

## Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия

А.А. Цапалов<sup>1</sup>, С.М. Киселев<sup>2</sup>, К.Л. Ковлер<sup>3</sup>, П.С. Микляев<sup>4</sup>, Т.Б. Петрова<sup>5</sup>, М.В. Жуковский<sup>6</sup>, И.В. Яρμοшенко<sup>6</sup>, А.М. Маренный<sup>7</sup>, О.Е. Тутельян<sup>8</sup>, С.И. Кувшинников<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное предприятие «ДОЗА», Зеленоград, Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

<sup>3</sup> Израильский технологический институт «Технион», Хайфа, Израиль

<sup>4</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>6</sup> Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

<sup>7</sup> Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

<sup>8</sup> Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

*В любых зданиях, включая незаселенные с ограниченной вентиляцией, наблюдаются значительные временные вариации радона. Этот факт обуславливает серьезные затруднения в проведении радиационного контроля для оценки соответствия помещений требованиям норматива, который ограничивает среднее за год содержание радона в зданиях. Поэтому ни на национальном, ни на международном уровне до сих пор не решена проблема стандартизации контроля радона в зданиях, если продолжительность теста меньше 1 года. Анализ подходов к контролю радона, включая оценку эффективности регулирования, показывает весьма существенные отличия между практиками, сложившимися в разных странах. Например, в России в основном применяются мгновенные (не более 20 мин) измерения, а мероприятия по защите существующих зданий от радона практически не проводятся. В европейских странах, как правило, применяются долгосрочные (не менее 2 месяцев) измерения, а мероприятия по защите зданий от радона проводятся все еще относительно редко, за исключением Великобритании и Швеции. В США массово применяются краткосрочные (2–7 дней) измерения, которые не только проводят, но и оплачивают сами жители, включая мероприятия по защите зданий от радона. Однако, несмотря на сложившиеся подходы к контролю радона в зданиях в России и США, существует устойчивое недоверие среди специалистов к результатам краткосрочных и тем более мгновенных измерений. В этой связи предлагается компромиссный подход для стандартизации контроля радона на основе рационального критерия за счет применения таких фундаментальных концепций ISO/IEC, как «Неопределенность измерения» и «Оценка соответствия». Рациональный критерий оценки соответствия позволяет использовать измерения разной длительности, обеспечивая заданную надежность при принятии решения. Также предлагается обоснование оптимизации контроля радона в зданиях через участие не только специалистов, но и самого населения благодаря возможности внедрения простых методов и недорогих средств измерений радона в рамках рационального критерия.*

**Ключевые слова:** радон, здания, временные вариации, нормативный уровень, стандартизация, неопределенность измерений, оценка соответствия, рациональный критерий, продолжительность измерений.

### Введение

По данным НКДАР ООН [1], вклад радона составляет 42% (или 1,26 мЗв/год) в индивидуальную дозу от всех природных и техногенных источников, равную 3,0 мЗв/год. В России вклад радона больше и составляет 46%,

что соответствует 1,99 мЗв/год при индивидуальной дозе от всех источников 4,35 мЗв/год [2]. В то же время глобальный вклад от диагностических процедур в медицине составляет не более 20%, а вклады от загрязнений, обусловленных, например, аварией в Чернобыле или произ-

**Цапалов Андрей Анатольевич**

Научно-производственное предприятие «ДОЗА»

Адрес для переписки: 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский пр., д. 5, этаж 2, комната 49;

E-mail: andrey-ants@yandex.ru

водством атомной энергии (включая добычу урана), не превышают 0,1% и 0,01% соответственно [1]. Поэтому, вопреки весьма распространенному мнению об опасности объектов атомной энергетики и медицинских процедур, основным фактором радиационного риска являются жилища и рабочие места, поскольку 80–90% времени люди проводят внутри зданий [3], где содержание радона всегда выше, чем в наружном воздухе.

В отличие от других источников, таких как космическое или терригенное (земное) излучение, воздействие радона можно регулировать, добиваясь снижения риска. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения [4], среднегодовая объемная активность (ОА) радона в помещениях не должна превышать 300 Бк/м<sup>3</sup>. Национальные нормативные уровни (НУ) отличаются по странам из-за различий в региональных уровнях радона и обычно составляют от 100 до 300 Бк/м<sup>3</sup>. Например, НУ = 300 Бк/м<sup>3</sup> в Германии, Испании, Португалии и Франции; НУ = 200 Бк/м<sup>3</sup> в Ирландии, Израиле и Швеции; НУ = 100 Бк/м<sup>3</sup> в Дании, Нидерландах и Норвегии<sup>1</sup>. В США концентрация радона в жилых помещениях ограничивается через уровень действия (action level), равный 4 пКи/л (148 Бк/м<sup>3</sup>) [5,6], который не является аналогом НУ [7]. В России нормируется среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) изотопов радона, уровень которой не должен превышать 100 (200) Бк/м<sup>3</sup> для новых зданий и 200 (400) Бк/м<sup>3</sup> для существующих зданий, согласно СанПиН 2.6.1.2523-09<sup>2</sup> (в скобках приводится эквивалент НУ в единицах ОА без учета вклада торона).

Дополнительное требование в европейском регулировании радона связано с определением радоноопасных территорий в рамках национальных планов действий по радону (radon action plan), которые должны быть реализованы в каждой стране Европейского Союза (ЕС) [8]. Считается, что измерения радона в зданиях, расположенных на радоноопасных территориях (обычно охватывающих относительно небольшую площадь страны), должны быть приоритетными, поскольку такой выборочный контроль обеспечивает более эффективное регулирование. Однако многолетний опыт, полученный в Швеции [9], а также недавнее расчетное исследование, проведенное в Германии [10], свидетельствуют о необходимости проведения измерений во всех районах страны, независимо от регионального уровня радона в зданиях. Наконец, такой же подход рекомендуется в 126 публикации МКРЗ [11]. Строго говоря, эта рекомендация не является новостью. Давно известно, что из-за логнормального распределения ОА радона в выборках зданий [12] высокие уровни радона могут обнаруживаться не только в зданиях, расположенных на радоноопасных территориях, но также «...в любом доме на любом участке земли... Измерение –

*единственный способ узнать... Концентрацию радона нельзя предсказать на основе измерений радона в штате или в районе»* [5, 6]. Это означает, что любое существующее здание является объектом потенциального риска из-за возможного повышенного облучения населения радона и поэтому должно быть обследовано.

В то же время, например, только в России насчитывается около 1 млн жилых зданий<sup>3</sup>, поэтому целесообразно создать условия для широкомасштабных (массовых) обследований и эффективной идентификации опасных зданий, обеспечивая не только достаточную точность измерений ОА радона, но и высокую надежность решений о соответствии тестируемых объектов нормативу. Для реализации столь амбициозной задачи предлагается мотивировать само население на проведение измерений радона, в том числе за счет возможности применения простых методов и недорогих средств измерений (или пробоотбора). Непрерывное в течение десятилетий аккумулирование результатов массовых измерений дает возможность более детально картировать радоноопасные территории, а также точнее оценивать коллективные риски, обусловленные радоном, включая мониторинг эффективности регулирования.

Учитывая вышесказанное, основная цель настоящего обзора заключается в анализе российской и международной практики для поиска и обоснования рационального решения, обеспечивающего эффективный и надежный массовый контроль содержания радона в зданиях.

### Проблема контроля радона

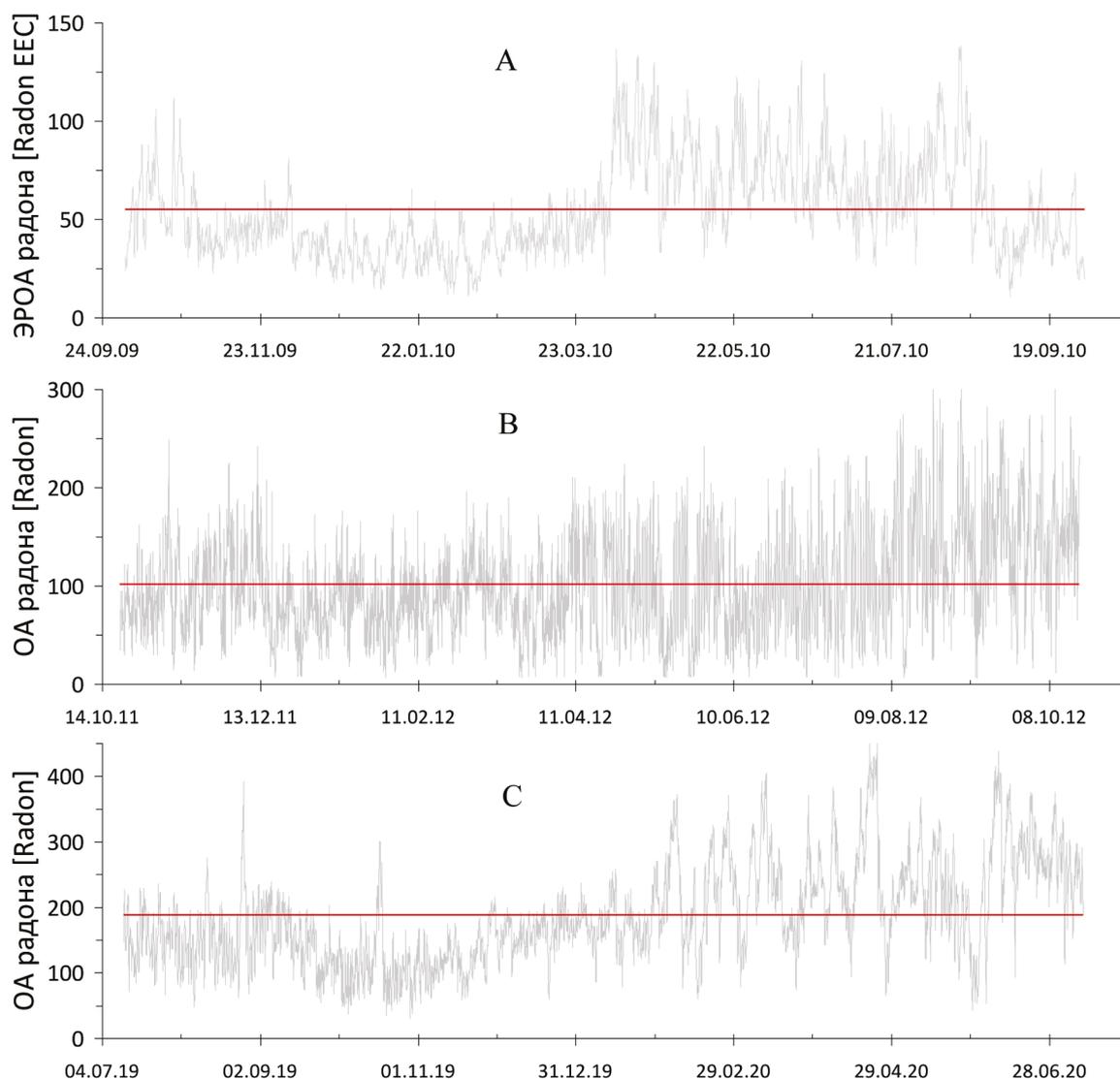
Концентрация радона, выраженная в единицах ОА или ЭРОА, в любом помещении жилого, общественного или производственного здания подвержена значительным временным колебаниям [7, 13, 14, 15], даже при постоянно закрытых окнах и дверях, как видно на рисунке 1. Важно уточнить, что после закрытия дверей и окон ОА радона в зданиях может неконтролируемо изменяться (увеличиваться или даже уменьшаться) со снижением амплитуды временных колебаний лишь в 1,5–2,0 раза в среднем [7, 14, 15, 16]. В любом случае, независимо от режима вентиляции в помещениях и здании, всегда наблюдаются значительные временные вариации радона. На рисунке 1 специально приводится несколько типичных примеров вариаций ОА и ЭРОА радона в постоянно закрытых помещениях в течение 1 года, чтобы ориентировочно представлять размах отклонений результатов измерений с интервалом интегрирования 3 ч от среднегодового уровня.

Полезно также обсудить одно исключение из правил. Например, в Израиле во многих зданиях предусмотрены специальные герметичные комнаты для убежища в случае ракетной или газовой атаки. В таких убежищах толь-

<sup>1</sup> WHO, National Radon Reference Levels, Data by Country, <https://apps.who.int/gho/data/view.main.RADON03v> [Accessed 29 May 2023]

<sup>2</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534 [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.)]

<sup>3</sup> Информационный портал о жилом фонде в РФ [Information portal about the housing stock in Russia], <https://dom.mingkh.ru/> (Дата обращения: 29.05.2023)



**Рис. 1.** Примеры вариаций ОА и ЭРОА радона ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ), измеренные с интервалом интегрирования 3 ч, по сравнению со среднегодовым уровнем (красная линия) в постоянно закрытых помещениях с естественной вентиляцией и следующими характеристиками: А – архив, крайне редко посещаемое помещение без окон, расположенное в подвале многоэтажного здания Федерального центра Роспотребнадзора (в Москве) [14]; В – спальня с маленькими окнами в одноэтажном деревенском доме старой постройки из кирпича (в Рязанской области), который отапливался, но не использовался для проживания [14]; С – редко посещаемая подвальная комната с маленькими окнами, на уровне цоколя в трехэтажном жилом частном доме (в Израиле) [7]

**Fig. 1.** Examples of variations in concentration and EEC of radon ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ), measured with an integration interval of 3 hours, compared with the annual average level (red line) in permanently closed rooms with natural ventilation and the following characteristics: A is the extremely rarely visited room (archive) without windows, located in the basement of a multi-storey building of the Federal Center of Hygiene and Epidemiology (in Moscow) [14]; B is the bedroom with small windows in a one-story dwelling of an old brick building (in the Ryazan region, Russia), which was heated but not used for living [14]; C is the rarely visited room with small windows, at basement level in a three-story dwelling (in Israel) [7]

ко строительный материал ограждений может служить источником радона, который накапливается без существенных колебаний во времени, если комната постоянно закрыта [17]. Однако в таких необычных условиях (при экстремально ограниченной или отсутствующей вентиляции) люди не могут находиться длительное время.

Вследствие столь вариабельного и сложно предсказуемого поведения радона во времени до сих пор отсутствует согласованная на международном уровне позиция к пониманию того, насколько результаты измерений в течение нескольких дней или месяцев (т.е. менее 1 года) отличаются от среднегодовых уровней ОА или ЭРОА ра-

дона и как сравнивать результаты таких измерений с НУ. В связи с этим возникает принципиальный вопрос контроля, как принять надежное решение о соответствии помещения установленным нормативам, если длительность измерений менее 1 года. В то же время очевидно, что результат мгновенного измерения (длительностью несколько минут или часов) нельзя применять для оценки соответствия из-за крайне высокой неопределенности амплитуды колебаний радона, согласно рисунку 1. Также очевидно, что чем дольше измерение, тем меньше неопределенность (или доверительный интервал) оценки среднегодового уровня и, соответственно, выше надеж-

ность оценки соответствия нормативу. Действительно, с увеличением продолжительности контроля временные колебания измеренной ОА или ЭРОА радона будут снижаться, приближаясь к среднегодовому значению [16, 18]. Однако, несмотря на снижение точности в оценке среднегодового уровня, измерения в течение нескольких месяцев и тем более целого года проводятся гораздо реже, чем краткосрочные (2–7 суток). Данное противоречие, связанное с проблемой контроля, все еще не имеет согласованного рационального решения и выражается, например, в принципиально разных практиках контроля радона в ЕС и США.

#### Подходы к контролю радона в разных странах и их эффективность

**В России** относительно интенсивные измерения радона стали проводиться после принятия НРБ-96<sup>4</sup>, когда в отечественных Нормах радиационной безопасности впервые было введено ограничение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в зданиях. Через 2 года были введены в действие методические указания по обследованию жилых и общественных зданий – МУ 2.6.1.715-98<sup>5</sup>, в которых впервые был предложен критерий оценки соответствия тестируемого помещения требованиям норматива, учитывающий временные вариации радона. Суть критерия заключалась в сравнении НУ с верхней границей доверительного интервала среднегодовой ЭРОА, которая оценивалась по результату измерения ЭРОА или ОА радона с учетом значения коэффициента вариации, зависящего от продолжительности измерений. К сожалению, в МУ 2.6.1.715-98 не раскрывался способ определения коэффициента вариации, а также допускалось проведение мгновенных измерений.

Предложенный в МУ 2.6.1.715-98 критерий после небольшого преобразования (без изменения сути) и удаления «торонового» слагаемого принимает следующий, более удобный для анализа вид:

$$C_{\text{Э}} \cdot [1 + U_{\text{И}}] \cdot V_{Rn}(t) < C_{\text{НУ}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{Э}}$  – измеренная ЭРОА радона (или ОА радона, умноженная на 0,5);

$C_{\text{НУ}}$  – нормативный уровень в единицах ЭРОА;

$U_{\text{И}}$  – основная погрешность измерения, принимаемая по свидетельству о поверке средства измерений, или инструментальная неопределенность в современной терминологии;

$V_{Rn}(t)$  – коэффициент временных вариаций радона, значения которого указаны в таблице 1 (в МУ 2.6.1.715-98 этот коэффициент назван «коэффициентом вариации», что не вполне корректно в рамках математической терминологии).

Через 13 лет взамен МУ 2.6.1.715-98 были введены в действие МУ 2.6.1.2838-11<sup>6</sup>, в которых значения  $V_{Rn}(t)$  существенно ниже и не зависят от продолжительности измерений, а также отличаются более слабой зависимостью от сезона измерений, согласно таблице 1. К сожалению, в МУ 2.6.1.2838-11 тоже не представлены ни алгоритм определения коэффициента  $V_{Rn}(t)$ , ни обоснование столь радикального изменения его значений. В то же время указанные в таблице 1 значения (1,0 и 1,3) действуют «до получения функциональной зависимости» коэффициента временных вариаций радона, как сообщается в п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11. В этой связи были проведены специальные исследования [19–24], результаты которых были обобщены и выражены в МУ 2.6.1.037-2015<sup>7</sup> с целью уточнения значений коэффициента и структуры формулы критерия соответствия. Уточненный критерий удобнее показать здесь в следующем виде, не включая «тороновую» компоненту:

$$C_{\text{Э}} \cdot \left[ 1 + \sqrt{K_V(t)^2 + U_{\text{И}}^2} \right] < C_{\text{НУ}}. \quad (2)$$

В отличие от ранее выпущенных методических указаний, алгоритм определения значений коэффициента временных вариаций радона  $K_V(t)$  приводится в МУ 2.6.1.037-2015.

Уточнение структуры критерия было обусловлено необходимостью следовать фундаментальным концепциям ISO/IEC [25–27], которые определяют правила выраже-

<sup>4</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-96): Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054-96. Утверждены Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 19.04.1996 г. № 7, отменены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 02.07.1999 г. № 6/н [Norms of radiation safety (NRB-96). Hygienic norms 2.6.1.054-96. Approved by the resolution of the State committee for sanitary and epidemiological surveillance of the Russian Federation of 19.04.1996 No. 7, cancelled by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 02.07.1999. (In Russ.)].

<sup>5</sup> Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий : методические указания МУ 2.6.1.715-98. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 24.08.1998 г., отменены с 28.02.2011 г. с введением в действие МУ 2.6.1.2838-11 [Carrying out radiation-hygienic examination of residential and public buildings. Guidelines MU 2.6.1.715-98. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 24.08.1998, cancelled from 28.02.2011 with the entry into force of MU 2.6.1.2838-11. (In Russ.)].

<sup>6</sup> 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. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011 г. (далее – МУ 2.6.1.2838-11) [Radiation control and sanitary and epidemiological assessment of residential, public and industrial buildings and facilities after their construction, overhaul, reconstruction according to radiation safety indicators. Guidelines MU 2.6.1.2838-11. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 28.01.2011 (hereinafter – MU 2.6.1.2838-11). (In Russ.)].

<sup>7</sup> Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности : методические указания МУ 2.6.1.037-2015. Утверждены и введены в действие Федеральным медико-биологическим агентством 14.05.2015 г. [Determination of the average annual EEC of radon isotopes in indoor air based on the results of measurements of different durations. Guidelines MU 2.6.1.037-2015. Approved and put in force by the Federal Medical and Biological Agency on 14.05.2015. (In Russ.)].

Значения коэффициента временных вариаций радона в разных методических указаниях

Таблица 1

## The coefficient of temporal variations of indoor radon from different guidelines

[Table 1]

МУ 2.6.1.* [Guidelines 2.6.1.*]	Сезон [Season]	Продолжительность измерений [Measurement duration]			
		< 1 ч [< 1 hour]	1–3 сут [1–3 days]	1–2 недели [1–2 weeks]	1–3 месяца [1–3 months]
715-98	Теплый [Warm]	3,0	2,3	1,8	1,5
	Холодный [Cold]	1,5	1,1	0,95	0,75
2838-11	Теплый [Warm]			1,3	
	Холодный [Cold]			1,0	
037-2015 <sup>a</sup>	Любой (с учетом T <sup>b</sup> ) [Any season (considering T <sup>b</sup> )]	2,8	2,2 – 1,9	1,8	–
	Любой (без учета T <sup>b</sup> ) [Any season (without T <sup>b</sup> )]	3,5	3,0 – 2,7	2,4	1,5 – 1,2

<sup>a</sup> Значения коэффициента преобразованы для удобства сравнения (см. текст статьи) [the coefficient values are converted for ease of comparison (see the text of the article)].

<sup>b</sup> Символ «Т» означает температурное влияние, учет которого автоматически вводит сезонную поправку [the symbol “T” means a quantitative account of the temperature influence by a certain seasonal correction].

ния неопределенности измерений и оценивания соответствия нормативу. Эти концепции касаются выражения не только неопределенности результата прямого измерения, но и любой расчетной величины, включая среднегодовой уровень радона. В этой связи оба члена под корнем в (2) следует рассматривать как независимые компоненты суммарной неопределенности среднегодовой ЭРОА (или ОА) радона.

Связь между коэффициентами в (1) и (2) определяется достаточно просто, если принять  $U_{ii} = 0$ , тогда

$$V_{Rn}(t) = 1 + K_V(t). \quad (3)$$

Используя (3), значения коэффициента временных вариаций в МУ 2.6.1.037-2015 были преобразованы для возможности их сравнения со значениями, представленными в предыдущих методических документах, – МУ 2.6.1.715-98 и МУ 2.6.1.2838-11 (см. табл. 1). Сопоставление данных таблицы 1 свидетельствует о том, что в МУ 2.6.1.2838-11 существенно занижена роль временных вариаций радона, а также отсутствует разница в надежности оценки соответствия нормативу по результатам краткосрочных и долгосрочных измерений, поскольку значения коэффициента постоянны. Тем не менее, МУ 2.6.1.2838-11 действуют до сих пор и являются более распространенным документом среди специалистов, чем МУ 2.6.1.037-2015.

Измерения радона в зданиях проводятся различными аккредитованными лабораториями с целью обеспечения норм радиационной безопасности. Однако декларируемая цель не достигается, поскольку фактическая польза от таких измерений заключается лишь в мониторинге доз

облучения населения в рамках статистической отчетности, а не идентификации зданий для устранения опасности и снижения риска, хотя именно это является главной задачей регулирования. Действительно, несмотря на проводящиеся уже более 20 лет измерения в зданиях субъектов Российской Федерации и периодически регистрируемые весьма высокие значения как ОА, так и ЭРОА радона [28], мероприятия по защите существующих зданий от радона (МЗР) практически не проводятся. По крайней мере, такой учет отсутствует.

Всего в России проведено около 800 тыс. измерений ОА и ЭРОА радона в зданиях [29] в подавляющем большинстве на основе мгновенных (не более 20 мин) тестов. Для более точной оценки среднегодовых значений было проведено еще около 60 тыс. долгосрочных измерений ОА радона, продолжительностью не менее 2 месяцев (иногда дважды в разные сезоны в одном помещении). Часть результатов долгосрочных измерений (не менее 23 тыс.) содержится в Федеральной базе данных Научно-исследовательского института радиационной гигиены (ФБУН НИИРГ). Другая часть содержится в базе данных «Радон» под управлением Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены (ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России), специалистами которого разработана интерактивная радоновая карта с возможностью масштабирования от страны до отдельных зданий, которые расположены почти в 100 населенных пунктах в 28 регионах и 26 ЗАТО Российской Федерации [30]. Ранее на основе более обширных данных 4-ДОЗ была построена радоновая карта России [31] с ранжированием диапазонов ОА радона в зданиях по субъектам

Российской Федерации, что является пока очень слабой пространственной детализацией (при желательном разрешении хотя бы 10×10 км).

К сожалению, в России все еще не создан механизм мотивации местных властей, а также самих жителей и заинтересованных представителей бизнеса (владельцев зданий, риэлторов, специалистов по вентиляции и кондиционированию и т.п.) в проведении массовых измерений радона для выявления опасных зданий и МЗР на коммерческой основе. Кроме того, из-за использования мгновенных (экспрессных) измерений в сочетании с весьма заниженной ролью временных вариаций радона применение МУ 2.6.1.2838-11 явно не обеспечивает надежность контроля радона в зданиях, а длительное использование такой практики приводит к стагнации регулирования радона в стране.

**В Европе** массовые измерения радона начали проводиться в Швеции и Великобритании ориентировочно с 1990-х гг. [40] и постепенно охватили другие страны ЕС. В каждой стране ЕС были введены соответствующие НУ (100, 200 или 300 Бк/м<sup>3</sup>), ограничивающие среднегодовую ОА радона в зданиях, как сообщалось выше. Однако в течение прошедших десятилетий европейскому сообществу так и не удалось создать рациональный механизм контроля радона в зданиях, опирающийся на четкий количественный критерий оценки соответствия с заданной надежностью. Например, в исследовании [16] показано, что в современном международном регулировании роль временных вариаций радона занижена в несколько раз. Тем не менее, постепенно сформировался консенсус в том, что для надежной идентификации опасных зданий продолжительность измерений должна быть не менее 2 месяцев, согласно ISO 11665-8:2019 [32], что выглядит весьма неопределенным с точки зрения стандартизации [16]. Также предполагается, что для построения Европейского Атласа<sup>8</sup> ОА радона в зданиях должны использоваться только результаты долгосрочных измерений. Однако для построения радоновой карты, а также оценки коллективных рисков могут использоваться результаты измерений любой длительности, как было показано в недавнем исследовании [33].

Таким образом, критерий оценки соответствия европейских зданий требованиям радоновой безопасности выражается весьма примитивно – результат долгосрочного измерения (продолжительностью не менее 2 месяцев) с учетом инструментальной неопределенности не должен превышать НУ, иначе необходимо проведение МЗР. Временная неопределенность не упоминается, поскольку ошибочно считается, что временные вариации радона не играют роли при оценке соответствия нормативу на основе долгосрочных измерений.

По нашему мнению, в европейском сообществе явно наблюдается нарушение в расстановке приоритетов, как в подходах к контролю радона в зданиях, так и в организации исследований для нужд стандартизации измерений [33], если судить по результатам недавно

завершившегося европейского метрологического проекта MetroRADON (<http://metroradon.eu>), а также не вполне адекватной постановке задач по изучению пространственно-временных вариаций радона в рамках текущего проекта RadoNorm (<https://www.radonorm.eu>). Действительно результаты ни одного из многочисленных исследований пространственно-временных вариаций, включая вышеупомянутые проекты [16, 33], практически не используются (не актуальны) в качестве количественных критериев, например, в международном стандарте ISO 11665-8:2019 [32], который регламентирует контроль радона в зданиях.

Согласно [31], до сих пор проведено не более 2 млн измерений, из них более 1 млн приходится только на Швецию и Великобританию вместе. В другом источнике [34] сообщается о примерно 1,2 млн измерений в странах ЕС. В любом случае проведенные измерения охватывают менее 1% зданий в Европе, согласно отчету МАГАТЭ за 2019 г. [35]. Соответственно, МЗР были проведены не более чем в 50 тыс. зданий (в основном в Швеции и Великобритании), если ориентироваться на этот источник информации [36], поскольку сложно найти более точные данные из-за отсутствия системы учета зданий в ЕС, в которых проводились МЗР. Хотя количество МЗР кажется достаточно большим, но такой объем мероприятий практически не влияет на снижение коллективного риска в Европе, обусловленного воздействием радона. Поэтому европейскую практику регулирования радона тоже нельзя считать эффективной.

По нашему мнению, одним из основных тормозящих факторов в европейском регулировании радона является неэффективный протокол измерений, когда не предусмотрен скрининг с использованием более коротких измерений (несколько дней). Этот факт также препятствует более широкому участию населения в обследовании собственных жилищ. Кроме того, механизм мотивации в проведении массовых тестов и МЗР на коммерческой основе тоже пока очень слабо развит, за исключением Великобритании и Швеции.

**В США** массовые измерения радона в зданиях начали проводиться в начале 1990-х гг. В отличие от Европы и России, американские коллеги, согласно опросу 1990 г. [37], сразу ориентировались на предпочтения жителей, 90% которых согласилось оплачивать и проводить краткосрочные измерения вместо долгосрочных тестов. По этой причине жители, собственники зданий, риэлторы и другие заинтересованные лица с каждым годом все активнее участвуют в проведении коммерческих тестов и МЗР. В этой связи американский протокол измерений является наиболее эффективным, поскольку предусматривает скрининг в виде краткосрочных измерений от 2 до 7 дней (преимущественно на основе угольного метода). Критерий оценки соответствия формулируется следующим образом – если уровень действия (148 Бк/м<sup>3</sup>) превышен, то должны проводиться повторные или более длительные измерения; если результаты измерений второго

<sup>8</sup> Мониторинг радиоактивности окружающей среды. Объединенный исследовательский центр Европейской Комиссии [Radioactivity Environmental Monitoring. Joint Research Centre EC], <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration> (Дата обращения: 29.05.2023)

раунда тоже превышают уровень действия, тогда должны проводиться МЗР [5, 6].

Такой подход и развитие конкуренции между компаниями, выполняющими измерения и МЗР, а также информирование населения и своевременное усовершенствование законодательства способствовали быстрому росту индустрии регулирования радона в США. Например, уже к 2015 г. было протестировано более 23 млн зданий, из которых 1,2 млн успешно прошли реализацию МЗР [38]. Согласно плану действий США по борьбе с радоном<sup>9</sup>, к 2020 г. МЗР были проведены в 3,8 млн зданий, а к 2025 г. планируется увеличить охват таких зданий до 8 млн. Если использовать соотношение выше (измерения/МЗР), то к 2025 г. общее количество протестированных американских зданий (апартаментов) приблизится (или превысит) к 160 млн!!! Такое количество измерений и МЗР реально снижает риск от радона в США, причем это достигается без особых затрат из национального и местных бюджетов. Более того, благодаря огромному массиву краткосрочных измерений концентрации радона в зданиях (расположенных по всей стране), уже к 2000 г. была построена Радоновая карта США<sup>10</sup> с достаточно высокой пространственной детализацией внутри каждого штата.

Однако, несмотря на очевидные преимущества американского регулирования, существует устойчивое недоверие европейского сообщества к результатам краткосрочных измерений [33]. Действительно недостатком американского подхода (как и европейского) является отсутствие строгого обоснования применяемого критерия оценки соответствия, который должен обеспечивать высокую надежность. Оба подхода до сих пор игнорируют фундаментальные концепции ISO/IEC [25–27], которые являются основой международной стандартизации. Применение этих концепций, например, в американском регулировании позволило бы существенно снизить расходы на обеспечение качества измерений. В этой связи в следующем разделе обсуждается применение концепций ISO/IEC, которые позволяют предложить рациональный и гармоничный критерий оценки соответствия, вполне охватывающий отличающиеся национальные традиции в регулировании радона.

### Рациональный критерий оценки соответствия

Принципиальные отличия практики контроля радона в США, Европе и России существенно усложняют разработку согласованного международного стандарта, поэтому ни первую версию – ISO 11665-8:2012, ни вторую версию – ISO 11665-8:2019 [32] нельзя считать выражением компромиссного решения на международном уровне [16, 33]. Протоколы измерений в США и ЕС не учитывают временную (ключевую) компоненту неопределенности, что неприемлемо в рамках современной стандартизации измерений, поскольку отсутствует возможность контроля надежности принятия решений с учетом продолжительности измерений [16]. Поэтому подходы в США и Европе не являются рациональными, в отличие от подхода в России,

если ориентироваться на принципы оценки соответствия, предложенные в МУ 2.6.1.715 и МУ 2.6.1.037-2015.

Контроль при оценке соответствия помещения нормативу является рациональным [16], если учитываются все значимые источники неопределенности при принятии решения [25, 26]. Признаком рационального контроля служит возможность управления компромиссом между его стоимостью (продолжительность контроля, цена детекторов и их обслуживания, логистика и т.п.) и надежностью решения через оценивание: ложноположительной ошибки, или «ложной отбраковки» [27] – когда принято решение о превышении НУ, но на самом деле опасности нет, а также ложноотрицательной ошибки, или «ложной приемки» [27] – когда принято решение о непревышении НУ, но на самом деле опасность есть. Таким образом, соблюдение правил международной стандартизации в рамках таких фундаментальных концепций ISO/IEC, как «Неопределенность измерения» (measurement uncertainty) [25, 26] и «Оценка соответствия» (conformity assessment) [27], является основой для внедрения рациональной практики контроля радона в зданиях и гармоничного регулирования с учетом сложившихся традиций в разных странах.

На основе концепций ISO/IEC, а также ранее накопленного опыта и результатов тематических исследований [18–23] постепенно в России формировался критерий оценки соответствия с участием авторов этой статьи. Впервые критерий оценки, отвечающий правилам ISO/IEC, был опубликован в 2014 г. [24] для информирования заинтересованных коллег и сбора замечаний до ввода в действие МУ 2.6.1.037-2015. Однако, обладая более глубокими знаниями и опытом на сегодняшний день, можно утверждать, что предложенный в МУ 2.6.1.037-2015 критерий и связанные с ним процедуры контроля, безусловно, являются прогрессивными, но и имеют существенные недостатки, например:

- следуя традиции, допускаются мгновенные измерения, которые не обеспечивают надежность контроля, кроме этого, не вполне адекватно именуется как краткосрочные;
  - нормативный уровень традиционно снова задан в единицах ЭРОА, вместо ОА, что не соответствует мировой практике;
  - необоснованное усложнение критерия оценки соответствия из-за традиционного учета ЭРОА торона, вероятность обнаружения значимых уровней которого очень мала;
  - недостаточно совершенный алгоритм определения коэффициента (неопределенности) временных вариаций радона и небольшой объем статистических данных;
  - ошибочное внедрение учета температурного влияния, следуя традиционно сложившимся представлениям о возможности более точного прогноза среднегодового уровня с помощью сезонной поправки.
- Как уже обсуждалось в предыдущих разделах, мгновенные измерения, длительность которых обычно со-

<sup>9</sup> Национальная радоновая стратегия в США на 2021–2025 годы [The US National Radon Action Plan 2021–2025], <http://www.radonleaders.org/sites/default/files/2022-01/NRAP-2021-2025-Action-Plan-508.pdf> (Дата обращения: 29.05.2023)

<sup>10</sup> Национальный центр публикаций об окружающей среде в США [National Service Center for Environmental Publications (NSCEP)], <https://nepis.epa.gov/Exec/ZipURL.cgi?Dockey=P100W9GR.txt> (Дата обращения: 29.05.2023)

ставляет несколько минут (но не более нескольких часов), кроме России и нескольких стран СНГ, не применяются в других странах мира при контроле радона в зданиях. Это объясняется слишком большой и неконтролируемой неопределенностью оценки среднегодового уровня по результатам мгновенных измерений (см. рис. 1). Очевидно, что применение мгновенных измерений существенно снижает стоимость контроля благодаря экономии времени и транспортных расходов, поскольку специалисту не требуется посещать тестируемый объект повторно, но также очевидно, что не обеспечивается качество контроля. Более того, в этом случае сложнее исключить небрежность или умышленное нарушение процедуры контроля (например, интенсивное проветривание помещений до начала или во время инспекции), приводящее к увеличению решений «ложной приемки» при оценке соответствия. Действительно вероятность исключения влияния подобного «человеческого фактора» возрастает с увеличением продолжительности измерений, хотя бы начиная от 2 суток, согласно американской практике контроля. Важно снова подчеркнуть, что длительная практика контроля на основе мгновенных измерений, явно не обеспечивающих его надежность, приводит к стагнации всей системы регулирования радона в стране.

В связи с исключением мгновенных измерений возрастает актуальность пересмотра формата нормативного уровня в России, который целесообразно выражать в единицах ОА, как это принято во всех других странах мира. Действительно измерять ЭРОА в течение даже нескольких суток значительно сложнее, чем ОА радона. Ведь при измерениях ОА радона потребление энергии значительно ниже, а также не требуется периодической замены фильтра, как и профилактики системы принудительного пробоотбора, которая к тому же создает шум, мешающий жильцам или рабочему персоналу.

Другим предложением, идущим вразрез сложившейся в России формальной традиции, является отмена контроля ЭРОА торона при оценке соответствия помещения нормативу. Во-первых, в США и странах ЕС измерения ОА, а тем более ЭРОА торона проводятся крайне редко (обычно в рамках тематических исследований), поскольку отсутствует соответствующий норматив. Во-вторых, ни в Европе, включая Россию, ни в США не было зарегистрировано до сих пор (в течение почти 30 лет) повышенных значений ЭРОА торона в зданиях, хотя бы на уровне  $5 \text{ Бк/м}^3$  (глобальный диапазон оценивается  $0,04\text{--}2 \text{ Бк/м}^3$  при среднем около  $0,3 \text{ Бк/м}^3$  [39]). Иногда встречаются сообщения об очень высокой ОА торона, например, на уровне  $1000\text{--}2000 \text{ Бк/м}^3$  [60], однако уровни ЭРОА торона остаются незначительными, поскольку отсутствует связь между этими параметрами [39], в отличие от вполне определенной связи между ОА радона-222 и его ЭРОА, выражаемой величиной фактора равновесия при наиболее вероятном значении  $0,4\text{--}0,5$  [14, 39]. В-третьих, проблема значимых уровней ЭРОА торона в зданиях приурочена исключительно к известным территориям, например, на побережьях Индии и Бразилии, а также Азовского моря с аномально высоким содержанием тория в монацитовых песках, выходящих на поверхность. На других территориях залежи ториевых руд не выходят на поверхность. Также «тороновая проблема» касалась нескольких провинций в Китае, где люди проживали не в зданиях, а в земляных

сооружениях. Таким образом, проблема значимых уровней ЭРОА торона в зданиях встречается крайне редко, тем более достаточно хорошо известны территории, для которых актуальна эта проблема. Кроме того, временные вариации ЭРОА торона в зданиях вообще не изучены. Поэтому пока преждевременно регламентировать измерения ЭРОА торона в зданиях в качестве рутинного контроля на национальном уровне.

Как сообщалось выше, действительно алгоритм, предложенный в МУ 2.6.1.037-2015 для определения коэффициента временных вариаций радона  $K_V(t)$ , весьма далек от совершенства. Этот алгоритм основан на оценке максимальных относительных отклонений измеренных ОА и ЭРОА радона от среднегодовых значений в зависимости от продолжительности измерений, а также режима эксплуатации и вентиляции экспериментальных комнат. Анализ проводился отдельно по каждой комнате, которые разделялись на 3 группы в зависимости от характера вентиляции, – стабильная, плавно изменяющаяся и нестабильная. Поскольку экспериментальных комнат было всего 10, на каждую из групп приходилось совсем небольшое количество годовых непрерывных измерений ОА и ЭРОА радона с периодом регистрации 3 ч, что не обеспечивало статистическую надежность оценок. Например, поэтому ради обеспечения надежности оценок при недостаточной мощности статистических данных, были намеренно завышены значения  $K_V(t)$ , которые после преобразования по формуле (3) приводятся в самой нижней строке таблицы 1 (без учета температурного влияния). В более поздних публикациях [13, 14] значения коэффициента снизились в отношении краткосрочных измерений, но при этом  $K_V(t)$  увеличился для мгновенных и долгосрочных измерений. При дальнейшем сравнении следует учитывать, что в таблице 1 приводятся преобразованные значения  $K_V(t)$ , тем более относящиеся к измерениям ЭРОА радона.

Уточнение коэффициента  $K_V(t)$ , выражающего неопределенность временных вариаций радона, стало возможным благодаря более эффективному преобразованию исходных результатов годовых рядов непрерывных измерений с периодом регистрации 3 ч во временные ряды с большим периодом (или продолжительностью) измерений, что позволило увеличить объем статистических данных в анализируемых массивах. Впоследствии статистическая мощность исследования временных вариаций радона была значительно умножена благодаря включению 12 новых непрерывных годовых измерений, проведенных в Израиле [7], а также дополнительным усилиям по усовершенствованию алгоритма преобразования исходных данных годовых рядов непрерывных измерений, включая усовершенствованный подход обработки статистических массивов в совокупности [16], а не отдельно по каждой экспериментальной комнате.

Возвращаясь к таблице 1, кажется, что учет температурного влияния позволяет существенно снизить коэффициент (или неопределенность) временных вариаций радона. Однако следует признать, что закономерное влияние температуры было получено на крайне ограниченном экспериментальном материале, охватывающем всего несколько комнат с относительно стабильным воздухообменом. Более того, хорошо известно, что сезонная вариация радона в зданиях не подчиняется строгому правилу. Действительно, скорее всего, в большинстве зданий ОА радона в зимний период выше, чем летом [39–45]. Однако в остальной тре-

ти или даже другой половине зданий может наблюдаться как противоположная закономерность, так и отсутствие сезонной закономерности [7, 14, 46–52]. Поэтому учет температурного или сезонного влияния, вполне оправданно применяемый для уточнения коллективных рисков, нельзя использовать в принципе для уточнения индивидуального риска, а также в качестве критерия оценки соответствия. По крайней мере, польза при оценке соответствия от учета влияния какого-либо фактора (например, геологии, климата, назначения и этажности здания, режима эксплуатации помещения и самого здания, характера вентиляции и отопления, поведения жителей или персонала и т.п.) должна доказываться при поддержке удовлетворительного статистического материала в виде результатов непрерывных годовых измерений ОА радона в большом количестве зданий. Ожидаемая польза от учета влияния того или иного фактора или их совокупности может быть выражена в снижении коэффициента (неопределенности) временных вариаций радона. Если снижения неопределенности при оценке соответствия не достигается, то учет влияния исследуемого фактора на поведение радона не имеет смысла.

Опираясь на соображения выше, рациональный критерий для оценки соответствия помещения нормативу, обеспечивающий заданную надежность принятия решений (обычно не менее 95%, что гарантирует не более 5% решений «ложной приемки») в случае как краткосрочных, так и долгосрочных тестов, выражается следующим образом [16]:

$$C(t) \cdot \left[ 1 + \sqrt{U_V(t)^2 + U_H^2} \right] < C_{HY}, \quad (4)$$

где  $C(t)$  – ОА радона (или ЭРОА, умноженная на 2), измеренная за период  $t$ , продолжительность которого должна быть не менее 2 суток, Бк/м<sup>3</sup>;

$C_{HY}$  – нормативный уровень, ограничивающий среднегодовую ОА радона в зданиях, Бк/м<sup>3</sup>;

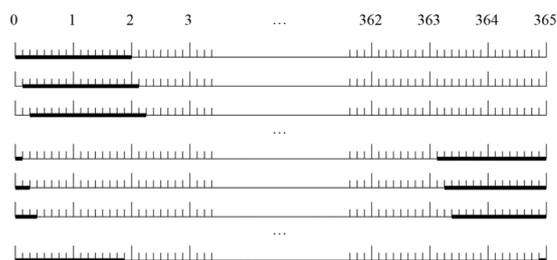
$U_H$  – относительная инструментальная неопределенность (с коэффициентом охвата 2), которая учитывает все основные источники неопределенности (в основном случайную и систематическую или калибровочную компоненты), связанные с процедурой измерения ОА (или ЭРОА) независимо от происхождения и поведения радона во времени и пространстве (более детальная информация приводится в последнем разделе);

$U_V(t)$  – относительная неопределенность поведения радона во времени или временная неопределенность радона в зданиях определяется как значение 95-й перцентили в распределении всех относительных отклонений  $D_{ij}(t)$  между измеренными значениями среднегодовой ОА радона и  $C_{ij}(t)$ :  $D_{ij}(t) = C_j^{cr} / C_{ij}(t) - 1$  ( $i=1...M$ ;  $j=1...N$ ), в представительной выборке из  $N$  зданий (помещений). В каждом из  $N$  зданий (помещений) проводится мониторинг – непрерывные измерения ОА радона с интервалом регистрации (интегрирования) 1 или 3 ч в течение 1 года ( $M=8760$  или 2920 соответственно), что обеспечивает хорошую статистику данных среди массивов  $D_{ij}(t)$  для любой продолжительности измерений  $t$ .

Алгоритм определения  $U_V(t)$  более детально обсуждается в [16]. Здесь подробнее обсудим оригинальный метод преобразования исходных данных мониторинга, позволяющий создавать мощные массивы статистиче-

ских данных [16]. Итак,  $C_i(t)$  представляет собой набор преобразованных массивов данных исходного мониторинга в одном и том же помещении, которые отличаются интервалом интегрирования  $t$ , например, от 2 суток до 11 месяцев. Каждый из новых массивов включает такое же количество данных ( $i=1...M$ ), как исходный ряд мониторинга. В качестве примера возьмем исходный годовой ряд данных мониторинга с интервалом регистрации (интегрирования) 3 ч ( $M = 365 \times 24 / 3 = 2920$ ), который преобразуем в мониторинг с интервалом интегрирования 2 сут, получая дополнительный массив данных  $C_i(t=2 \text{ сут})$ . Пример схемы такого преобразования через «скользящее среднее» со сдвигом 3 ч приводится на рисунке 2.

Таким образом, только один исходный годовой ряд непрерывных измерений (мониторинга) позволяет полу-



**Рис. 2.** Схема преобразования данных исходного годового мониторинга с интервалом регистрации (интегрирования) 3 ч в годовой ряд данных с интервалом интегрирования 2 сут (жирные отрезки)

**[Fig 2.]** The scheme for converting the initial annual monitoring with a registration (integration) interval of 3 hours into monitoring with the integration interval of 2 days (bold segments)]

чить обширные массивы значений  $D_i(t)$ , суммарное количество которых  $L$  определяется по формуле:

$$L = M \cdot I, \quad (5)$$

где  $M$  – количество данных в исходном ряду мониторинга;

$I$  – количество преобразованных рядов данных (новых массивов) с отличающимся интервалом интегрирования.

Традиционно внимание международного метрологического сообщества фокусировалось на изучении и верификации только инструментальной неопределенности  $U_H$  (в частности, точности калибровки средств измерений), в то время как временная (ключевая) неопределенность  $U_V(t)$  не изучалась вследствие ее подмены такими суррогатными параметрами, как сезонный поправочный фактор (Seasonal Correction Factor) и коэффициент вариаций (Coefficient of Variation) [16]. К сожалению, такая подмена в течение десятилетий привела к занижению роли временных вариаций радона в международном регулировании, когда на самом деле  $U_V(t)$  существенно больше  $U_H$  в случае не только краткосрочных, но и долгосрочных тестов, если их продолжительность не более 6–8 месяцев [7, 13, 14, 16]. Параметр  $U_H$  в формуле критерия (4) можно считать достаточно изученным, тем более его значения являются обязательной характеристикой того или иного средства (или метода) измерений, которые подлежат согласованию (при регистрации в Государственном реестре

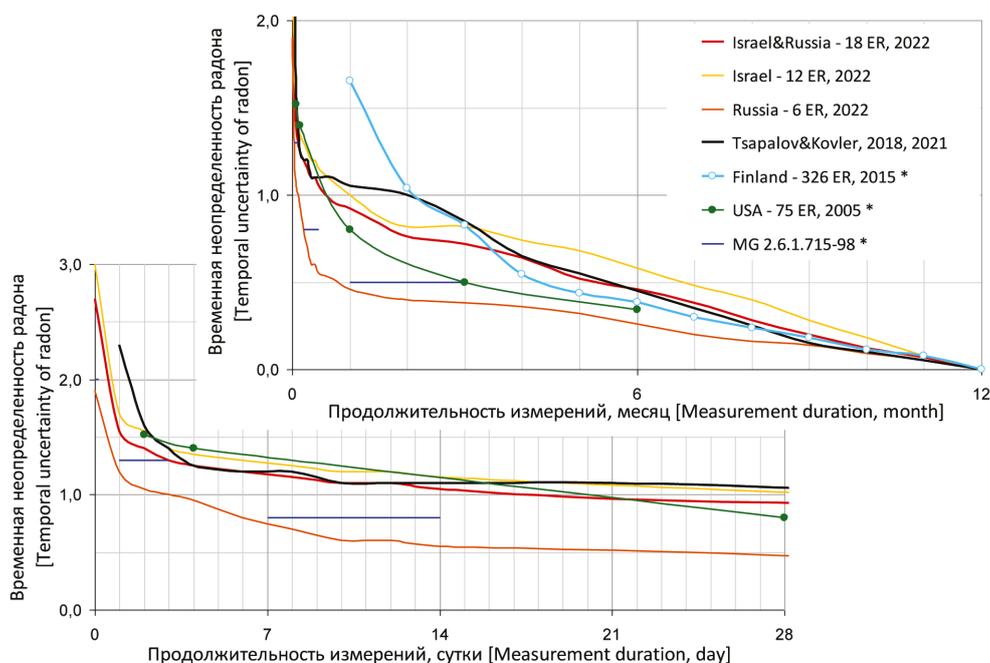
средств измерений) и периодической поверке через национальные метрологические службы. Поэтому внимание метрологического сообщества в рамках стандартизации измерений радона в большей степени целесообразно фокусировать на более значимом источнике неопределенности, т.е. параметре  $U_V(t)$  вместо  $U_{i_1}$ .

В этой связи актуальной задачей является изучение именно временной неопределенности  $U_V(t)$  с учетом продолжительности измерений и влияния разнообразных факторов на поведение радона во времени. Из описания выше параметра  $U_V(t)$  ясно, что оценка временной неопределенности основана на статистическом анализе массивов отклонений ОА радона в помещениях большого количества зданий от среднегодовых уровней, измеренных в разнообразных условиях. Это очень простой статистический подход в оценке  $U_V(t)$ , однако он позволяет учитывать влияние всех антропогенных и природных факторов (в том числе сезонных) на временную неопределенность при условии обеспечения репрезентативной выборки зданий и помещений, в которых будут проводиться мониторинговые исследования.

На сегодняшний день мы располагаем относительно небольшим набором непрерывных годовых измерений ОА радона в России (6 рядов мониторинга в 5 зданиях) и Израиле (12 рядов мониторинга в 9 зданиях), хотя анализируемый массив отклонений  $D_{ij}(t)$  включает  $18 \times 2920 \times 23 = 1\,208\,880$  значений [16], согласно (5). Столь значительный объем статистических данных при небольшом количестве годовых рядов ( $6 + 12 = 18$ ) достигается благодаря оригинальному методу преобразования исходных рядов данных [16], который обсуждался выше. В этой

связи традиционные подходы в исследовании временных вариаций радона в зданиях уступают на несколько порядков, если сопоставлять массивы статистических данных (отклонения  $D_{ij}(t)$ ), аккумулируемые в 1 экспериментальной комнате. Сравнительный анализ объемов экспериментальных данных в [16] показывает, что, например, исследование в Финляндии в 2016 г. [53], охватывавшее 326 частных домов или экспериментальных комнат (сокращенно на англ. – ER), позволило получить только 46 944 отклонений, а исследование в США в 2005 г. [54], охватывавшее 75 частных домов (ER), позволило получить лишь 1202 отклонений. Для удобства сравнения самих временных вариаций радона данные исследований в Финляндии и США были конвертированы в значения  $U_V(t)$  в соответствии с алгоритмом [16]. Дополнительно были конвертированы с помощью (3) значения коэффициента вариации из МУ 2.6.1.715-98, относящиеся к теплomu сезону года (см. табл. 1). Таким образом, на рисунке 3 приводятся все имеющиеся у нас значения  $U_V(t)$ , в том числе полученные путем конвертации данных, которые были опубликованы другими авторами. Данные МУ 2.6.1.037-2015 не показаны на этом рисунке, поскольку исходные экспериментальные результаты, полученные в зданиях России, позже обрабатывались с помощью более совершенного алгоритма [16]. В итоге имеющиеся ориентировочные значения временной неопределенности (вполне надежные в интервале продолжительности измерений от 6 до 12 месяцев) можно использовать для стандартизации измерений радона в помещениях при консервативном подходе.

Консервативный подход в регулировании означает умеренное завышение неопределенности с целью обеспе-



**Рис. 3.** Ориентировочные значения временной неопределенности поведения радона в зданиях, полученные по данным из разных источников (\* – преобразованные данные [16, 53, 54]); черная кривая – консервативные (табличные) значения, которые были опубликованы в 2018 г. [13, 14] и подтверждены в 2021 [7] и 2022 гг. [16]

[Fig 3. Indicative values of temporal uncertainty of indoor radon obtained from different sources (\* – converted data [16, 53, 54]); black curve – conservative (tabulated) values that were published in 2018 [13, 14] and confirmed in 2021 [7] and 2022 [16]]

чения надежной оценки соответствия нормативу в условиях недостаточной информации об основных компонентах неопределенности (например, вследствие низкой репрезентативности или мощности статистических данных). Поэтому для более точной (репрезентативной) оценки временной неопределенности радона необходимо провести как можно больше непрерывных годовых измерений в разнообразных зданиях, расположенных в разных регионах или странах (с отличающимися геологией и климатом, архитектурным стилем и т.п.). Кроме того, другим важным условием репрезентативности мониторинговых исследований является адекватный выбор экспериментальных помещений и зданий, требования к которым достаточно четко определены в [16]. С увеличением разнообразия таких исследований при контролируемых условиях (охватывающих наиболее значимые факторы влияния) возрастает вероятность добиться снижения неопределенности временных вариаций радона в критерии (4), используя учет влияния одного или сразу нескольких факторов (например, из списка параметров климата, геологии, комнаты и самого здания), если они будут демонстрировать мощную корреляцию с  $U_V(t)$ . По нашим оценкам, проведение (при контролируемых условиях) мониторинговых исследований в 200–300 разных зданиях [16] на территории России и/или других стран позволит получить статистически репрезентативный массив отклонений  $D_{ij}(t)$  для верификации и уточнения консервативных значений временной неопределенности  $U_V(t)$ .

#### Принцип эффективной стратегии измерений

Очевидно, что наиболее надежную оценку соответствия любого помещения требованиям безопасности можно получить, проводя измерения непрерывно в течение 1 года. В то же время ОА радона в большинстве зданий на планете (глобальный уровень среднего геометрического) составляет около 30 Бк/м<sup>3</sup> [39], что значительно ниже НУ, который в странах с повышенным уровнем радона в зданиях обычно тоже выше. Например, взвешенное по численности населения субъектов РФ среднее арифметическое ЭРОА радона в зданиях составляет около 27 Бк/м<sup>3</sup> [55] или 54 Бк/м<sup>3</sup> ОА радона. Соответственно, при геометрическом стандартном отклонении (GSD) в диапазоне от 2,5 до 2,9 [55, 56] среднее геометрическое ОА радона в России составляет около 35 Бк/м<sup>3</sup> (или около 41 Бк/м<sup>3</sup> [29]), в то время как НУ = 200 (или 400) Бк/м<sup>3</sup> для проектируемых (или существующих) зданий в единицах ОА без учета вклада торона. В этих реалиях измерение относительно низкой активности (по сравнению с НУ) с высокой точностью в течение всего года или даже нескольких месяцев выглядит как нерациональные затраты времени и финансов. Однако чем короче тест, тем выше неопределенность принятия решения о соответствии. В то же время из-за низкого уровня содержания радона в большинстве зданий даже высокая неопределенность оценки среднегодовой ОА радона на уровне 150% (например, 35 Бк/м<sup>3</sup> + 52 Бк/м<sup>3</sup> < НУ) будет удовлетворительной в большинстве случаев, но эта неопределенность должна быть надежно оценена. Лишь в относительно редких случаях, когда высокая неопределенность краткосрочного теста (от 2 до 7 дней) не позволяет надежно оценить соответствие, решение следует принимать на основе более надежных долгосрочных тестов. Такой двухэтапный под-

ход аналогичен американскому (см. выше), но лишь с тем важным отличием, что критерий соответствия должен иметь твердое научное обоснование с количественной оценкой временной неопределенности радона в зданиях, учитывающей продолжительность измерений. Таким образом, эффективная стратегия измерений предусматривает следующую последовательность контроля с применением критерия (4): (i) проведение краткосрочных измерений (от 2 до 7 дней), а в случае превышения НУ (ii) проведение долгосрочных измерений (примерно от 3 до 10 месяцев); если и в этом случае НУ превышен, то проводятся МЗР. В США накоплен значительный опыт проведения МЗР, который вполне может быть адаптирован в других странах, включая Россию.

Для территорий, где велика доля зданий с повышенной ОА радона, может быть введен дополнительный критерий выбора оптимальной продолжительности на первом этапе измерений, поскольку из-за повышенного содержания радона в зданиях существенная доля краткосрочных тестов может превышать НУ, соответственно, потребуется частое проведение второго этапа измерений. Поэтому для экономии ресурсов целесообразно увеличивать продолжительность измерений на первом этапе. Расчет оптимальной продолжительности измерений первого этапа может быть проведен путем такого же моделирования, как в исследовании [33] на основе метода Монте-Карло, но при отличающемся наборе входных параметров, включающих среднее арифметическое и GSD ОА радона в зданиях, а также дополнительные значения  $C_{nu}$ ,  $U_i$  и  $U_V(t)$ . Подобная перспектива лишь усиливает актуальность верификации коэффициента временных вариаций радона.

В рамках эффективной стратегии измерений предлагается также учитывать влияние межгодовых вариаций ОА радона в зданиях, которые обусловлены долгосрочными вариациями климата, поведения обитателей, а также деградацией или восстановлением перекрытий и фундамента здания, включая подземные коммуникации. Однако накопленные в течение многих лет данные указывают, что в большинстве случаев межгодовые вариации ОА радона незначительные, т.к. не превышают 15–20% [57], что может служить ориентиром максимально достижимой точности в рамках критерия (4). Тем не менее, полезно включить в процедуру оценки соответствия зданий рекомендацию о проведении повторного контроля радона через каждые 3–10 лет в зависимости, например, от ранга потенциальной радоноопасности территорий [10].

Применяя критерий (4), контроль помещений можно проводить в любое время (без предварительной подготовки) как при нормальной эксплуатации зданий с работающей в штатном режиме вентиляции (естественной или принудительной), так и в условиях ограниченной вентиляции, например, при приеме в эксплуатацию, когда в незаселенном здании постоянно закрыты все окна и двери. В этой связи в таблице 2 приводятся значения  $U_V(t)$ , зависящие не только от продолжительности измерений, но и от режима эксплуатации помещений. Режим «Нормальный» соответствует использованию помещений без каких-либо ограничений при работе вентиляции в штатном режиме. Режим «Ограниченный» соответствует использованию помещений при постоянно закрытых дверях и окнах с присутствием или отсутствием людей, что очевидно приводит

к снижению интенсивности вентиляции и, соответственно, временных вариаций радона, содержание которого, скорее всего, увеличивается. Дополнительно в таблице 2 приводятся рассчитанные с помощью критерия (4) контрольные значения ОА радона (или уровни действия), выше которых, вероятно, будет превышен заданный нормативный уровень  $C_{нр}$  при заданных значениях  $U_{и}$ .

Необходимо уточнить, что значения  $U_{и}(t)$ , относящиеся к режиму «Нормальный», соответствуют консервативным значениям, которые были опубликованы еще в 2018 г. [13, 14] и подтверждены в 2021 г. [7]. Как видно на рисунке

3, эти значения очень близки (при относительно небольшом расхождении в интервале продолжительности измерений после 2-й недели до 4-го месяца) совокупным значениям, полученным на основе данных всех 18 мониторинговых исследований в России и Израиле, которые были опубликованы в 2022 г. [16]. В то же время значения  $U_{и}(t)$ , относящиеся к режиму «ограниченный», в среднем в 1,5–2,0 раза меньше вследствие ограниченной вентиляции в 6 экспериментальных помещениях, которые располагались в зданиях на территории России [7, 14, 16]. Подробный анализ, объясняющий различие вентиляции

Таблица 2

**Значения неопределенности временных вариаций радона [7, 13, 14, 16] и ОА радона (выше которой будет превышен заданный нормативный уровень) в зависимости от продолжительности и режима измерений**

[Table 2

**The temporal uncertainty of radon [7, 13, 14, 16] and its concentrations (above which the specified reference level will be exceeded) depending on the duration and measurement mode]**

Длительность измерения [Measurement duration]	Неопределенность временных вариаций радона $U_{и}(t)$ [Temporal Uncertainty of radon $U_{и}(t)$ ]		Контрольная ОА радона, Бк/м <sup>3</sup> , при нормальном / ограниченном режимах эксплуатации [Action level, Bq/m <sup>3</sup> , under normal / closed modes]			Инструментальная неопределенность $U_{и}$ [Instrumental Uncertainty $U_{и}$ ]	
	Режим эксплуатации [Operating mode]		Нормативный уровень, Бк/м <sup>3</sup> [Reference level, Bq/m <sup>3</sup> ]				
	Нормальный [Normal]	Ограниченный [Closed]	200	300	400		
Сутки [Day]	2	1,60	1,05	75 / 94	113 / 141	151 / 188	0,40
	3	1,40	1,00	81 / 96	122 / 144	163 / 193	
	4	1,25	0,95	86 / 98	130 / 148	173 / 197	
	5	1,20	0,90	88 / 101	132 / 151	177 / 202	
	6	1,20	0,80	88 / 106	132 / 158	177 / 211	
	7	1,20	0,75	89 / 111	134 / 166	179 / 221	
	8	1,20	0,70	89 / 114	134 / 170	179 / 227	
	10	1,10	0,65	94 / 119	142 / 179	189 / 238	
	12	1,10	0,60	94 / 123	142 / 184	189 / 245	
	14	1,10	0,55	94 / 126	142 / 189	189 / 252	
20	1,10	0,50	94 / 130	142 / 195	189 / 260	0,20	
Месяц [Month]	1	1,05	0,45	97 / 136	146 / 203	194 / 271	0,15
	2	1,00	0,40	99 / 140	149 / 210	199 / 280	
	3	0,85	0,38	107 / 142	161 / 213	215 / 284	
	4	0,65	0,36	120 / 144	180 / 216	240 / 288	
	5	0,55	0,32	127 / 148	191 / 222	255 / 296	
	6	0,45	0,26	136 / 154	203 / 231	271 / 308	
	7	0,35	0,20	145 / 160	217 / 240	290 / 320	
	8	0,25	0,16	155 / 164	232 / 246	310 / 328	
	9	0,17	0,14	163 / 166	245 / 249	326 / 332	
	10	0,10	0,09	169 / 170	255 / 255	339 / 340	
	11	0,05	0,05	173 / 173	259 / 259	345 / 345	
	12	0,00	0,00	174 / 174	261 / 261	348 / 348	

в 12 экспериментальных помещениях в Израиле и 6 экспериментальных помещениях в России, приводится в [16]. Таким образом, значения  $U_V(t)$  в колонке «ограниченный» (режим эксплуатации) предлагается использовать при оценке соответствия нормативу: тех помещений, двери и окна которых постоянно закрыты (не только во время измерений), но при этом могут присутствовать или отсутствовать люди, а также новых незаселенных зданий перед вводом в эксплуатацию. Важно понимать, что намеренное ограничение вентиляции, хотя и способствует снижению неопределенности временных вариаций радона, но приводит к неконтролируемому увеличению ОА радона, соответственно, возрастает вероятность решений «ложной отбраковки». В итоге надежность решения о соответствии может существенно снижаться. Поэтому рекомендуется по мере возможности не прибегать к намеренному ограничению вентиляции во время контроля радона в зданиях, тем более что исследования неопределенности временных вариаций радона в основном проводятся в условиях нормальной эксплуатации зданий и обычного вентиляционного режима.

Таким образом, предложенный критерий (4), а также значения неопределенности временных вариаций радона в таблице 2 позволяют проводить оценку соответствия на основе оптимальной и гибкой стратегии измерений с разной продолжительностью, но не менее 2 суток, обеспечивая на сегодняшний день наибольшую эффективность контроля и надежность решения о соответствии зданий требованиям радоновой безопасности.

Сравнение международного опыта контроля радона в зданиях указывает на безусловное преимущество обычной и весьма прогрессивной практики в США по сравнению с Европой, включая Россию, где контроль радона организован по традиционному принципу обеспечения радиационной безопасности, когда контролерами являются только специалисты. Поэтому внедрение эффективной стратегии измерений радона будет способствовать широкой вовлеченности населения в процесс контроля, как в США. В этой связи со стороны федеральных и местных регуляторов представляются весьма полезными, прежде всего, организация учебных программ и информирование администраций и населения об опасности радона и других загрязнителей в воздухе жилищ и производственных зданий, где люди проводят почти 90% времени жизни [3]. Кроме того, очевидно, актуальна разработка и внедрение адекватной методики измерений в рамках рационального критерия оценки соответствия, обеспечивающая не только надежность контроля радона в зданиях, но и применение разнообразных по цене и точности средств измерений (и пробоотбора), которые могли бы использоваться как специалистами, так и любыми заинтересованными лицами, включая самих жителей, владельцев зданий, риэлторов, специалистов по вентиляции и отоплению, школьников и их педагогов с учетом бурно развивающихся во всем мире проектов Citizen Science («гражданской науки») [58].

### Требования к средствам измерений

Анализ данных на рисунке 3 показывает, что наиболее резкое снижение временной неопределенности наблюдается в интервале продолжительности измерений до 2 дней. Затем в интервале от 2 до 7 дней снижение менее

резкое, а в интервале продолжительности измерений более 14 дней темп снижения временной неопределенности становится очень слабым. Это важное экспериментальное наблюдение объясняет целесообразность проведения краткосрочных измерений в интервале от 2 (а лучше от 4) до 7 дней. Как видно на рисунке 3 и обсуждалось ранее, мгновенные измерения характеризуются слишком высокой и неконтролируемой временной неопределенностью (более 200%), поэтому они не могут применяться в принципе для оценки соответствия, согласно мировой практике.

Поскольку продолжительность измерений должна превышать 2 суток, снижается актуальность использования радоновых приборов с высокой чувствительностью, увеличивающей их стоимость. Действительно, при продолжительности измерений 2 дня  $U_V(t) > 1,0$  (100%), а при продолжительности до 7 дней  $U_V(t) > 0,7$  (70%). Поэтому надежность оценки соответствия в режиме краткосрочных измерений практически не снижается, даже при  $U_{II} = 0,4$  (40%) в рамках предложенного критерия (4), например,  $\sqrt{1,0^2 + 0,4^2} \sim 1,0$ . Очевидно, с увеличением продолжительности измерений случайная (рассчитываемая) компонента неопределенности  $U_{II}$  будет снижаться, полностью утрачивая роль, например, при длительности теста более 1 или нескольких недель. В этом случае величина  $U_{II}$  будет определяться только значением систематической (калибровочной) компоненты неопределенности. В этой связи важно отметить, что такая распространенная характеристика средств измерений, как минимально измеряемая активность, теряет смысл, поскольку в рамках рационального критерия соответствия нет необходимости измерять низкую активность с высокой точностью, тем более в режиме краткосрочных измерений. В режиме долгосрочных измерений минимально измеряемая активность будет стремиться к нулю (либо к уровню неустранимой активности за счет влияния фона или других помех) с увеличением продолжительности теста, если исключить систематическую компоненту. Поэтому, помимо (или даже вместо) стремления уменьшить минимально измеряемую активность, производителям измерительной техники, особенно профессиональных средств измерений радона, было бы весьма полезно рекомендовать выводить в качестве результата измерения не только значение  $C(t)$ , но и значение  $U_{II}$ , таким образом, внедряя концепции ISO/IEC [25, 26]. Индикация этих параметров очень удобна как при анализе результата теста по формуле (4), так и при аттестации (или поверке) устройств, особенно в процессе измерений. Для расчета текущих значений  $C(t)$  и  $U_{II}$  достаточно определить 2 основных метрологических параметра – чувствительность и фон средства измерения ОА или ЭРОА радона, используя следующий принцип оценки:

$$C(t) = \frac{N/t - N_{\phi}/t_{\phi}}{\varepsilon} = \frac{n(t) - n_{\phi}(t_{\phi})}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где  $C(t)$  – расчетная ОА (или ЭРОА) радона за время измерения  $t$ , Бк/м<sup>3</sup>;

$N$  или  $n(t)$  – количество или скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время измерения ОА (или ЭРОА) радона;

$N_{\phi}$  или  $n_{\phi}(t_{\phi})$  – количество или скорость счета импульсов (1/с), которые зарегистрированы за время измерения фона  $t_{\phi}$ , согласно инструкции производителя;

$\varepsilon$  – чувствительность средства измерений или калибровочный фактор, выражаемый через имп/с на Бк/м<sup>3</sup> или 1/(с·Бк/м<sup>3</sup>).

Неопределенность расчета  $u(C)$  можно вычислить, применяя в отношении (6) фундаментальные правила ISO/IEC для оценивания неопределенности измерений [25]:

$$u(C) = \sqrt{\frac{u^2(n) + u^2(n_{\phi})}{\varepsilon^2} + u_{rel}^2(\varepsilon) \cdot \left(\frac{n - n_{\phi}}{\varepsilon}\right)^2} = C \cdot \sqrt{\frac{u^2(n) + u^2(n_{\phi})}{(n - n_{\phi})^2} + u_{rel}^2(\varepsilon)}, \quad (7)$$

где  $u(\dots)$  – неопределенность параметра в скобках, выраженная в абсолютных единицах, а  $u_{rel}(\dots)$  выражена в относительных единицах. Отметим, что уравнения (7) согласуются с примерами в стандартах серии ISO 11665 [59], которые регламентируют измерения ОА радона разными методами.

Если распределение регистрируемых импульсов подчиняется нормальному закону, что справедливо при измерении ионизирующих излучений, то можно использовать следующую связь [25]:

$$u(n) = \frac{u(N)}{t} = \frac{\sqrt{N}}{t}, \quad (8)$$

тогда (7) преобразуется к виду, также учитывая  $U_{II} = k \cdot u(C)/C$ :

$$U_{II} = k \cdot \sqrt{\frac{n/t + n_{\phi}/t_{\phi}}{(n - n_{\phi})^2} + u_{rel}^2(\varepsilon)}, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент охвата, равный 2.

Кстати, первое слагаемое под корнем в (9) в виде дроби выражает случайную составляющую инструментальной неопределенности, которая зависит от продолжительности измерений. Последнее слагаемое под корнем в (9) выражает систематическую (или калибровочную) составляющую инструментальной неопределенности. Случайная и систематическая компоненты  $U_{II}$  уже упоминались выше.

Также целесообразно обратить внимание производителей измерительной техники на важность индикации параметра  $N$  (или  $n$ ) для определения значений основных метрологических величин –  $n_{\phi}$ ,  $\varepsilon$ , а также  $U_{II}$ , которые являются отличительными характеристиками средств измерений радона независимо от принципа детектирования и процедуры измерений.

Учитывая соображения выше, в таблице 2 показано, как рационально управлять величиной  $U_{II}$ , практически не снижая надежность оценки соответствия, когда вполне допустимо, что значения этой неопределенности могут быть в несколько раз больше при краткосрочных измерениях, по сравнению с долгосрочными. Этот важный факт не только адресован производителям измерительной техники и национальным метрологическим институтам, но и легализует участие непрофессионалов в контроле

радона на этапе краткосрочных измерений (скрининга). Действительно требования, связанные с контролем  $U_{II}$  в отношении наиболее востребованных краткосрочных измерений, должны быть менее жесткими, чем для долгосрочных измерений. В этой связи целесообразно рекомендовать пользователю самостоятельно контролировать качество своих измерительных устройств, но один или несколько из них следует периодически проверять в национальной метрологической службе. Кроме того, внедрение online-технологий в измерения радона позволяет существенно повысить качество контроля радона в зданиях. Например, даже школьники успешно справляются с измерениями ОА радона в своих жилищах под управлением online-системы «RadonTest» [58].

Существующий в России парк средств измерений радона отличается высокой стоимостью из-за высокой чувствительности устройств, в основном предназначенных для проведения мгновенных тестов, которые не обеспечивают надежную оценку соответствия, что подробно обсуждалось выше. В этой связи особенностью рационального критерия (4) является тот факт, что допускается использование любых методов и средств измерений ОА и ЭРОА радона, даже с самой низкой чувствительностью, просто в этом случае требуется достаточно большая продолжительность теста. Такая важная особенность мотивирует производить более широкую номенклатуру средств измерений, фокусируясь на более дешевых устройствах, что, очевидно, будет способствовать снижению стоимости контроля радона в зданиях с однократным увеличением массовости и надежности тестов.

## Выводы

1. Анализ международной практики контроля радона в зданиях, включая критический обзор методов оценки соответствия, применяемых в России, позволяет сделать выбор и обосновать применение рационального критерия оценки соответствия помещений требованиям норм безопасности в рамках концепций ISO/IEC. Предложенный критерий учитывает основные неопределенности измерений, обусловленные временными вариациями радона и инструментальной погрешностью. Это обеспечивает гибкость и оптимальный выбор продолжительности измерений с учетом режима эксплуатации зданий и решаемых задач регулирования радиационной безопасности, обеспечивая соблюдение надежности принятия решения о соответствии нормативу (не менее 95%).

2. Результаты обобщения экспериментальных данных по временной (ключевой) неопределенности поведения радона в зданиях, а также другие материалы статьи предлагается использовать для актуализации и разработки методических указаний взамен действующим МУ 2.6.1.2838-11 и МУ 2.6.1.037-2015. Рациональный контроль радона в зданиях сначала может обеспечиваться на основе консервативного подхода, поскольку для верификации и уточнения имеющихся ориентировочных значений неопределенности временных вариаций радона необходимо проведение дополнительных исследований поведения радона в 200–300 зданиях, расположенных в разных регионах России.

3. На основе рационального критерия предложен принцип эффективной стратегии измерений (оптимизации), способной обеспечить массовый и надежный контроль ра-

дона в зданиях через участие не только специалистов, но и самого населения благодаря открывающейся возможности применения простых методов и недорогих средств измерений радона. Обоснование такой возможности вытекает из анализа требований к средствам измерений в рамках рационального критерия оценки соответствия.

4. Представляется целесообразным использовать предложенный принцип оптимизации контроля радона в зданиях при разработке и совершенствовании национальных и региональных программ по снижению радонового риска в РФ.

#### **Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей**

Цапалов А.А. – разработка концепции и структуры обзорной статьи, написание текста, а также координация работы над статьей.

Киселев С.М. – обзор нормативно-методических документов, написание текста и редактирование статьи.

Ковлер К.Л. – обзор зарубежной литературы и редактирование статьи.

Микляев П.С. – написание текста и редактирование статьи.

Петрова Т.Б. – обзор отечественной литературы и редактирование статьи.

Жуковский М.В. – редактирование разделов статьи.

Ярмошенко И.В. – редактирование разделов статьи.

Маренный А.М. – редактирование статьи по части организации измерений.

Тутельян О.Е. – согласие нести ответственность за все аспекты статьи.

Кувшинников С.И. – согласие нести ответственность за все аспекты статьи.

#### **Информация о конфликте интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Сведения об источнике финансирования**

Финансирование отсутствовало.

#### **Литература**

- 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.
- Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году // Справочник. СПб., 2022. 72 с. URL: [http://niirg.ru/PDF/inf\\_sbor/2021.pdf](http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2021.pdf). (Дата обращения: 29.05.2023).
- Cincinelli A., Martellini T. Indoor air quality and health // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14, No 11. P. 1286.
- WHO, Housing and Health Guidelines. Geneva: World Health Organization, 2018. ISBN 978-92-4-155037-6.
- ANSI/AARST MAH. Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes. 2019. URL: [www.radonstandards.us](http://www.radonstandards.us) (Дата обращения: 29.05.2023).
- US EPA. Home buyer's and seller's guide to radon. United States Environmental Protection Agency; 2018 EPA 402/K-12/002. URL: [www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon) (Дата обращения: 29.05.2023).
- Tsapalov A., Kovler K. Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation // Environmental Challenges. 2021. No. 4. P. 1002. DOI:10.1016/j.envc.2021.100204.
- EU-BSS, Council Directive 2013/59/Euratom. Laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation and repealing directives 89/618, 90/641, 96/29, 97/43 and 2003/122/Euratom // Official Journal of the European Union, L13. 2014.
- Tryggve R. Analysis of Radon Levels in Swedish Dwellings and Workplaces, Research Report. Swedish Radiation Safety Authority, Stockholm, 2021. ISSN: 2000-0456.
- Petermann E., Bossew P., Hoffmann B. Radon hazard vs. radon risk – on the effectiveness of radon priority areas // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. No. 244-245. P. 106833.
- ICRP. Radiological protection against radon exposure. The international commission on radiological protection. 2014. ICRP publication 126 // Annals of the ICRP. 2014. Vol. 43, No 3.
- ICRP. Protection against Radon-222 at home and at work. The international commission on radiological protection. 1993. ICRP publication 65 // Annals of the ICRP. 1993. Vol. 23, No. 2. P. 1-45. ISSN 0146-6453.
- Tsapalov A., Kovler K. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. No. 183. P. 59-72.
- Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М. и др. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 2. Экспериментальная оценка неопределенности временных вариаций радона // Радиационная гигиена. 2018. Т.11, № 1. С. 64-79.
- Yarmoshenko I., Zhukovsky M., Onishchenko A. et al. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 232, No. 1. P. 106575. DOI:10.1016/j.jenvrad.2021.106575.
- Tsapalov A., Kovler K. Temporal uncertainty versus coefficient of variation for rational regulation of indoor radon // Indoor Air. 2022. P. 32:e13098. DOI:10.1111/ina.13098.
- Becker R., Haquin G., Kovler K. Air change rates and radon accumulation in rooms with various levels of window and door closure // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 38, No. 3. P. 234-261.
- Онищенко А.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В. Влияние временных вариаций уровней радона и погрешностей измерений на оценку средних сезонных значений объемной активности радона в помещении // АНРИ. 2013. № 3(74). С. 2-12.
- Цапалов А.А., Кувшинников С.И. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха // АНРИ. 2008. № 2. С. 37-43.
- Цапалов А.А. Оценка среднегодового уровня ЭРОА радона в помещениях на основе результатов краткосрочных измерений радиометром «АльфаАЭРО» // АНРИ. 2008. № 3. С. 49-58.
- Цапалов А.А. Системное исследование динамики ЭРОА радона в помещениях и принципы контроля // АНРИ. 2010. № 2. С. 2-14.
- Цапалов А.А., Ермилов А.П., Гулабянц Л.А. и др. Принцип оценки среднегодовой ЭРОА радона в зданиях по результатам краткосрочных измерений // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 23-27.
- Цапалов А.А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона // АНРИ. 2011. № 3(66). С. 52-64.
- Цапалов А.А., Маренный А.М. Принципы радонового контроля в помещениях зданий // АНРИ. 2014. № 1(76). С. 6-14.
- ISO/IEC Guide 98-3. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2008.

26. ISO/IEC Guide 98–1. Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2009.
27. ISO/IEC Guide 98–4. Uncertainty of measurement – Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2012.
28. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году. Информационный сборник НИИРГ. СПб., 2016. 73 с.
29. Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 85–103. DOI:10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103.
30. Маренный А.М., Киселёв С.М., Семёнов С.Ю. О проблеме обеспечения защиты населения России от природных источников ионизирующего излучения. Часть 2. Развитие подходов и практические мероприятия // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 3. С. 527–539.
31. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
32. ISO 11665-8. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings. International Organization for Standardization; 2019.
33. Tsapalov A., Kovler K. Short- versus long-term tests of indoor radon for risk assessment by Monte-Carlo method towards effective measurement strategy // Indoor Air. 2022; 32:e13166. DOI:10.1111/ina.13166.
34. Cinelli G., Tollefsen T., Bossew P. et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. No. 196. P. 240–252.
35. IAEA. Design and conduct of indoor radon surveys. Int. Atomic Energy Agency; 2019 IAEA safety reports series no. 98, ISSN 1020–6450.
36. Holmgren O., Arvela H., Collignan B. et al. Radon remediation and prevention status in 23 European countries // Radiation Protection Dosimetry. 2013. Vol. 157, No. 3. P. 392–396.
37. Johnson F. Analysis of the wirthlin survey radon questions. US EPA Office of Policy, Planning and Evaluation; 1990.
38. George A. The history, development and the present status of the radon measurements programme in The United States of America // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 167, No. 1–3. P. 8–14.
39. 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).
40. Pinel J., Fearn T., Darby S., Miles J. Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom // Radiation Protection Dosimetry. 1995. Vol. 58, No. 2. P. 127–132.
41. Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data // Health Physics. 1998. Vol. 74, No. 3. P. 370–378.
42. Burke Q., Murphy P. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels // Radiation Measurements. 2011. Vol. 46, No. 10. P. 1168–1172.
43. Kozak K., Mazur J., Kozłowska B. et al. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon // Applied Radiation and Isotopes. 2011. Vol. 69, No. 10. P. 1459–1465.
44. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Вариации объемной активности радона в традиционных деревенских домах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60, № 1. С. 89–98.
45. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Onishchenko A. Seasonal variation of radon concentrations in russian residential high-rise buildings // Atmosphere. 2021. Vol. 12, No. 7. P. 930. DOI:10.3390/atmos12070930.
46. Marenny A., Nefedov N., Vorozhtsov A. Results of radon concentration measurements in some regions of Russia // Radiation Measurements. 1995. Vol. 25, No 1-4. P. 649–653.
47. Karpinska M., Munich Z., Kapala J. Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland // Journal of Environmental Radioactivity. 2004. Vol. 77, No. 2. P. 101–109.
48. Bochicchio F., Campos-Venuti G., Piermattei S. et al. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions // Radiation Measurements. 2005. Vol. 40, No. 2-6. P. 686–694.
49. Denman A., Crockett R., Groves-Kirkby C. et al. The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon – A case study in Northamptonshire, UK // Environment International. 2007. Vol. 33, No. 1. P. 34–44.
50. Font L. On radon surveys: Design and data interpretation // Radiation Measurements. 2009. Vol. 44, No. 9-10. P. 964–968.
51. Friedmann H. Final results of the Austrian radon Project // Health Physics. 2005. No. 89. P. 339–348.
52. Губина А.Т., Маренный А.М., Сакович В.А. и др. Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на содержание радона в помещениях // Медицина экстремальных ситуаций. 2012. № 4(42). С. 77–88.
53. Arvela H., Holmgren O., Hänninen P. Effect of soil moisture on seasonal variations in indoor radon concentration: modelling and measurements in 326 Finnish houses // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 168, No. 2. P. 277–290.
54. Steck D.J. Residential radon risk assessment: how well is it working in a high radon region? Proc 15th International Radon Symposium (American Association of Radon Scientists and Technologists, Fletcher, NC, US). 2005. P. 1–13.
55. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Жуковский М.В. Восстановление формы и параметров распределения объемной активности радона в жилищах России на основе данных 4-ДОЗ // АНРИ. 2015. № 3(82). С. 41–46.
56. Маренный А.М., Савкин М.Н., Шинкарев С.М. Модель для оценки коллективной дозы облучения населения России от радона // АНРИ. 1999. № 4(19). С. 4–11.
57. Antignani S., Venoso G., Ampollini M. et al. A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates // Science of The Total Environment. 2021. No. 762. P. 144150.
58. Tsapalov A., Kovler K., Shpak M. et al. Involving schoolchildren in radon surveys by means of the “RadonTest” online system // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. No. 217. P. 106215.
59. ISO 11665-4. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. International Organization for Standardization; 2019.
60. Janik M., Tokonami S., Kranrod C. et al. Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements // Journal of Radiation Research. 2013. Vol. 54, No. 4. P. 597–610.

Поступила: 20.06.2023 г.

**Цапалов Андрей Анатольевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник, консультант в области исследований и регулирования радона Научно-производственного предприятия «ДОЗА». **Адрес для переписки:** 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский проспект, дом 5, этаж 2, комната 49; E-mail: andrey-ants@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-5875-381X

**Киселев Сергей Михайлович** – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией регулирующего надзора за объектами ядерного наследия отдела радиационной безопасности населения, Государственный научный центр Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0002-2613-2293

**Ковлер Константин Леонидович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий отделом строительных материалов и технологий факультета строительства и охраны окружающей среды Израильского технологического института «Технион» (Technion – Israel Institute of Technology), Хайфа, Израиль  
ORCID: 0000-0002-8227-8975

**Микляев Петр Сергеевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор Российской академии наук, заместитель директора по научной работе Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0003-1821-6275

**Петрова Татьяна Борисовна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Жуковский Михаил Владимирович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, профессор кафедры экспериментальной физики Уральского федерального университета, Екатеринбург, Россия  
ORCID: 0000-0002-5729-6530

**Ярмошенко Илья Владимирович** – кандидат физико-математических наук, директор Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия  
ORCID: 0000-0002-6591-1513

**Маренный Альберт Михайлович** – доктор физико-математических наук, академик Российской академии естественных наук, главный научный сотрудник лаборатории природных источников ионизирующих излучений, Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0001-6142-0234

**Тутельян Ольга Евгеньевна** – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

**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., Ковлер К.Л., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Маренный А.М., Тутельян О.Е., Кувшинников С.И. Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 84-104. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104

## Standardization of indoor radon measurements based on rational criterion for conformity assessment

Andrey A. Tsapalov<sup>1</sup>, Sergey M. Kiselev<sup>2</sup>, Konstantin L. Kovler<sup>3</sup>, Peter S. Miklyaev<sup>4</sup>, Tatyana B. Petrova<sup>5</sup>, Michael V. Zhukovsky<sup>6</sup>, Ilya V. Yarmoshenko<sup>6</sup>, Albert M. Marennyy<sup>7</sup>, Olga E. Tutelyan<sup>8</sup>, Sergey I. Kuvshinnikov<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Scientific Production Company «Doza», Ltd, Zelenograd, Moscow, Russia

<sup>2</sup>State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

<sup>4</sup>Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>5</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>6</sup>Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

<sup>7</sup>Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

<sup>8</sup>Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

*Significant temporal variations in radon are observed in any buildings, including unoccupied buildings with limited ventilation. This fact causes serious difficulties in radiation monitoring to assess the compliance of premises with the requirements of the normative, which limits the annual average level of radon in buildings. Therefore, neither at the national nor at the international level has yet been solved the problem of standardizing the indoor radon measurement if the test duration is less than a year. An analysis of approaches to radon measurement, including an assessment of the effectiveness of regulation, shows very significant differences between practices established in different countries. For example, in Russia, rapid (no more than 20 min) measurements are mainly used and mitigation measures to protect existing buildings from radon are practically not carried out. In European countries, mainly long-term (at least two months) measurements are used, while mitigation measures are still relatively rare, with the exception of the UK and Sweden. In the USA, short-term (2–7 days) measurements are widely used, which are not only carried out, but also paid for by residents themselves, including mitigation measures. However, despite the established approaches to indoor radon monitoring in Russia and the USA, there is a persistent distrust among specialists in the results of short-term and, especially, rapid measurements. In this regard, a compromise approach is proposed to standardize radon measurements based on a rational criterion by applying fundamental ISO/IEC concepts such as “measurement uncertainty” and “conformity assessment”. The rational criterion for conformity assessment allows using measurements of different durations, providing a given reliability when making a decision. It also proposes a rationale for optimizing indoor radon monitoring through the participation of not only professional inspectors, but also the population itself due to the possibility of introducing simple methods and inexpensive radon devices within the rational criterion.*

**Key words:** radon, buildings, temporal variations, reference level, standardization, measurement uncertainty, conformity assessment, rational criterion, measurement duration.

### Personal contribution of authors

Tsapalov A.A. – development of the concept and structure of the review article, writing the text, as well as coordinating the work on the article.

Kiselev S.M. – review of normative and methodological documents, writing the text and editing the article.

Kovler K.L. – review of foreign literature and editing of the article.

Miklyaev P.S. – writing the text and editing the article.

Petrova T.B. – review of national literature and editing of the article.

Zhukovsky M.V. – editing sections of the article.

Yarmoshenko I.V. – editing sections of the article.

Marennyy A.M. – editing the article regarding the organization of measurements.

Tutelyan O.E. – agreement to be responsible for all aspects of the article.

Kuvshinnikov S.I. – agreement to be responsible for all aspects of the article.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Financing

The scientific review had no sponsorship.

### Andrey A. Tsapalov

Scientific Production Company «Doza»

**Address for correspondence:** Georgievsky prospect, 5, floor 2, room 49, Zelenograd, Moscow, 124498,

E-mail: andrey-ants@yandex.ru

## References

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. Barkovsky AN, Akhmatdinov Ruslan R, Akhmatdinov Rustam R, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021. Handbook. St. Petersburg; 2022. 72 p. Available from: [http://niirg.ru/PDF/inf\\_sbor/2021.pdf](http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2021.pdf) (Accessed 29 May 2023). (In Russian).
3. Cincinelli A, Martellini T. Indoor air quality and health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017;14(11): 1286.
4. WHO. Housing and Health Guidelines. Geneva: World Health Organization; 2018.
5. ANSI/AARST MAH. Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes. 2019. Available from: <https://standards.aarst.org> (Accessed 29 May 2023).
6. US EPA. Home buyer's and seller's guide to radon. EPA 402/K-12/002. United States Environmental Protection Agency; 2018. Available from: <https://www.epa.gov/radon> (Accessed: 29 May 2023).
7. Tsapalov AA, Kovler KL. Studying temporal variations of indoor radon as a vital step towards rational and harmonized international regulation. *Environmental Challenges*. 2021;4: 1002. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100204.
8. EU-BSS, Council Directive 2013/59/Euratom. Laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation and repealing directives 89/618, 90/641, 96/29, 97/43 and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union*, L13. 2014.
9. Tryggve R. Analysis of Radon Levels in Swedish Dwellings and Workplaces. Research Report. Stockholm: Swedish Radiation Safety Authority; 2021.
10. Petermann E, Bossew P, Hoffmann B. Radon hazard vs. radon risk – on the effectiveness of radon priority areas. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;244-245: 106833.
11. ICRP. Radiological protection against radon exposure. The international commission on radiological protection. 2014. ICRP publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014;43(3).
12. ICRP. Protection against Radon-222 at home and at work. The international commission on radiological protection. 1993. ICRP publication 65. *Annals of the ICRP*. 1993;23(2): 1-45.
13. Tsapalov AA, Kovler KL. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;183: 59–72.
14. Tsapalov AA, Kiselev SM, Marennyy AM. Uncertainty of the results of the radon control in residential buildings. Part 2. Experimental assessment of the radon temporal variations. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 64-79. (In Russian).
15. Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV, Onishchenko AD, Vasilyev A, Malinovsky G. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;232(1): 106575. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106575.
16. Tsapalov AA, Kovler KL. Temporal uncertainty versus coefficient of variation for rational regulation of indoor radon. *Indoor Air*. 2022;32: e13098. DOI: 10.1111/ina.13098.
17. Becker R, Haquin G, Kovler K. Air change rates and radon accumulation in rooms with various levels of window and door closure. *Journal of Building Physics*. 2013;38(3): 234–261.
18. Onishchenko AD, Zhukovsky MV, Vasilyev AV. The influence of temporal variations of radon concentration and measurement uncertainties on the assessment of the average seasonal values of radon volumetric activity indoors. *ANRI=ANRI*. 2013;3(74): 2-12. (In Russian).
19. Tsapalov AA, Kuvshinnikov SI. The dependence of the indoors volumetric activity of radon on the difference between the internal and external air temperatures. *ANRI=ANRI*. 2008;2: 37–43 (In Russian).
20. Tsapalov AA. Assessment of the annual average level of EEC radon indoors based on the results of short-term measurements with the AlphaAERO radiometer. *ANRI=ANRI*. 2008;3: 49-58. (In Russian).
21. Tsapalov AA. A system research of the dynamics of EEC radon indoors and the principles of control. *ANRI=ANRI*. 2010;2: 2-14. (In Russian).
22. Tsapalov AA, Ermilov AP, Gulabyan LA, Gubin AT, Kuvshinnikov SI. 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).
23. Tsapalov AA. The results of long-term studies of the patterns of behavior of radon gas and its EEC in buildings in the Moscow region. *ANRI=ANRI*. 2011;3(66): 52–64. (In Russian).
24. Tsapalov AA, Marennyy AM. Principles of radon control in buildings. *ANRI=ANRI*. 2014;1(76): 6–14 (In Russian).
25. ISO/IEC Guide 98–3. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2008.
26. ISO/IEC Guide 98–1. Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2009.
27. ISO/IEC Guide 98–4. Uncertainty of measurement – Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission; 2012.
28. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Exposure doses to the population of the Russian Federation in 2015. Information collection of NIIRG. Saint-Petersburg; 2016. 73 p. (In Russian).
29. Kononenko DV. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 85-103. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103. (In Russian).
30. Marennyy AM, Kiselev SM, Semyonov SY. On the problem of ensuring the protection of the population of Russia from natural sources of ionizing radiation. Part 2. Development of approaches and practical measures. *Medicina Extremalnih Situatsii = Extreme Medicine*. 2019;21(3): 527-539. (In Russian).
31. Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon. From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical; 2016. 432 p. (In Russian).
32. ISO 11665-8. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 8: Methodologies for initial and additional investigations in buildings. International Organization for Standardization; 2019.
33. Tsapalov AA, Kovler KL. Short- versus long-term tests of indoor radon for risk assessment by Monte-Carlo method towards effective measurement strategy. *Indoor Air*. 2022;32: e13166. DOI: 10.1111/ina.13166.
34. Cinelli G, Tollefsen T, Bossew P, Gruber V, Bogucarskis K, Felice LD, et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;196: 240–252.
35. Design and conduct of indoor radon surveys. IAEA safety reports series no. 98. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2019.
36. Holmgren O, Arvela H, Collignan B, Jiránek M, Ringer W. Radon remediation and prevention status in 23 European countries. *Radiation Protection Dosimetry*. 2013;157(3): 392–396.
37. Johnson F. Analysis of the wirthlin survey radon questions. US EPA Office of Policy, Planning and Evaluation; 1990.

38. 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.
39. UNSCEAR, 2006. Effects of ionizing radiation. Vol. 1: 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).
40. Pinel J, Fearn T, Darby S, Miles J. Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;58(2): 127–132.
41. Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modeling of house radon data. *Health Physics*. 1998;74(3): 370–378.
42. Burke Q, Murphy P. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels. *Radiation Measurements*. 2011;46(10): 1168–1172.
43. Kozak K, Mazur J, Kozłowska B, Karpińska M, Przylibski TA, Mamont-Cieśła K, et al. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. *Applied Radiation and Isotopes*. 2011;69(10): 1459–1465.
44. Miklyaev PS, Petrova TB. Variations of radon concentration in traditional russian rural wooden houses. *Radiatsionnaya biologiya. Radiojehkologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2020;60(1): 89–98. (In Russian).
45. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Onishchenko AD. Seasonal variation of radon concentrations in Russian residential high-rise buildings. *Atmosphere*. 2021;12(7): 930. DOI: 10.3390/atmos12070930.
46. Marennyy AM, Nefedov NA, Vorozhtsov AV. Results of radon concentration measurements in some regions of Russia. *Radiation Measurements*. 1995;25(1-4): 649–653.
47. Karpinska M, Munich Z, Kapala J. Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;77(2): 101–109.
48. Bochicchio F, Campos-Venuti G, Piermattei S, Nuccetelli C, Risica S, Tommasino L, et al. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. *Radiation Measurements*. 2005;40(2-6): 686–694.
49. Denman A, Crockett R, Groves-Kirkby C, Phillips PS, Gillmore GK, Woolridge AC. The value of Seasonal Correction Factors in assessing the health risk from domestic radon – A case study in Northamptonshire, UK. *Environment International*. 2007;33(1): 34–44.
50. Font L. On radon surveys: Design and data interpretation. *Radiation Measurements*. 2009;44(9–10): 964–968.
51. Friedmann H. Final results of the Austrian radon Project. *Health Physics*. 2005;89: 339–348.
52. Gubin AT, Marennyy AM, Sakovich VA, Astafurov VI, Nefedov NA, Penezev AV. Examination of the territories served by the FMBA of Russia for the content of indoor radon. *Meditsina Extremalnykh Situatsiy = Extreme Medicine*. 2012;4(42): 77–88. (In Russian).
53. Arvela H, Holmgren O, Hänninen P. Effect of soil moisture on seasonal variations in indoor radon concentration: modelling and measurements in 326 Finnish houses. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;168(2): 277–290.
54. Steck DJ. Residential radon risk assessment: how well is it working in a high radon region? Proc 15th International Radon Symposium (American Association of Radon Scientists and Technologists, Fletcher, NC, US), 2005. P. 1–13.
55. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Zhukovsky MV. Reconstruction of the forms and parameters of the distribution of radon concentration in Russian dwellings based on 4-DOZ data. *ANRI=ANRI*. 2015;3(82): 41–46 (In Russian).
56. Marennyy AM, Savkin MN, Shinkarev SM. A model for estimating the collective exposure dose from radon for the population of Russia. *ANRI=ANRI*. 1999;4(19): 4–11 (In Russian).
57. Antignani S, Venoso G, Ampollini M, Caprio M, Carpentieri C, Di Carlo Ch, et al. A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates. *Science of the Total Environment*. 2021;762: 144150.
58. Tsapalov AA, Kovler KL, Shpak MN, Shafir E, Golumbic Y, Peri A, et al. Involving schoolchildren in radon surveys by means of the “RadonTest” online system. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;217: 106215.
59. ISO 11665-4. Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis. International Organization for Standardization; 2019.
60. Janik M, Tokonami S, Kranrod C, Sorimachi A, Ishikawa T, Hosoda M, et al. Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements. *Journal of Radiation Research*. 2013;54(4): 597–610.

Received: June 20, 2023

**For correspondence: Andrey A. Tsapalov** – Doctor of Technical Sciences, Experienced Researcher, Consultant in the field of radon research and regulation, Scientific Production Company “Doza”, Ltd (Georgievsky prospect, 5, floor 2, room 49, Zelenograd, Moscow, 124498; E-mail: andrey-ants@yandex.ru)

ORCID: 0000-0002-5875-381X

**Sergey M. Kiselev** – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Regulatory Supervision of Nuclear Heritage Objects, Department of Radiation Safety of the Population, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-2613-2293

**Konstantin L. Kovler** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department “Building Materials, Performance and Technology” of the National Building Research Institute, Department of Structural Engineering and Construction Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

ORCID: 0000-0002-8227-8975

**Peter S. Miklyaev** – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0003-1821-6275

**Tatyana B. Petrova** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Michael V. Zhukovsky** – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Experimental Physics of the Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5729-6530

**Ilya V. Yarmoshenko** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0002-6591-1513

**Albert M. Marennyy** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-6142-0234

**Olga E. Tutelyan** – Doctor of Medical Sciences, Head of the Laboratory of Radiation Control and Physical Factors of the Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

**Sergey I. Kuvshinnikov** – Radiation Hygiene Doctor, Laboratory of Radiation Control and Physical Factors, Federal Center of 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., Kovler K.L., Miklyaev P.S., Petrova T.B., Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Marennyy A.M., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I. Standardization of indoor radon measurements based on rational criterion for conformity assessment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 4. P. 84-104. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104**