

Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 1. Проблема оценки содержания радона и современный принцип контроля

А.А. Цапалов¹, С.М. Киселев², А.М. Маренный³, К.Л. Ковлер⁴, С.И. Кувшинников⁵

¹Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва, Россия

²Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна,
Федеральное медико-биологическое агентство России, Москва, Россия

³Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены,
Федеральное медико-биологическое агентство России, Москва, Россия

⁴Израильский технологический институт «Technion», Хайфа, Израиль

⁵Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Контроль радона в зданиях проводится уже многие десятилетия в разных странах мира, включая Россию. Однако до сих пор отсутствует единый стандарт, позволяющий оценивать значение неопределенности результата контроля с учетом режима и продолжительности измерений. Очевидно, что с уменьшением продолжительности измерений увеличивается неопределенность контроля. Отсутствие данных о доверительном интервале величины среднегодового содержания радона в помещении не позволяет выполнять корректное и надежное сравнение с нормативным уровнем как на стадии приемки зданий в эксплуатацию, так и в эксплуатируемых зданиях. Это также существенно затрудняет развитие эффективного метода, стратегии массового контроля и выявление зданий с высоким содержанием радона. В России несколько лет назад был разработан надежный метод контроля, учитывающий временные вариации радона и продолжительность измерений, однако он до сих пор малоизвестен и не имеет практического применения. В статье приводится принцип контроля радона, основанный на простых критериях, широко используемых в метрологии и отвечающих требованиям современных стандартов. Этот принцип вводит новый параметр – коэффициент временных вариаций радона $K_v(t)$, который выражает основную составляющую неопределенности среднегодового уровня радона в зависимости от режима и продолжительности измерений. Предложен оригинальный алгоритм определения значений $K_v(t)$, разработанный на основе результатов непрерывных годовых мониторингов радона в представительных экспериментальных помещениях. Кроме того, показана структура поправочного коэффициента, учитывающего влияние температуры на поведение радона. Использование поправочного коэффициента позволяет снизить величину $K_v(t)$, однако его применение ограничено.

Ключевые слова: радон, объемная активность, эквивалентная активность, коэффициент временных вариаций, поправочный коэффициент, нормативный уровень, неопределенность, доверительный интервал, мониторинг.

Современное состояние проблемы контроля радона

Известно, что радон является основным фактором облучения населения Земли, вызывающим раковые заболевания. Среднемировая доза годового облучения от радона составляет около 1,2 мЗв, или 42% от всех известных природных и техногенных источников ионизирующих излучений [1]. Для населения России значение этого

показателя оценивается почти в два раза выше – около 2,0 мЗв [2, 3]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, до 14% всех заболеваний раком легкого обусловлено влиянием радона за счет ингаляции его короткоживущих продуктов распада [4] (вероятно, для населения России доля заболеваний выше). Однако негативное влияние радона поддается регулированию, и его можно снижать, в отличие от действия, например, кос-

Цапалов Андрей Анатольевич

Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов.

Адрес для переписки: 121357, Москва, ул. Вересаева, 15; E-mail: andrey-ants@yandex.ru

мического и терригенного излучений. Поэтому во многих странах, включая Россию, установлены допустимые уровни содержания радона в помещениях зданий. С этой целью проводятся измерения для оценки среднегодовой объемной активности (СОА) радона и сравнения с нормативным (или контрольным) уровнем, значения которого, в зависимости от страны, находятся в диапазоне от 74 [5] до 4000 [6] Бк/м³. В России норматив выражен в единицах эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона, согласно СанПиН 2.6.1.2523-09¹, и ограничивается на уровне 100 и 200 Бк/м³ для вводимых в эксплуатацию и существующих зданий соответственно². В случае превышения норматива должны проводиться радонозащитные мероприятия, а затем снова определяться уровень радона.

Массовый контроль радона в зданиях начали проводить около 25 лет назад в США [7], а также в Великобритании и Швеции, когда сами жители или владельцы зданий стали выступать инициаторами измерений и оплачивать соответствующие работы. Осуществляемый в России контроль радона нельзя считать массовым, т.к. население мало информировано и не проявляет соответствующей инициативы. Тем не менее, согласно отчетам Роспотребнадзора, в рамках плановых надзорных мероприятий только за период с 2006 по 2012 г. в России было выполнено почти 1,4 млн измерений ЭРОА и объемной активности радона в зданиях. Однако, несмотря на многолетний и обширный международный опыт, пока отсутствует признанный единый стандарт, позволяющий определять СОА радона с известной точностью.

Проблема контроля радона обусловлена тем, что концентрация радона внутри помещений не только эксплуатируемых, но даже закрытых незаселенных зданий отличается значительными суточными, недельными и сезонными колебаниями, амплитуда которых может изменяться во много раз. Очевидно, что наиболее точная оценка СОА радона может быть получена, если измерения выполнялись в течение всего года. При этом также очевидно, что уменьшение продолжительности измерений будет приводить к увеличению неопределенности оценки СОА радона. Тем не менее, в подавляющем большинстве случаев контроль радона выполняется на основе результатов краткосрочных измерений. Например, за последние 25 лет долгосрочные измерения проводились лишь в 2% всех радоновых тестов в США [8], что состав-

ляет около 500 тыс. измерений при общей численности более 24 млн. В России долгосрочные измерения проводятся выборочно, поэтому их количество за последние 20 лет пока не превышает 40–50 тыс. [9–15].

Отметим, что такой подход объясняется, помимо технических аспектов, еще и тем, что глобальное среднее геометрическое, взвешенное по численности населения, или наиболее вероятное значение СОА радона в зданиях составляет около 30 Бк/м³ [16], что существенно ниже нормативного уровня. Поэтому чаще всего вполне допустимо оценивать СОА с достаточно высокой неопределенностью – на уровне 100% и выше. Однако неопределенность СОА на основе результатов краткосрочных измерений никак не контролируется, а ее относительные значения существенно различаются вследствие разной (нестандартизированной) продолжительности контроля, которая может составлять от нескольких минут или часов до нескольких дней, недель или даже месяцев, согласно МУ 2.6.1.2838-11³ и [6], но не более 3 месяцев [5]. С целью повышения надежности результатов контроля в период краткосрочных измерений рекомендуется, согласно МУ 2.6.1.2838-11³ и [5, 6], закрывать все окна и двери в обследуемом помещении для обеспечения менее интенсивного и более стабильного воздухообмена. Это приводит к некоторому увеличению концентрации радона, однако исключает промахи в выявлении зданий с СОА радона выше норматива.

Долгосрочные измерения, очевидно, позволяют более точно оценивать СОА радона, но проводятся гораздо реже, т.к. их продолжительность составляет от 2-3 месяцев до 1 года, согласно МВИ 2.6.1.003-99⁴ и [5, 6, 17, 18]. Даже рекомендуется проводить два длительных измерения в разные сезоны года, согласно МУ 2.6.1.2838-11³ и [6, 17, 18]. Однако и в случае долгосрочных измерений проблема оценки неопределенности СОА радона тоже остается нерешенной. Очевидно, что точность оценки СОА радона, например, в течение 3 или 10 месяцев измерений будет разной.

Учитывая вышеизложенное, необходимо критически оценить, как обеспечивается качество контроля радона в США и странах Европейского союза, где к настоящему времени накоплен огромный опыт в организации и проведении массовых измерений. Как бы странно это ни выглядело, но до сих пор руководящим документом, обеспечивающим качество контроля радона в США, остается EPA

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/2009). СанПиН 2.6.1.2523-09: утв. 01.09.2009. взамен НРБ-99. М.: Минздрав России, 2009. [Norms of radiation safety (NRB-99/2009): sanitary rules and regulations (SanPiN 2.6.1.2523-09): M.: Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 100 p. (in Russian)].

² Для примерного сопоставления с объемной активностью величину ЭРОА радона следует умножать на два [The equilibrium equivalent concentration (EEC) should be multiplied by two for approximate comparison with the radon activity concentration].

³ Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности. Утв. 28.01.2011. – взамен МУ 2.6.1.715-98 [Methodical guidance MU 2.6.1.2838-11. Radiation control and sanitary-epidemiological assessment of residential, public and industrial buildings and constructions after the completion of construction, general overhaul, renovation on the indicators of radiation safety. Approved 28.01.2011.]

⁴ Методика выполнения измерений МВИ 2.6.1.003-99. Радон. Измерение объемной активности интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях. [Radon. Measurement of the volume activity using integral track method in residential, public and industrial housings. Procedure of measurements 2.6.1.003-99.]

402-R-95-012 [19], утвержденный в 1997 г. Это достаточно объемное руководство, целиком посвященное обеспечению и контролю качества исключительно процедуры измерений объемной активности радона (инструментальной неопределенности). В то же время более значимая составляющая неопределенности оценки COA радона, обусловленная его временными вариациями в зданиях, вообще не рассматривается. Кроме того, ни в одном из последних стандартов США, типа ANSI/AARST MAH-2014 [5], а также ни в международном стандарте ISO 11665-8 (2012) [18], ни в публикациях Международного агентства по атомной энергии (IAEA, 2013, 2015, 2017) [6, 20, 21], касающихся контроля радона в зданиях, не показано количественно и даже не обсуждается, как доверительный интервал или неопределенность оценки COA радона зависит от продолжительности и режима измерений.

Обзор литературы [22–40], опубликованной в течение последних десятилетий в связи с изучением поведения радона для оценки COA в зданиях, показывает, что основная цель практически всех национальных исследований заключалась в определении структуры и значений поправочного коэффициента, учитывающего влияние факторов окружающей среды. Одним из наиболее важных влияющих факторов (и в то же время поддающихся простому контролю) является температура воздуха снаружи здания либо разность температуры внутри и снаружи здания. Действительно, во многих публикациях отмечается, что в зимний период содержание радона в помещениях обычно выше, чем летом [26–28, 30, 33–37]. Однако это не является строгим правилом, т.к. нередко наблюдается противоположная закономерность [9, 13, 22, 23, 38–41]. Поэтому применение температурного, сезонного или какого-либо другого поправочного коэффициента должно ограничиваться экспериментально определенными условиями, при которых обеспечивается характерное (прогнозируемое с высокой вероятностью) поведение радона в помещениях установленного типа в период проведения измерений.

Следует отметить, что наличие даже обоснованного поправочного коэффициента и определенных ограничивающих условий не отменяет необходимости оценки неопределенности COA радона. В любом случае должен существовать алгоритм для оценки неопределенности COA радона либо на основе статистического анализа результатов измерений разной длительности в представительных помещениях, либо на основе расчетной модели, учитывающей совокупный набор разного рода факторов (особенности климата и геологии, строительных материалов и конструкции здания, системы вентиляции и отопления, состава и поведения жильцов, типа и расположения обследуемой комнаты в здании и т.п.). Надежный алгоритм на основе расчетной модели, который можно было бы применять для оценки наиболее вероятного значения и доверительного интервала COA радона в отдельном помещении (или для конкретного здания в целом), до сих пор отсутствует и, вследствие большого числа влияющих на поведение радона факторов, вряд ли будет получен в будущем. В силу мультипликативного действия разных факторов влияния, суммарная неопределенность COA радона не поддается надежной оценке либо оказывается неприемлемо высокой, если целью контроля является приемка в эксплуатацию либо обнаружение помеще-

ний и зданий с повышенным содержанием радона. Таким образом, алгоритм для оценки неопределенности COA радона целесообразно разрабатывать исключительно на основе статистического анализа результатов измерений разной длительности.

Среди довольно обширного списка публикаций [22–40] за последние десятилетия лишь в одной [38] предпринималась попытка оценки неопределенности COA в зависимости от продолжительности контроля. В этом исследовании приводится зависимость коэффициента вариаций (КВ) радона от продолжительности (2 и 4 сут, а также 1, 3, 4 и 6 мес.) и условий измерений (закрытые или открытые помещения). Значения КВ характеризуют неопределенность COA радона. В этой работе статистический анализ вариаций радона проводился на основе результатов долгосрочных синхронных обследований 62 частных жилых домов в штате Миннесота (США). Как указывают авторы, этот штат отличается повышенным содержанием радона в зданиях и контрастным климатом.

Однако значения КВ, полученные в работе [38], нельзя считать надежными для применения к отдельным помещениям или отдельным зданиям, поскольку многие авторы, например [31, 32, 38], определяют значения КВ традиционным путем (отношение стандартного отклонения к математическому ожиданию), используя результаты параллельных краткосрочных и долгосрочных измерений в большом количестве зданий, но при этом не учитывают два весьма важных обстоятельства. Во-первых, в отличие от логнормального характера пространственного распределения радона в зданиях, характер временного (частотного) распределения объемной активности радона в отдельных помещениях не имеет определенной закономерности. В этом случае невозможно оценить доверительную вероятность неопределенности COA радона в помещении, если используются значения КВ. Во-вторых, величина КВ в данном случае характеризует относительный средний разброс значений COA радона, что при некоторых ограничениях (равная продолжительность измерений либо наличие огромного массива данных) допускает применение КВ, например, для расчета неопределенности коллективной дозы облучения за счет радона в зданиях. В то же время подобные средние оценки разброса нельзя применять для определения индивидуальной дозы или для сопоставления определяемой COA радона в конкретном помещении с контрольным (нормативным) уровнем. Кроме того, для оценки надежности прогноза COA радона авторы [31, 32, 38] используют специальные подходы и терминологию («*sensitivity*», «*specificity*», «*efficiency*», «*predictive value of a positive/negative test*»), принятые в медицинской статистической диагностике [42]. Однако подобный подход нельзя считать надежным в отношении контроля радона в жилых и производственных зданиях, поскольку в этом случае не предусматривается количественная оценка величины неопределенности или доверительного интервала результата измерения, т.е. не учитываются рекомендации международного стандарта [43] по выражению неопределенности результата измерения.

Отсутствие информации о неопределенности или границах доверительного интервала определяемой COA радона существенно затрудняет:

– корректное и надежное сравнение COA радона с нормативным уровнем, т.е. определение соблюдения

требований радиационной безопасности по ограничению концентрации радона, как в существующих, так и в вводимых в эксплуатацию новых зданиях, согласно СанПиН 2.6.1.2523-09¹;

– оптимизацию продолжительности измерений и стратегии массового контроля радона в зданиях с целью снижения не только временных, но и финансовых затрат, учитывая имеющиеся ресурсы; например, нецелесообразно использовать более точную аппаратуру и проводить долгосрочные измерения в помещениях с низким содержанием радона, причем таких помещений подавляющее большинство, как во всем мире, так и на территории России (см. выше);

– корректную оценку среднестатистических значений по отдельным выборкам зданий и в целом; если же частные результаты массового контроля радона, проводившегося разными методами (мгновенными, кратко-, средне- или долгосрочными), характеризуются определенным доверительным интервалом, то при оценке средних показателей инверсное значение неопределенности можно использовать как вес частного результата измерений, что особенно важно при построении карт потенциальной радоноопасности территорий, а также для пополнения баз данных и более корректной оценки коллективных доз.

Для решения указанных проблем в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» были запланированы и проведены исследования с целью изучения закономерности поведения объемной активности и ЭРОА радона в зданиях Московского региона. Результаты представлены в ряде публикаций [44–50]. Кроме того, были разработаны, утверждены и введены в действие ФМБА России методические указания «Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности» (МУ 2.6.1.037-2015)⁵. Данный документ дополняет МУ 2.6.1.2838-11³ в части радонового контроля, конкретизируя условия измерений, порядок их проведения и расчет значения среднегодовой ЭРОА изотопов радона в помещениях зданий с оценкой ее неопределенности в зависимости от продолжительности и режима измерений. В основу МУ 2.6.1.037-2015⁵ положен надежный принцип контроля радона в зданиях, который удовлетворяет требованиям метрологии и рекомендациям современного национального стандарта ГОСТ Р 54500.3-2011⁶.

Таким образом, в России были организованы и проведены уникальные научные исследования, результаты которых не только отличаются новизной, но и имеют важное международное практическое значение, поскольку позволяют, наконец, подойти к разрешению проблемы качества контроля радона в зданиях. Однако, спустя

уже более двух лет после выхода МУ 2.6.1.037-2015⁵, в отечественной практике рутинного радонового контроля почти ничего не изменилось. Поэтому мы считаем необходимым вновь напомнить о существовании МУ 2.6.1.037-2015⁵ и обратиться за помощью к руководству и сотрудникам лабораторий радиационного контроля, а также контролирующих организаций Роспотребнадзора, Ростехнадзора, Росаккредитации и др. с целью более эффективного распространения информации и внедрения в производственную практику отечественных достижений.

Последующие разделы данной части статьи посвящены более подробному, чем в МУ 2.6.1.037-2015⁵, описанию современного принципа контроля радона в помещениях зданий, включая структуру поправочного коэффициента. Кроме того, детально представлен алгоритм определения значений коэффициента временных вариаций радона с учетом продолжительности и режима измерений.

Принцип контроля радона

Принцип контроля радона в помещении состоит в определении доверительного интервала СОА радона в диапазоне от $\bar{C} - U(\bar{C})$ до $\bar{C} + U(\bar{C})$ (либо в диапазоне от 0 до $\bar{C} + U(\bar{C})$, если $U(\bar{C}) > \bar{C}$) и сравнении границ этого интервала с нормативным уровнем, согласно следующему трем критериям.

Критерий 1. Определяемая СОА или среднегодовая ЭРОА (далее – СЭА) радона не превышает нормативный уровень, если выполняется условие (1); тогда измерения прекращаются, а радонозащитные мероприятия не проводятся.

$$\bar{C} + U(\bar{C}) = \bar{C} \cdot [1 + U_{rel}] \leq C_H \quad \text{или} \quad (1)$$

$$k \cdot C(t) \cdot \left[1 + \sqrt{K_V(t)^2 + U_u^2} \right] \leq C_H$$

$$[U_{rel}(\bar{C}) = U(\bar{C})/\bar{C} = \sqrt{K_V(t)^2 + U_u^2}], \text{ где}$$

\bar{C} – измеренное или расчетное значение СОА (или СЭА) радона, Бк/м³;

C_H – нормативный уровень, Бк/м³;

$U(\bar{C})$ – абсолютная неопределенность СОА (или СЭА) радона, Бк/м³;

U_{rel} – относительная неопределенность СОА (или СЭА) радона, отн. ед.;

$C(t)$ – измеренное среднее значение объемной активности (или ЭРОА) радона за период времени t , Бк/м³;

k – поправочный коэффициент (отн. ед.), учитывающий влияние факторов окружающей среды на поведение радона при определенных ограничивающих условиях, при которых обеспечивается характерное (прогнозируемое с

⁵ Методические указания МУ 2.6.1.037-2015. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности. Утв. 14.05.2015. 40 с. [Methodical guidelines MG 2.6.1.037-2015. Estimation of the average annual equilibrium equivalent concentration of radon isotope in the air of housings based on the measurements of different duration. Approved 14.05.2015, 40 p.].

⁶ ГОСТ Р 54500.3-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения [GOST R 54500.3-2011/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement].

высокой вероятностью) поведение радона в помещениях установленного типа в период проведения измерений; если признаки закономерного поведения радона не установлены, то $k=1$;

$K_V(t)$ – коэффициент временных вариаций радона (отн. ед.), зависящий от режима и продолжительности измерений и изменяющийся в диапазоне от 0 (если $t=1$ год, но без учета межгодовых вариаций; см. Часть 2) до 200% и более (если $t < 2$ суток), согласно МУ 2.6.1.037-2015⁵; этот коэффициент выражает неопределенность временных вариаций радона в помещениях как величину относительного максимального отклонения $C(t)$ от СОА (или СЭА) радона;

U_u – относительная инструментальная неопределенность (отн. ед.) или неопределенность величины $C(t)$, значение которой обычно находится в диапазоне 10–40% (обеспечению надежности контроля исключительно этой величиной посвящено руководство [19]).

Критерий 2. Определяемая СОА (или СЭА) радона превышает нормативный уровень, если выполняется условие (2); тогда измерения прекращаются и проводятся радонозащитные мероприятия.

$$\bar{C} - U(\bar{C}) > C_H \quad \text{или} \quad (2)$$

$$k \cdot C(t) \cdot \left[1 - \sqrt{K_V(t)^2 + U_u^2} \right] > C_H$$

Критерий 3. Если оба условия (1) и (2) не выполняются, то продолжение измерений может привести к выполнению одного из этих условий, поскольку параметры $C(t)$ и $K_V(t)$ зависят от продолжительности измерений, причем значение $K_V(t)$ всегда будет снижаться. Если по результатам дополнительных измерений условия (1) и (2) тоже не выполняются, то рекомендуется считать, что нормативный уровень превышен.

Таким образом, коэффициент $K_V(t)$ является важной частью неопределенности оценки СОА (или СЭА) радона, особенно в период краткосрочных измерений, когда обеспечивается условие $K_V(t)^2 \gg U_u^2$. С целью практического применения значения $K_V(t)$ должны быть определены с удовлетворительной точностью и табулированы. Также необходимо учитывать, что при определенных условиях значения $K_V(t)$ могут быть уменьшены за счет применения коэффициента k .

Представленный принцип соответствует требованиям метрологии и рекомендациям современного национального стандарта ГОСТ Р 54500.3-2011⁶, поэтому обеспечивает высокую надежность контроля радона, независимо от применяемых методов и средств измерений объемной активности или ЭРОА радона в помещениях зданий. Этот простой принцип широко используется для контроля качества при производстве разного рода продукции, однако для контроля радона он предложен впервые, видимо, по причине отсутствовавших прежде надежных критериев контроля и подходов в оценке коэффициента временных вариаций радона.

Определение коэффициента временных вариаций радона

Для определения значений $K_V(t)$ предлагается новый подход, принципиально отличающийся от ранее принимавшихся попыток количественной оценки вре-

менных вариаций радона [22, 25–32, 38]. Новый подход основан на анализе результатов годовых мониторингов радона в представительных экспериментальных помещениях. Представительными можно считать помещения, во-первых, отличающиеся повышенным содержанием радона, а во-вторых, расположенные в зданиях, которые наиболее распространены в регионах с характерной геологией и климатом. Однако алгоритм обработки результатов мониторингов не зависит от типа помещения и расположения здания. При этом целесообразно классифицировать экспериментальные помещения, поскольку информация о ранжировании может быть весьма полезна в будущем (когда будет накоплен большой массив экспериментальных данных), если удастся найти связь между $K_V(t)$ и типом помещений (их отличительными признаками).

Критерием повышенного содержания радона является превышение концентрации радона в экспериментальном помещении более чем в 5 раз относительно концентрации радона в наружном (атмосферном) воздухе. В этом случае СОА радона будет приближаться к нормативному уровню либо превысит его. В противном случае, если атмосферный радон при глобальном значении около 10 Бк/м³ [1] является основным источником радона, то СОА радона в помещении будет существенно ниже норматива.

В качестве табличных значений $K_V(t)$, которые могут применяться в практике контроля радона в помещениях зданий, предлагается использовать только максимальные значения коэффициента $K_V(t)$ относительно всех экспериментальных помещений (либо помещений определенного типа, если обнаружена вышеупомянутая связь). При этом учитывается зависимость $K_V(t)$ от продолжительности непрерывных измерений, либо нескольких измерений, проводившихся в разные сезоны года. Кроме того, коэффициент $K_V(t)$ не может определяться как классический КВ, поскольку временное (частотное) распределение значений $C(t)$ в помещениях обычно не имеет характерной (нормальной или логнормальной) зависимости. Поэтому с целью обеспечения доверительной вероятности результата оценки СОА (или СЭА) радона на уровне 95%, предлагается определять значение $K_V(t)$ при заданной продолжительности контроля t непосредственно путем анализа частоты распределения значений $C(t)$, полученных на основе непрерывного годового мониторинга объемной активности (или ЭРОА) радона с периодом регистрации (усреднения данных), равным t .

Тогда значение $K_V(t)$, как это следует из соотношений (3)–(6), будет соответствовать максимальному отклонению нижней (индекс L) или верхней (индекс U) границы распределения частных значений $C_i(t)$ от экспериментально определенной СОА (или СЭА) радона C_E .

$$K_V(t) = \max[K_V^L(t); K_V^U(t)] \quad (3)$$

$$|K_V^L(t) - K_V^U(t)| \rightarrow \min \quad (4)$$

$$K_V^L(t) = \max[|\bar{C}_E / C^L(t) - 1|; |C^L(t) / \bar{C}_E - 1|] \quad (5)$$

$$K_V^U(t) = \max[|\bar{C}_E / C^U(t) - 1|; |C^U(t) / \bar{C}_E - 1|] \quad (6)$$

где $C^L(t)$ и $C^U(t)$ – нижняя и верхняя границы соответственно.

На рисунке 1 представлен пример частотного распределения концентрации радона в экспериментальном помещении. Верхняя и нижняя границы должны располагаться так, чтобы доля значений $C_i(t)$ в отсекаемых «хвостах» не превышала 5% и одновременно выполнялось условие (4).

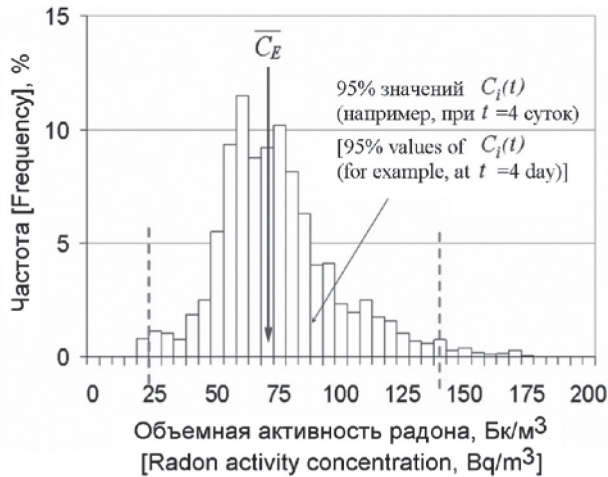


Рис. 1. Пример частотного распределения концентрации радона в помещении и положения нижней и верхней границ (пунктирные линии) [51]

[Fig. 1. Example of the indoor radon activity concentration distribution and location of the lower and upper limits (the dashed lines) [51]]

Значения функции $K_V(t)$ для конкретного экспериментального помещения на всем временном интервале, например от 1 суток до 12 месяцев, можно определить, используя соотношения (3)–(6), на основе данных одного годового мониторинга в этом помещении, если период регистрации (усреднения данных) не превышает 1 сут. Однако с целью накопления при годовом мониторинге статистически значимого массива, например, включающего 8760 (соответствует количеству часов в году), 4380 или 2920 значений, оптимальный период регистрации (интервал измерений) должен составлять 1, 2 или 3 ч соответственно. Это позволяет преобразовывать исходный массив данных, состоящий из коротких часовых интервалов, в массив с суточными, недельными или месячными интервалами с тем же шагом (1, 2 или 3 ч), путем вычисления скользящего среднего значения. При этом количество значений в новом (преобразованном) массиве снижается незначительно.

В случае выполнения нескольких измерений в течение года значения функции K_V могут быть определены путем преобразования того же исходного массива с результатами годового мониторинга. Частное значение K_V в случае проведения двух (или четырех) измерений, каждое из которых продолжительностью t^* (от 1 сут до нескольких месяцев) с интервалом начала 6 мес. (± 1 мес.) или 3 мес. (± 2 недели) соответственно, определяется в следующей последовательности:

а) исходный массив данных (с интервалом регистрации 1, 2 или 3 ч) разбивается на 2 (или 4) равные части, в которых данные с одинаковыми порядковыми номерами соответствуют времени начала измерений с интервалом 6 (или 3) месяцев;

б) данные каждого массива одинаково преобразуются путем вычисления скользящего среднего значения за период t^* с шагом 1, 2 или 3 ч, при этом объем нового массива уменьшается на количество значений, равное t^* , деленное на 1, 2 или 3 ч соответственно;

в) полученные 2 (или 4) массива преобразуются в один путем вычисления среднего по 2 (или 4) значениям с одинаковыми порядковыми номерами;

г) из объединенного массива выбираются минимальное C_{min} и максимальное C_{max} значения для расчета K_V по формуле (7).

$$K_V = \max \left[\left| \frac{\overline{C_E}}{C_{min}} - 1 \right|; \left| \frac{C_{min}}{\overline{C_E}} - 1 \right| \right] \quad (7)$$

$$K_V = \max \left[\left| \frac{\overline{C_E}}{C_{max}} - 1 \right|; \left| \frac{C_{max}}{\overline{C_E}} - 1 \right| \right]$$

Выше был представлен алгоритм, позволяющий определять значения коэффициента $K_V(t)$ и, соответственно, неопределенности СОА (или СЭА) радона с учетом продолжительности и режима измерений в конкретном экспериментальном помещении. Однако надежность табличных значений $K_V(t)$ может быть обеспечена, если этот алгоритм охватывает набор представительных экспериментальных помещений. Проблема представительности экспериментальных помещений, а точнее их совокупного набора обсуждается во второй части статьи, основываясь на имеющемся экспериментальном материале. Объем этого материала относительно небольшой, поэтому пока сложно сформулировать строгие критерии, обеспечивающие представительность набора помещений, как и результатов самого исследования.

Структура поправочного коэффициента

Структура формулы поправочного коэффициент k в случае учета влияния температуры на поведение радона в помещениях имеет следующий вид [44,47].

$$k = \frac{1}{K_T(\delta T) + 1} \quad \text{при} \quad \delta T = \frac{T_B - T_H}{\langle T_B \rangle - \langle T_H \rangle} - 1, \quad \text{где} \quad (8)$$

$K_T(\delta T)$ – коэффициент температурного влияния (отн. ед.), зависящий от относительной разности температуры δT , по уточненным данным соответствует функции на рисунке 2; T_B и $\langle T_B \rangle$ – измеренная и среднегодовая температура внутри помещения, °С; T_H и $\langle T_H \rangle$ – измеренная и среднегодовая температура снаружи здания, °С.

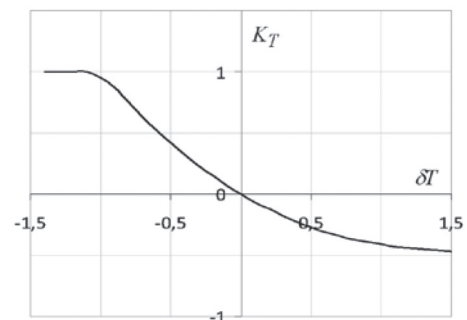


Рис. 2. Вид функции $K_T(\delta T)$.

[Fig. 2. The function $K_T(\delta T)$]

Важно уточнить, что применение коэффициента k существенно ограничивается набором следующих требований:

а) только закрытые помещения с естественной вентиляцией и стабильным источником поступления радона (строительные материалы);

б) продолжительность непрерывного измерения не более 2 недель;

в) только климатические зоны с регулируемым отопительным периодом.

Однако практически всем этим требованиям соответствуют новые незаселенные многоэтажные здания перед вводом их в эксплуатацию. Также этим требованиям отвечают эксплуатируемые многоэтажные производственные и общественные здания в период продолжительного (не менее 2 сут) отсутствия людей, например, в течение выходных дней. Таким образом, несмотря на набор ограничений, учет температурного влияния может применяться в значительной доле зданий на территории России.

Заключение

Анализ состояния проблемы оценки неопределенности среднегодового уровня радона в помещениях и его надежного сравнения с нормативом показывает необходимость совершенствования методов контроля радона в зданиях. Результаты контроля радона нельзя считать надежными, пока не будет внедрен предложенный принцип контроля, учитывающий современные требования метрологии и международных стандартов.

Внедрение в отечественную практику предложенного принципа контроля радона в помещениях целесообразно осуществить путем подготовки нового методического документа, учитывающего практический опыт и основные подходы, использованные в методических указаниях МУ 2.6.1.2838-11³ и МУ 2.6.1.037-2015⁵. Также необходимо организовать и провести исследования по верификации и уточнению коэффициента $K_{\Gamma}(t)$, поскольку его табличные значения были получены на ограниченной выборке зданий, в основном расположенных в Московском регионе.

Предложенный принцип контроля при наличии верифицированных значений $K_{\Gamma}(t)$ впервые позволяет на научной основе с использованием строгих алгоритмов выполнить расчетные исследования с целью разработки стратегии массового контроля и на ее основе предложить подходы к оптимизации надзорных мероприятий, направленных на выявление помещений с высокими уровнями радона.

Принимая во внимание современное состояние техники и коммуникаций, а также Программу «Цифровая экономика Российской Федерации» (Утв. Правительством РФ от 28.07.2017 г. № 1632-р), необходимо в поддержку реализации новой методики и стратегии массового контроля радона предусмотреть создание открытой национальной интернет-платформы для сбора, обработки и хранения результатов измерений радона, а также других природных источников ионизирующих излучений, включая сырье и строительные материалы. Визуализация этих результатов на многослойной электронной карте и свободный доступ к базам данных позволит не только более объективно оценивать дозы облучения населения и эффективно

выявлять проблемные территории и здания, но и, очевидно, послужит важным информационным источником для привлечения внимания самого населения и административных органов разного уровня к проблеме радона и природной радиоактивности.

Литература

1. UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations: Vol. 1, Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
2. Marenny A., Savkin M., Shinkarev S., 2000. Estimation of the radon-induced dose for Russia's population: methods and results. *Radiat. Prot. Dosimetry* 90 (4), 403–408.
3. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году / А.Н. Барковский, Н.К. Барышков, А.А. Братилова, Т.А. Кормановская, Л.В. Репин, И.К. Романович, В.С. Степанов, Т.Н. Титова // Информационный сборник НИИРГ. – СПб., 2016. – 73 с.
4. WHO, 2016. Radon and health. World Health Organization. Updated June 2016. – Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/> (Accessed: January 15, 2018).
5. ANSI/AARST MAH, 2014. Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes. – Available from: www.radonstandards.us (Accessed: January 16, 2018).
6. IAEA, 2017. Status of radon related activities in member states participating in technical cooperation projects in Europe. International Atomic Energy Agency, Series: IAEA-TECDOC-1810, Vienna, 2017.
7. EPA, 1992. A Citizens Guide to Radon. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 402-K-92-001.
8. George, A. The history, development and the present status of the radon measurements programme in the United States of America. *Radiation Protection Dosimetry*, 2015, 167 (1-3), 8–14.
9. Marenny A., Nefedov N., Vorozhtsov A., 1995. Results of radon concentration measurements in some regions of Russia. *Radiation Measurements* 25 (1-4), 649–653.
10. Стамат, И.П. Сезонные изменения суммарных показателей и содержания радона в воде артезианских скважин / И.П. Стамат, В.В. Ступина, Ю.Н. Гончарова, А.В. Пашкова // Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации: матер. междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2008. – С. 138–140.
11. Маренный, А.М. Скрининговые исследования содержания радона в помещениях населенных пунктов / А.М. Маренный // Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации: матер. междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2008. – С. 99–101.
12. Соловьев, М.Ю. Содержание радона в воздухе вновь построенных и эксплуатируемых зданий в Ростовской области / М.Ю. Соловьев, М.В. Калинина, И.П. Стамат // Радиационная гигиена. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 62–66.
13. Губин, А.Т. Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на содержание радона в помещениях / А.Т. Губин, А.М. Маренный, В.А. Сакович, В.И. Астафуров, Н.А. Нефедов, А.В. Пензев // Медицина экстремальных ситуаций. – 2012. – № 4(42). – С. 77–88.
14. Маренный, А.М. Обследование города Краснокаменск на содержание радона в помещениях / А.М. Маренный [и др.] // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 47–52.
15. Маренный, А.М. Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России / А.М. Маренный [и др.] // Радиационная гигиена. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 23–29.

16. UNSCEAR, 2006. Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Report to the General Assembly Scientific Annexes A and B (UNSCEAR 2006 Report). United Nations publication, New York (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).
17. Маренный, А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом / А.М. Маренный // АНРИ. – 2012. – № 4. – С. 13–19.
18. ISO 11665-8, 2012. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings.
19. EPA, 1997. National Radon Proficiency Program. Guidance on Quality Assurance. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 402-R-95-012, NAREL, Montgomery.
20. IAEA, 2013. National and regional surveys of radon concentration in dwellings. IAEA/AQ/33, ISSN 2074–7659, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2013.
21. IAEA, 2015. Protection of the Public against Exposure Indoors Due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. Specific Safety Guide No. SSG-32. International Atomic Energy Agency, Vienna 2015.
22. Karpinska, M., Mnich, Z., Kapala, J., 2004. Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of north-eastern Poland. *Journal of Environmental Radioactivity* 77 (2), 101–109.
23. Stojanovska, Z. [et al.]. 2011. Seasonal indoor radon concentration in FYR of Macedonia. *Radiation Measurements* 46 (6-7), 602–610.
24. Gillmore, G.K., Phillips, P.S., Denman, A.R., 2005. The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: a case study approach. *Journal of Environmental Radioactivity* 84, 469–479.
25. Groves-Kirkby, C. [et al.]. 2006. Time-integrating radon gas measurements in domestic premises: comparison of short-, medium- and long-term exposures, *Journal of Environmental Radioactivity* 86 (1), 92–109.
26. Denman, A.R. [et al.]. 2007. The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon – A case study in Northamptonshire, UK. *Environment International* 33 (1), 34–44.
27. Groves-Kirkby, C., Denman, A., Phillips, P., 2009. Lorenz Curve and Gini Coefficient: Novel tools for analysing seasonal variation of environmental radon gas. *Journal of Environmental Management* 90, 2480–2487.
28. Burke, Q., Murphy, P., 2011. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels. *Radiation Measurements* 46 (10), 1168–1172.
29. Hunter, N., Muirhead, C., Miles, J., 2011. Two error components model for measurement error: application to radon in homes. *Journal of Environmental Radioactivity* 102, 799–805.
30. Kozak, K. [et al.]. 2011. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. *Applied Radiation and Isotopes* 69 (10), 1459–1465.
31. Barros, N., Steck, D., Field, R., 2014. A comparison of winter short-term and annual average radon measurements in basements of a radon-prone region and evaluation of further radon testing indicators. *Health Physics* 106 (5), 535–544.
32. Barros, N., Steck, D., Field, R., 2016. Utility of short-term basement screening radon measurements to predict year-long residential radon concentration on upper floors. *Radiation Protection Dosimetry*, 171 (3) 405–413.
33. Wilson, D.L. [et al.]. 1991. Summer time elevation of Rn-222 levels in Huntsville, Alabama. *Health Physics* 60 (2), 189–197.
34. Papastefanou, C. [et al.]. 1994. Indoor radon concentrations in Greek apartment dwellings. *Health Physics* 66 (3), 270–273.
35. Pinel, J. [et al.]. 1995. Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom. *Radiation Protection Dosimetry* 58 (2), 127–132.
36. Miles, J., 1998. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data. *Health Physics* 74 (3), 370–378.
37. Vaupotic, J., Hunyadi, I., Baradacs, E., 2001. Thorough investigation of radon in a school with elevated levels. *Radiation Measurements* 34 (1-6), 477–482.
38. Steck, D. [et al.]. 2004. Indoor radon exposure uncertainties caused by temporal variation. In: 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, Spain, ISBN 84-87078-05-2.
39. Bochicchio F. [et al.]. 2005. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. *Radiation Measurements* 40 (2-6), 686–694.
40. Font, L., 2009. On radon surveys: Design and data interpretation. *Radiation Measurements* 44 (9-10), 964–968.
41. Жуковский, М.В. Радоновая безопасность зданий / М.В. Жуковский, А.В. Кружалов, В.Б. Гурвич [и др.]. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 180 с.
42. Mackinnon, A., 2000. A spreadsheet for the calculation of comprehensive statistics for the assessment of diagnostic tests and inter-rater agreement *Computers in Biology and Medicine*, 30(3), 127–134.
43. ISO/IEC Guide 98-3, 2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
44. Цапалов, А.А. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха / А.А. Цапалов, С.И. Кувшинников // АНРИ. – 2008. – № 2. – С. 37–43.
45. Цапалов, А.А. Оценка среднегодового уровня ЭРОА радона в помещениях на основе результатов краткосрочных измерений радиометром «АльфаАЭРО» / А.А. Цапалов // АНРИ. – 2008. – № 3. – С. 49–58.
46. Цапалов, А.А. Системное исследование динамики ЭРОА радона в помещениях и принципы контроля / А.А. Цапалов // АНРИ. – 2010. – № 2. – С. 2–14.
47. Цапалов, А.А. Принцип оценки среднегодовой ЭРОА радона в зданиях по результатам краткосрочных измерений / А.А. Цапалов [и др.] // Радиационная гигиена. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 23–27.
48. Цапалов, А.А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона / А.А. Цапалов // АНРИ. – 2011. – № 3(66). – С. 52–64.
49. Цапалов, А.А. Закономерности поведения радоновой радиоактивности в помещениях зданий и принцип контроля / А.А. Цапалов // Вестник МГСУ. – 2011. – Т.2, №3. – С. 15-23.
50. Цапалов, А.А., Маренный А.М. Принципы радонового контроля в помещениях зданий / А.А. Цапалов, А.М. Маренный // АНРИ. – 2014. – № 1(76). – С. 6–14.
51. Tsapalov, A., Kovler, K., 2018. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. *Journal of Environmental Radioactivity* 183, 59–72.

Поступила: 17.01.2018 г.

Цапалов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией радиационного контроля Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов. **Адрес для переписки:** 121357, Москва, ул. Вересаева, 15; E-mail: andrey-ants@yandex.ru

Киселев Сергей Михайлович – кандидат биологических наук, главный научный сотрудник Федерального медицинского биологического центра им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

Маренный Альберт Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, Москва, Россия

Ковлер Константин Леонидович – кандидат технических наук, профессор, заведующий отделом строительных материалов и технологий факультета строительства и охраны окружающей среды Национального института исследований по строительству Израильского технологического института «Технион», Хайфа, Израиль

Кувшинников Сергей Иванович – врач по радиационной гигиене лаборатории радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Для цитирования: Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М., Ковлер К.Л., Кувшинников С.И. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 1. Проблема оценки содержания радона и современный принцип контроля // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 53-63. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-53-63.

Uncertainty of the results of the radon control in housings.

Part 1. The problem of assessment of the radon concentration and modern control principles

Andrey A. Tsapalov¹, Sergey M. Kiselev², Albert M. Marennyy³, Konstantin L. Kovler⁴, Sergey I. Kuvshinnikov⁵

¹Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, Russia

²Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

³Research and Technical Center of Radiation-chemical Safety and Hygiene of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

⁴Israel Technological University «Technion», Haifa, Izrael

⁵Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

Radon control in buildings is being performed for decades in different countries of the world, including Russia. However, there is a lack of unified standard for the assessment of the uncertainty of the results of the control, considering the protocol and duration of the measurements. It is obvious that the uncertainty of the control increases with the reduction of the duration of the measurements. The lack of data on confidence interval for the average annual radon concentration in housings does not allow correct and precise comparison with the regulatory level, both for the commissioned and operated buildings. Additionally, it complicates a development of the effective method, mass control strategy and identification of buildings with high radon concentrations. A reliable method of control, considering time variations of radon and duration of exposure, was developed in Russia several years ago, but it is not well-known and not applied on practice. This paper is focused on a novel principle of radon control, based on simple criteria, widely used in metrology and complying to the modern standards. This principle introduces a new parameter – the radon time variation coefficient $K_v(t)$, which reflects main constituent of the uncertainty of the average annual radon concentration depending on the protocol and duration of the measurements. A novel algorithm for the estimation of $K_v(t)$ is proposed, developed on the base of the results of continuous annual radon monitoring in representative experimental housings. Additionally, the structure of the correcting coefficient is presented, considering an impact of the temperature on the radon behavior. The use of the corrective coefficient allows lowering the $K_v(t)$ value, but its application is limited.

Key words: Radon, volume activity, equivalent activity, time variation coefficient, corrective coefficient, regulatory level, uncertainty, confidence interval, monitoring.

Andrey A. Tsapalov

Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements. **Address for correspondence:** Veresaeva Str., 15, Moscow, 121357, Russia; E-mail: andrey-ants@yandex.ru

References

- UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations: Vol. 1, Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- Marennyy A., Savkin M., Shinkarev S., 2000. Estimation of the radon-induced dose for Russia's population: methods and results. *Radiat. Prot. Dosimetry* 90 (4), 403–408.
- Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Repin L.V., Romanovich I.K., Stepanov V.S., Titova T.N. Doses from ionizing radiation to the public of Russian Federation in 2015. Information bulletin. St-Petersburg, 2016, 73 p. (In Russian).
- WHO, 2016. Radon and health. World Health Organization. Updated June 2016. – Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/> (Accessed: January 15, 2018).
- ANSI/AARST MAH, 2014. Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes. – Available from: www.radonstandards.us (Accessed: January 16, 2018).
- IAEA, 2017. Status of radon related activities in member states participating in technical cooperation projects in Europe. International Atomic Energy Agency, Series: IAEA-TECDOC-1810, Vienna, 2017.
- EPA, 1992. A Citizens Guide to Radon. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 402-K-92-001.
- George A. The history, development and the present status of the radon measurements programme in the United States of America. *Radiation Protection Dosimetry*, 2015, 167 (1-3), 8–14.
- Marennyy A., Nefedov N., Vorozhtsov A., 1995. Results of radon concentration measurements in some regions of Russia. *Radiation Measurements* 25 (1-4), 649–653.
- Stamat I.P., Stupina V.V., Goncharova Yu.N., Pashkova A.V. Seasonal fluctuations in the summary indicators and radon concentration in the water of artesian wells. Proceedings of the international scientific-practical conference «Hygienic aspects of provision of the radiation safety of the population on the territories with in-creased levels of radiation». St-Petersburg, 2008, pp. 138-140. (In Russian).
- Marennyy A.M. Screening studies on radon concentration in housings. Proceedings of the international scientific-practical conference «Hygienic aspects of provision of the radiation safety of the population on the territories with in-creased levels of radiation». St-Petersburg, 2008, pp. 99-101. (In Russian).
- Soloviev M.Y., Kalinina M.V., Stamat I.P. Radon concentration in the air of newly built and operating buildings in the Rostov region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2010; Vol. 3, No. 2, pp. 62–66. (In Russian).
- Gubin A.T., Marennyy A.M., Sakovich V.A., Astafurov V.I., Nefedov N.A., Penezhev A.V. Survey of the territories under FMBA, Russia, supervision on the radon concentration in housings. *Meditsina ekstremalnykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*, 2012, №4 (42), pp. 77-88. (In Russian).
- Marennyy A.M., Kiselev S.M., Titov A.V., Zolotukhina S.B., Astafurov V.I., Dmitriev V.A., Zhuravleva L.A., Marennyy M.A., Nefedov N.A., Penezhev A.V., Khokhlova E.A. Survey in Krasnokamensk city on the content of indoor radon. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2013;6(3):47-52. (In Russian).
- Marennyy A.M., Romanov V.V., Astafurov V.I., Gubin A.T., Kiselev S.M., Nefedov N.A., Penezhev A.V. Survey for indoor radon in dwellings on the territories supervised by FMBA of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2015;8(1):23-29. (In Russian).
- UNSCEAR, 2006. Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Report to the General Assembly Scientific Annexes A and B (UNSCEAR 2006 Report). United Nations publication, New York (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).
- Marennyy A.M. Methodical Aspects of Measurements Average Indoor Ra-don Volume Activity Using the Integral Track Method. *ANRI = ASAP*, 2012, №4, pp. 13-19. (In Russian).
- ISO 11665-8, 2012. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings.
- EPA, 1997. National Radon Proficiency Program. Guidance on Quality Assurance. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 402-R-95-012, NAREL, Montgomery.
- IAEA, 2013. National and regional surveys of radon concentration in dwellings. IAEA/AQ/33, ISSN 2074–7659, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2013.
- IAEA, 2015. Protection of the Public against Exposure Indoors Due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. Specific Safety Guide No. SSG-32. International Atomic Energy Agency, Vienna 2015.
- Karpinska, M., Mnich, Z., Kapala, J., 2004. Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of north-eastern Poland. *Journal of Environmental Radioactivity* 77 (2), 101–109.
- Stojanovska, Z. [et al.]. 2011. Seasonal indoor radon concentration in FYR of Macedonia. *Radiation Measurements* 46 (6-7), 602–610.
- Gillmore, G.K., Phillips, P.S., Denman, A.R., 2005. The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: a case study approach. *Journal of Environmental Radioactivity* 84, 469–479.
- Groves-Kirkby, C. [et al.]. 2006. Time-integrating radon gas measurements in domestic premises: comparison of short-, medium- and long-term exposures. *Journal of Environmental Radioactivity* 86 (1), 92–109.
- Denman, A.R. [et al.]. 2007. The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon – A case study in Northamptonshire, UK. *Environment International* 33 (1), 34–44.
- Groves-Kirkby, C., Denman, A., Phillips, P., 2009. Lorenz Curve and Gini Coefficient: Novel tools for analysing seasonal variation of environmental radon gas. *J. Environ. Manag.*, Vol. 90, pp. 2480–2487.
- Burke, Q., Murphy, P., 2011. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels. *Radiat. Meas.*, 46 (10), 1168–1172.
- Hunter, N., Muirhead, C., Miles, J., 2011. Two error components model for measurement error: application to radon in homes. *J. Environ. Radioact.*, 102, 799–805.
- Kozak, K. [et al.]. 2011. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. *Appl. Radiat. Isot.* 69 (10), 1459–1465.
- Barros, N., Steck, D., Field, R., 2014. A comparison of winter short-term and annual average radon measurements in basements of a radon-prone region and evaluation of further radon testing indicators. *Health Phys.*, 106 (5), 535–544.
- Barros, N., Steck, D., Field, R., 2016. Utility of short-term basement screening radon measurements to predict year-long residential radon concentration on upper floors. *Radiat. Protect. Dosim.*, 171 (3) 405–413.
- Wilson, D.L. [et al.]. 1991. Summer time elevation of Rn-222 levels in Huntsville, Alabama. *Health Phys.* 60 (2), 189–197.
- Papastefanou, C. [et al.]. 1994. Indoor radon concentrations in Greek apartment dwellings. *Health Phys.* 66 (3), 270–273.
- Pinel, J. [et al.]. 1995. Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom. *Radiat. Protect. Dosim.*, 58 (2), 127–132.
- Miles, J., 1998. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data. *Health Phys.* 74 (3), 370–378.
- Vaupotic, J., Hunyadi, I., Baradacs, E., 2001. Thorough investigation of radon in a school with elevated levels. *Radiat. Meas.* 34 (1-6), 477–482.

38. Steck, D. [et al.]. 2004. Indoor radon exposure uncertainties caused by temporal variation. In: 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, Spain, ISBN 84-87078-05-2.
39. Bochicchio F. [et al.]. 2005. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. *Radiat. Meas.* 40 (2-6), 686–694.
40. Font, L., 2009. On radon surveys: Design and data interpretation. *Radiat. Meas.* 44 (9-10), 964–968.
41. Zhukovsky M.V., Kruzhalov A.V., Gurvich B.V. [et. al.] Radon safety of the buildings. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000, 180 p. (In Russian).
42. Mackinnon, A., 2000. A spreadsheet for the calculation of comprehensive statistics for the assessment of diagnostic tests and inter-rater agreement. *Computers in Biology and Medicine*, 30(3), 127–134.
43. ISO/IEC Guide 98-3, 2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
44. Tsapalov A.A., Kuvshinnikov S.I. Dependence of the radon volume activity in housings on the difference in inside and outside air temperatures. *ANRI = ASAP*, 2008, №2, pp. 27-43. (In Russian).
45. Tsapalov A.A. Assessment of the average annual level of radon equivalent equilibrium volume activity, based on the results of shortscale measurements using radiometer «AlphaAERO». *ANRI = ASAP*, 2008, №3, pp 49-58. (In Russian).
46. Tsapalov A.A. Systematic evaluation of the radon equivalent equilibrium volume activity dynamics in housings and control principles. *ANRI = ASAP*, 2010, №2, pp. 2-14. (In Russian).
47. Tsapalov A.A., Ermilov A.P., Gulabyan L.A., Gubin A.T., Kuvshinnikov S.I. Principle of estimation annual radon EEC in building by results of short-term measurements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2010;3(3):23-27. (In Russian).
48. Tsapalov A.A. Results of the long-scale evaluation of the trends of the behavior of radon volume activity and equivalent equilibrium volume activity in buildings in Moscow region. *ANRI = ASAP*, 2001, №3(66), pp. 52-64. (In Russian).
49. Tsapalov A.A. Trends of the behavior of radon radioactivity in housings and control principles. *Vestnik MGSU = Information bulletin of MGSU*, 2011, vol.2, №3, pp. 15-23. (In Russian).
50. Tsapalov A.A., Marennyy A.M. Principles of radon control in the housings of the building. *ANRI = ASAP*, 2014, № 1(76), pp. 6-14. (In Russian).
51. Tsapalov, A., Kovler, K., 2018. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. *Journal of Environmental Radioactivity* 183, 59–72.

Received: January 17, 2018

For correspondence: Andrey A. Tsapalov – PhD, Head of Laboratory of Radiation Control, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements (Veresaeva Str., 15, Moscow, 121357, Russia; E-mail: andrey-ants@yandex.ru)

Sergey M. Kiselev – PhD, Major Researcher of Public Radiation Protection Department, SRC Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of the FMBA of Russia, Moscow, Russia

Albert M. Marennyy – PhD, Professor, Head of Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of the FMBA of Russia, Moscow, Russia

Konstantin L. Kovler – PhD, Assoc. Professor, Head of Department of Building Materials and Technology, National Building Research Institute, Faculty of Civil and Environmental Engineering «Technion» – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Sergey I. Kuvshinnikov – Radiation Hygiene Physician of Laboratory of Radiation Control and Physical Factors, Federal Budgetary Health Care Institution «Federal Center for Hygiene and Epidemiology», Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

For citation: Tsapalov A.A., Kiselev S.M., Marennyy A.M., Kovler K.L., Kuvshinnikov S.I. Uncertainty of the results of the radon control in housings. Part 1. The problem of assessment of the radon concentration and modern control principles. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, No. 1, pp. 53-63. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-53-63.