами, близкие по своим свойствам к распределению Коши. При $\alpha = 1$ модель соответствует распределению Лапласа, при $\alpha = 2$ – нормальному распределению Гаусса, при $\alpha > 2$ модель описывает распределения по своим свойствам близкие к трапецеидальным, которые аналогичны логистической регрессии, и, наконец, при $\alpha \rightarrow \infty$ соответствует равномерному распределению. Таким образом, показатель степени α однозначно определяет все параметры формы экспоненциальных распределений и, следовательно, для плотности вероятности распределения значений ЭРОА.

Прогнозируемая консервативная оценка максимальных значений ЭРОА изотопов радона A_{max} , принадлежащая к наблюдаемой статистике распределения ЭРОА, соответствует верхней оценке ЭРОА и рассчитывается по формуле через энтропийный коэффициент k_3 :

$$\ln A_{max} = \ln A_{II} + k_3\sigma,$$

отсюда

$$A_{max} = \exp(\ln A_{II} + k_3\sigma).$$

Для экспоненциальных распределений энтропийный коэффициент вычисляется однозначно в зависимости от показателя степени α по формуле:

$$k_3 = \frac{1}{\alpha} e^{1/\alpha} \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}} \cdot \Gamma(1/\alpha).$$

Вероятность P регистрации значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений на территории в определенном диапазоне значений от A_1 до A_2 оценивалась по формуле:

$$P = \int_{\ln A_1}^{\ln A_2} \frac{\alpha}{2\lambda\sigma\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left|\frac{x - \ln(A_{II})}{\lambda\sigma}\right|^\alpha\right) dx,$$

где $x = \ln A$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений показали большую вариацию объёмной активности радона в воз-

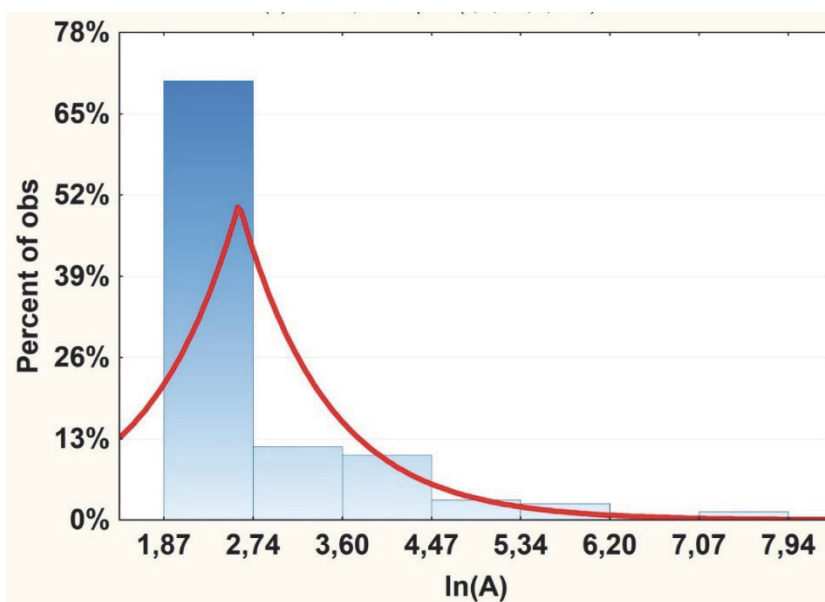


Рис. 1. Гистограмма распределения частот для значений ЭРОА изотопов радона

духе помещений (до 5000 Бк/м³). Выявлены также значительные колебания концентрации радона по времени. С учётом инструментальной погрешностей измерений получен массив значений ЭРОА радона-222, выявлено распределение частот встречаемости значений ЭРОА в воздухе помещений на территории г. Владимир (рис. 1).

Гистограмма распределения частот встречаемости значений ЭРОА удовлетворительно аппроксимируется функцией $p(A)$, характеризующейся как логарифмически Лапласово распределение:

$$p(A) = 0.827 \exp\left(-\left|\frac{\ln(A) - 2.593}{0.605}\right|\right),$$

где $\alpha = 1$ – показатель степени, соответствующий распределению Лапласа.

Центр распределения для значений ЭРОА радона на территории г. Владимир оценивается величиной $A_{ц} = 13.4$ Бк/м³. Среднее квадратичное отклонение ЭРОА для $\ln(A)$ составляет $\sigma = 0.8552$. Прогнозируемая верхняя оценка максимальных значений ЭРОА изотопов радона A_{max} , принадлежащая к наблюдаемой статистике распределения ЭРОА и рассчитанная как верхняя граница энтропийного интервала, не превышает 69 Бк/м³. В то же время вероятность регистрации значений ЭРОА изотопов радона свыше 100 Бк/м³ составляет 1.8 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Существуют трудности с определением ОА радона и его продуктов распада [8]. Одна из них связана с тем, что уровни облучения могут в значительной степени изменяться в зависимости от местной геологии, типа здания, вентиляции

и поведения жителей [9]. Концентрация радона в воздухе помещений не является постоянной, а претерпевает существенные суточные, кратковременные, сезонные и долговременные вариации [10]. Скорость поступления радона в помещения здания из грунта под ним и из-за ограждающих конструкций практически постоянна во времени, а временные вариации ОА и ЭРОА радона в помещениях обусловлены изменениями величины кратности воздухообмена и направления движения потоков воздуха внутри здания [11].

Вероятность регистрации высоких значений ЭРОА на территории г. Владимир, т.е. более 100 Бк/м³, не равна нулю, так как кривая распределения плотности вероятности ассиметрична и характеризуется пологим спадом. Полученные вероятностные характеристики показывают, что на территории г. Владимир приоритетными для радиационного мониторинга и потенциально радоноопасными может быть признано не менее 50 зданий.

Особенностью имеющихся эпидемиологических данных является то, что во всех подвыборках с объемной активностью радона $A > 50$ Бк/м³ отношение шансов возникновения рака легкого статистически достоверно больше единицы, а зависимость доза-эффект хорошо описывается линейной зависимостью [9]. При этом вероятность регистрации в воздухе помещений значений ЭРОА изотопов радона более 50 Бк/м³ оценивается величиной 5.6 %.

Таким образом полученные статистические параметры распределения значений ЭРОА радона являются с одной стороны геохимической характеристикой или характеристикой потенци-

альной радоноопасности территории, а с другой стороны – совокупной характеристикой конструктивных особенностей эксплуатируемых зданий на территории населенного пункта. Однако, по нашему мнению, характеристика радиационной опасности среды помещений от радонового облучения не может быть признана достаточной без анализа индивидуальной эффективной дозы, то есть только на основании оценок доступных доказательств самого факта присутствия, а также меры опасности изотопов радона и их дочерних продуктов распада, способных вызывать вредное воздействие на человека.

Существуют и другие проблемы, связанные с определением статистических параметров распределения равновесной объемной активности изотопов радона и их дочерних продуктов в конкретных условиях. Такие как оценка неопределенностей и относительно небольшое число измеренных помещений. Но при условии, что распределение частот встречаемости эффективной дозы аппроксимируется единой аналитической моделью, и что центр распределения и стандартное отклонение правильно оценены, то полученные оценки очень полезны [6].

ВЫВОДЫ

Были получены статистические параметры распределений для значений ЭРОА изотопов радона. Показано, что распределение ЭРОА изотопов радона могут быть аппроксимированы функцией, которая по своему виду относится к классу экспоненциальных распределений, описываемых единой аналитической моделью. Для помещений, расположенных на первых, полуподвальных и подвальных этажах зданий на территории г. Владимир, распределения частот встречаемости значений ЭРОА удовлетворительно аппроксимируется функцией, характеризующейся как логарифмически Лапласово распределение. Ошибка представленных оценок статистических параметров с учетом объема замеров объемной активности радона не превышает 15 % при уровне достоверности 0,95. Таким образом, полученные статистические параметры могут рассматриваться как характеристика потенциальной радоноопасности территории.

Оценка доступных доказательств присутствия радона в воздухе помещения есть необходимое, но недостаточное условие для характеристики радиационной опасности среды помещений на территории населенного пункта. Для прогнозных оценок радиационной опасности среды помещений от радонового облучения необходимы

вероятностные оценки распределения индивидуальных эффективных доз внутреннего облучения в экспонируемой популяции. Для экспонируемой популяции г. Владимир численностью 76.89 тыс. чел. вероятность получить повышенные и высокие дозовые нагрузки (> 5 мЗв/год) от радонового облучения составляет 3.1 %. При этом потенциально в группу риска с высоким уровнем облучения входят не менее 2.38 тыс. чел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. Abdelzaher*, 2011. Seasonal variation of radon level and radon effective doses in the Catacomb of Kom EI-Shuqafa, Alexandria, Egypt. Vol. 77, No. 4, pp. 749–757. DOI: 10.1007/s12043-011-0150-z. Retrieved 24.03.2015 from <http://www.ias.ac.in/pramana/v77/p749/fulltext.pdf>.
2. WHO, 2009. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. World Health Organization. 2009. ISBN: 9789241547673, pp: 108. Retrieved 24.03.2015 from http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf.
3. *Y. Ishimori, K. Lange, P. Martin, Y.S. Mayya, M. Phaneuf*, 2013. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. ISBN 978-92-0-142610-9. Retrieved 24.03.2015 from http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs474_webfile.pdf.
4. 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 МУ 2.6.1.2838-11. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 26 с. Retrieved 24.03.2015 from <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=113515>.
5. IAEA, 2003. Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines. ISBN 92-0-113903-9. Retrieved 24.03.2015 from http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1168_web.pdf.
6. IAEA, 2013. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Retrieved 24.03.2015 from http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-AQ-33_web.pdf.
7. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
8. *Baias P., Hofmann W., Winkler-Heil R. et al.*, 2010. Lung dosimetry for inhaled radon progeny in smokers. Radiat. Prot. Dosim. 138, 111 – 118 DOI: 10.2768/22829. Retrieved 24.03.2015 from <http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/168.pdf>.
9. ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40 (1). Retrieved 24.03.2015 from http://www.icrp.org/docs/P115_russian%20edition.pdf.

10. *Онищенко А.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В.* Влияние временных вариаций уровней радона и погрешностей измерений на оценку средних сезонных значений объёмной активности радона в помещении // АНРИ №3 (74) 2013. С. 2 – 12.
11. *Цаплов А.А., Маренный А.М.* Принципы радонового контроля в помещениях зданий // АНРИ №1 (76) 2014. С.6 – 14.

**ESTIMATION OF THE VOLUME ACTIVITY OF RADON
IN INDOOR AIR BY THE EXAMPLE OF VLADIMIR**

© 2015 M.I. Semchenko, T. A. Trifonova, L.A. Shirkin

Vladimir State University named after A.G. Stoletov and N.G. Stoletov

Instrumental measurements were carried out in different rooms and buildings in the city of Vladimir, new data on the statistical distribution of the parameters of volume activity of radon in indoor air in the city of Vladimir.

Keywords: radon, equivalent equilibrium volume activity, internal exposure, the risk of environmental radon radiation from space, radon safety area.

Maxim Semchenko, Graduate Student.

E-mail: maks77757@yandex.ru

Tatyana Trifonova, Doctor of Biology, Professor, Head at the Ecology Department.

Leonid Shirkin, Candidate of Chemistry, Associate Professor.