

Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 2. Экспериментальная оценка неопределенности временных вариаций радона

А.А. Цапалов¹, С.М. Киселев², А.М. Маренный³, К.Л. Ковлер⁴, С.И. Кувшинников⁵, А.С. Янкин⁶

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

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

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

⁴Израильский технологический институт «Technion», Хайфа, Израиль

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

⁶Общество с ограниченной ответственностью «Институт «Рязаньагровпроект», Рязань, Россия

В первой части статьи подробно рассмотрена проблема контроля радона в зданиях, а также предложен надежный принцип контроля радона в помещениях, который вводит новый параметр, – коэффициент временных вариаций радона $K_V(t)$. Этот коэффициент выражает основную составляющую неопределенности среднегодового уровня радона в зависимости от режима и продолжительности измерений. Также предложен оригинальный алгоритм определения частных и табличных значений $K_V(t)$ на основе результатов непрерывных годовых мониторингов радона в представительных экспериментальных помещениях. В данной части статьи приводятся результаты годовых непрерывных мониторингов как объемной активности радона, так и его дочерних продуктов распада, проводившихся в 10 экспериментальных помещениях в период с 2006 по 2013 г. Эти помещения находились в 7 зданиях, в основном расположенных в Московском регионе. Все экспериментальные помещения имеют детальное описание. Применение оригинального алгоритма обработки результатов годовых мониторингов позволило определить частные и табличные значения коэффициента $K_V(t)$ в зависимости от режима и продолжительности измерений. Значения этого коэффициента снижаются почти в два раза, если учитывается температурное влияние. Однако возможность такого учета существенно ограничивается рядом условий. Кроме того, обсуждается важность учета геологического фактора. Приводится оценка репрезентативности полученных данных, а также предлагается способ для верификации и уточнения табличных значений коэффициента $K_V(t)$. Благодаря полученным результатам открывается возможность совершенствования подходов в области санитарно-эпидемиологического надзора в части практической реализации стратегии массового контроля радона и эффективного выявления зданий с повышенным содержанием радона.

Ключевые слова: радон, объемная активность, эквивалентная активность, коэффициент временных вариаций, поправочный коэффициент, неопределенность, экспериментальное помещение, мониторинг.

Введение

Контроль содержания радона в зданиях проводится уже несколько десятилетий во многих странах мира, включая Россию. Однако до сих пор результаты контроля радона в помещениях нельзя считать надежными, поскольку сложившаяся практика не предусматривает количественную оценку неопределенности среднегодовой объемной активности (СОА) радона, как и его среднегодовой экви-

валентной равновесной объемной активности (СЭА). Эта проблема достаточно подробно рассматривается в первой части статьи [1] (далее – Часть 1). Кроме того, в Части 1 представлен принцип, обеспечивающий надежность контроля радона в помещениях, поскольку он соответствует требованиям метрологии и современных стандартов. Этот принцип вводит новый параметр – коэффициент $K_V(t)$, который выражает неопределенность временных вариаций

Цапалов Андрей Анатольевич

Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов.

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

радона, является важным компонентом неопределенности СОА (или СЭА) радона и зависит от продолжительности и режима измерений. Также в Части 1 подробно описан оригинальный способ определения коэффициента $K_{\nu}(t)$ на основе результатов непрерывных годовых мониторингов радона в представительных экспериментальных помещениях. В качестве табличных значений $K_{\nu}(t)$, применяемых непосредственно для контроля радона в помещениях, используются только максимальные значения, полученные по всем экспериментальным помещениям.

Данная часть статьи (Часть 2) посвящена описанию экспериментального определения частных и табличных значений коэффициента $K_{\nu}(t)$ с учётом температурного влияния, а также обсуждению полученных результатов, оценке их представительности и способу верификации.

Характеристика экспериментальных помещений

Экспериментальная часть исследований проводилась в период с 2006 по 2013 г. и охватывала 10 помещений с повышенным содержанием радона, выбранных в соответствии с требованиями Части 1. Эти помещения находились в 6 зданиях, расположенных в Москве и Московской области, и одно здание в Рязанской области. Объемная активность радона в наружном воздухе составляла около 10 Бк/м³.

Наиболее важные характеристики экспериментальных помещений приводятся в таблице 1, включая характеристики здания, геологии и климата, которые можно легко определить при осмотре объекта контроля, а также используя информацию из Интернета. Столь подробное описание объектов контроля необходимо для последующей классификации помещений и идентификации факторов (качественных признаков), влияющих на поведение радона и значения $K_{\nu}(t)$. Классификация помещений на основе простых признаков поможет в будущем существенно повысить эффективность процедуры контроля, но при условии наличия большого объема экспериментальных данных по разным помещениям разных зданий. Однако на текущем этапе исследований классификация помещений нецелесообразна, поскольку невозможно объективно определить признаки ранжирования из-за малого количества экспериментальных помещений и, соответственно, недостатка статистических данных в отношении значений коэффициента временных вариаций радона.

В экспериментальных помещениях (ЭП) 1, 3, 4, 5, 6 и 10 были всегда закрыты окна и двери, а люди почти не присутствовали. Другие четыре помещения ЭП 7-9, включая ЭП 2, эксплуатировались в нормальном режиме, и в них периодически присутствовали люди. ЭП 2 – это отдельная лабораторная комната внутри подвального помещения, в которой обеспечивался относительно стабильный микроклиматический режим за счет наличия дополнительных стен.

По аналогии с ЭП 2 было построено помещение ЭП 6, используемое в качестве радоновой комнаты с очень низким воздухообменом, в среднем равном 0,1 ч⁻¹. Отметим, что воздухообмен на таком уровне можно считать минимальным для разного типа помещений в любых зданиях.

В экспериментальных помещениях ЭП 1 и ЭП 6 использовался один и тот же искусственный источник радона (жидкий раствор Ra-226) с высокой и стабильной скоростью эманации, равной 3,0 Бк/с или 260 (500) Бк/(м³·ч) с учетом объема ЭП 1 (ЭП 6).

Экспериментальное помещение ЭП 3 отличалось тем, что весь его пол представлял собой открытый грунт, который, очевидно, являлся основным источником радона в этом помещении (причем его высота из-за неровного пола различалась почти в 2 раза, согласно таблице 1).

С целью более детального сравнительного изучения влияния погодных условий на поведение радона годовой мониторинг был запущен одновременно в помещениях ЭП 1 и ЭП 3, которые имеют принципиальные отличия. Согласно таблице 1, ЭП 1 – это небольшая закрытая комната внутри чердака со стабильным искусственным источником радона, а ЭП 3 – это большое подвальное помещение с естественным источником радона в виде грунта. Кроме того, эти помещения находились в разных зданиях, расстояние между которыми около 40 км. Тем не менее, в этих резко отличающихся помещениях наблюдалось схожее закономерное поведение радона [3].

В процессе мониторинга выяснилось, что экспериментальное помещение ЭП 5, как и само здание, находится в аварийном состоянии, т.к. в период таяния снега грунтовые воды затапливали подвал. Уровень воды в подвале составлял несколько сантиметров и сохранялся в течение нескольких месяцев.

Согласно таблице 1, в экспериментальных помещениях 1, 3, 6, 7, 8, 9, 10 проводился годовой мониторинг объемной активности (ОА) радона. Параллельно или вместо ОА радона в ЭП 2, 3, 4, 5, 7, 10 проводился годовой мониторинг ЭРОА радона.

Особо отметим, что воздухообмен во всех экспериментальных помещениях осуществлялся за счет естественной вентиляции, что характерно для большинства зданий. Экспериментальные помещения обогревались либо за счет центрального отопления здания, либо индивидуально, как ЭП 10. В помещениях ЭП 1, 3, 5 и 6 центральное отопление не предусматривалось, однако ЭП 1 дополнительно отапливалось электрообогревателем.

Средства измерений

Для измерений ОА радона (и температуры) в режиме монитора использовались радиометры «AlphaGUARD» (Genitron Instruments GmbH, Германия) с периодом регистрации 1 ч и «RadonSCOUT» (Sarad, Германия) с периодом регистрации 3 ч. Измерения ЭРОА радона (и температуры) также выполнялись в режиме монитора с помощью аэрозольного радиометра радона РАА-3-01 «АльфаАЭРО» (НТЦ Амплитуда, Россия) [4]. Все эти радиометры зарегистрированы в Госреестре и продемонстрированы на рисунке 1.



Рис. 1. Радиометры радона: «AlphaGUARD» (а), «RadonSCOUT» (б), и аэрозольный радиометр ЭРОА радона: «АльфаАЭРО» (в)
[Fig. 1. Monitors of radon: AlphaGUARD (a) and RadonSCOUT (b), and monitor of radon progeny (EEC): AlphaAERO (c)]

Таблица 1

Характеристики экспериментальных помещений [2]

Обозначение	ЭП1	ЭП2	ЭП3	ЭП4	ЭП5	ЭП6	ЭП7	ЭП8	ЭП9	ЭП10
Дата начала годового мониторинга ОА (ЭРОА)	20.10.2006	08.10.2009	20.10.2006; (02.10.2009)	02.10.2009	05.10.2009	21.09.2012	23.11.2012 (12.11.2012)	02.11.2011	02.11.2011	20.10.2011 (20.10.2011)
Средства измерений	AlphaGUARD	АльфаАЭРО	AlphaGUARD; АльфаАЭРО	АльфаАЭРО	АльфаАЭРО	AlphaGUARD	RadonSCOUT АльфаАЭРО	RadonSCOUT	RadonSCOUT	RadonSCOUT АльфаАЭРО
СОА (СЭА) радона, Бк/м ³	880	(69,2)	76.4; (34.5)	(55.0)	(43.4)	4703	96.1; (40.3)	72.2	210	101; (41.2)
Средняя температура, °С	18,5	19,8	19,2; (20,4)	24,8	18,8	22,5	21,4	24,3	21,1	18,7
Этаж	Чердак	Подвал	Подвал	Подвал	Подвал	Подвал	Второй	Первый	Цоколь	Первый
Назначение	Технич., Лаборатория	Лаборатория	Технич.	Архив	Склад	Rn-комната	Офис	Кухня	Библиотека	Спальная
Присутствие людей	Нет	Да	Редко	Нет	Нет	Редко	Да	Да	Да	Нет
Размер, м	4×3,5×h3	12×10×h4	12×17×h(2-3,7)	6×2,5×h3,2	5×4,1×h3,1	3×3×h2,4	8×5,6×h3,2	3×5×h4	3×4×h3	4×3,6×h2,4
Отопление	Да	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да
Кондиционирование	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Стеклопакет	—	—	—	—	—	—	Да	Да	Да	Нет
Кол-во окон	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3
Кол-во дверей	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Кол-во внешних стен	1	0	3	1	1	0	1	2	2	2
Расположение	Московская обл., пос. Менделеево	Московская обл., пос. Менделеево	Московская обл., Зеленоград	Москва	Московская обл., пос. Льялово	Московская обл., Зеленоград	Московская обл., Зеленоград	Московская обл., пос. Льялово	Московская обл., пос. Льялово	Рязанская обл.
Назначение	Офис	Офис	Офис	Офис	Офис	Офис	Офис	Жилое	Жилое	Жилое
Год постройки	1960	1970	1980	1980	1970	1975	1975	2003	2003	1926
Этажность	3	6	9	9	4	2	2	3	3	1
Площадь основания, м ²	1150	1900	1200	1200	630	2000	2000	100	100	56
Асфальт вокруг*	Да	Нет	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет
Тип фундамента	Ленточный	Плита	Плита / Ленточный	Плита	Плита	Плита	Плита	Плита	Плита	Ленточный
Система вентиляции	Естеств.,	Естеств.,	Естеств.	Естеств.	Естеств.	Естеств.	Естеств.	Естеств.	Естеств.	Естеств.
Центр. отопление	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Нет
Центр. кондиционир.	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Материал стены	Кирпич	Бетон	Бетон	Бетон	Бетон	Кирпич	Кирпич	Кирпич	Кирпич	Кирпич
Материал пол (потолк)	Бетон	Бетон	Бетон	Бетон	Бетон	Бетон	Бетон	Бетон	Бетон	Дерево
Рельеф территории	Ровный	Ровный	Ровный	Ровный	Ровный	Ровный	Ровный	Ровный	Ровный	Ровный
Тип грунта	Глина	Глина	Песчаный суглинок	Песчаный суглинок	Глина	Глина	Глина	Глина	Глина	Песок/Суглин.
Проницаемость грунта	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая	Выше средней
Уровень грунт. вод, м	4	4	20	20	4	4	4	4	4	7
Глубина промерзания, м	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4
Темп. °С	+17,8	+17,8	+19,2	+19,2	+17,8	+17,8	+17,8	+17,8	+17,8	+19,5
Среднегодовая	+6,0	+6,0	+7,1	+7,1	+6,0	+6,0	+6,0	+6,0	+6,0	+4,6
Холодный месяц	-9,8	-9,8	-6,7	-6,7	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-9,8	-11,5
Ср. скорость ветра, м/с			2,3	2,3						2,0
Количество осадков, мм			700	700						500
Количество ясных дней			82	82						130

* – асфальт или другое твердое покрытие вокруг здания.

[Table 1

Characteristics of experimental rooms]

Code	ER 1	ER 2	ER 3	ER 4	ER 5	ER 6	ER 7	ER 8	ER 9	ER 10
Start of annual monitoring the radon concentration (EEC*)	20.10.2006	08.10.2009	20.10.2006 ; (02.10.2009)	02.10.2009	05.10.2009	21.09.2012	23.11.2012 (12.11.2012)	02.11.2011	02.11.2011	20.10.2011 (20.10.2011)
Radon device	AlphaGUARD	AlphaAERO	AlphaGUARD ; AlphaAERO	AlphaAERO	AlphaAERO	AlphaGUARD	RadonSCOUT AlphaAERO	RadonSCOUT	RadonSCOUT	RadonSCOUT AlphaAERO
Average annual level of radon concentration (EEC), Bq·m ⁻³	880	(69.2)	76.4 ; (34.5)	(55.0)	(43.4)	4703	96.1 ; (40.3)	72.2	210	101 ; (41.2)
Average temperature, °C	18.5	19.8	19.2 ; (20.4)	24.8	18.8	22.5	21.4	24.3	21.1	18.7
Floor	Attic	Basement	Basement	Basement	Basement	Basement	First	Ground	Ground	Ground
Function	Technical	Laboratory	Technical	Archive	Store	Radon room	Office	Kitchen	Library	Bedroom
Occupancy	No	Yes	Rarely	No	No	Rarely	Yes	Yes	Yes	No
Size, m	4×3.5×h3	12×10×h4	12×17×h(2-3.7)	6×2.5×h3.2	5×4.1×h3.1	3×3×h2.4	8×5.6×h3.2	3×5×h4	3×4×h3	4×3.6×h2.4
Heating	Yes	Yes	No	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes
Conditioning	No	Yes	No	No	No	No	No	No	No	No
Tight windows	-	-	-	-	-	-	Yes	Yes	Yes	No
Number of windows	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3
Number of doors	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Number of external walls	1	0	3	1	1	0	1	2	2	2
Location	Moscow region, Mendeleevo			Moscow		Moscow region, Zelenograd		Moscow region, Ljalovo		Ryazan region
Function	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Office	Residential	Residential	Residential
Year built	1960	1970	1980	1980	1970	1975	1975	2003	2003	1926
Stores number	3	6	9	9	4	2	2	3	3	1
Building area, m ²	1150	1900	1200	1200	630	2000	2000	100	100	56
Asphalt pavement **	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No
Foundation type	Slab	Slab	Slab / Band	Slab / Band	Slab	Slab	Slab	Slab	Slab	Band
Ventilation	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Central heating	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Central conditioning	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Material of walls	Brick	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Brick	Brick	Brick	Brick
Material of floors	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Concrete	Wood
Territory relief	Smooth	Smooth	Smooth	Smooth	Smooth	Smooth	Smooth	Smooth	Smooth	Smooth
Soil type	Clay	Clay	Sandy loam	Sandy loam	Clay	Clay	Clay	Clay	Clay	Sand and loam
Permeability	Low	Low	Middle	Middle	Low	Low	Low	Low	Low	Above-middle
Groundwater depth, m	4	4	20	20	4	4	4	4	4	7
Soil freezing depth, m	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.4
Temp, °C	+17.8	+17.8	+19.2	+19.2	+17.8	+17.8	+17.8	+17.8	+17.8	+19.5
Annual average	+6.0	+6.0	+7.1	+7.1	+6.0	+6.0	+6.0	+6.0	+6.0	+4.6
Coldest month	-9.8	-9.8	-6.7	-6.7	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-11.5
Average wind speed, m/s					2.3					2.0
Rainfall, mm					700					500
Clear days per year					82					130

* - EEC is the equilibrium equivalent concentration ; ** - the asphalt or other poorly permeable coating around the building.

В начале исследований с целью надежности выполнения годовых непрерывных мониторингов ОА радона в первых экспериментальных помещениях (ЭП 1, 3 и 4) параллельно с «AlphaGUARD» также выполнялись непрерывные измерения с помощью нестандартизованной установки, состоящей из детектора на основе камеры Лукаса, работающей в проточном режиме [3]. Результаты параллельных измерений показали надежность работы используемых радиометров, поэтому в дальнейшем при проведении следующих годовых мониторингов измерения не дублировались, тем более учитывая достаточно мягкие микроклиматические рабочие условия во всех экспериментальных помещениях.

Впервые были проведены непрерывные годовые измерения ЭРОА радона в режиме монитора благодаря применению радиометра «АльфаАЭРО». Период регистрации составлял 3 ч и начинался с прокачки воздуха через аэрозольный фильтр АФА-РСП-3 в течение 10 мин со скоростью 8 л/мин (еженедельно выполнялись замена фильтра и контроль работы детектора с помощью штатного точечного источника альфа-излучения). Измерение текущей активности фильтра выполнялось в режиме альфа-спектрометрии с учетом остаточной активности после предыдущих периодов работы. В «АльфаАЭРО» используется уникальный алгоритм расчета ЭРОА радона [4].

Поскольку $K_f(t)$ – безразмерная величина (см. Часть 1), определяемая как отношение текущих ОА (или ЭРОА) радона к СОА (или СЭА), то отсутствует необходимость учета систематической неопределенности измеряемой активности. Кроме того, учитывая, что измерения проводились в ЭП с повышенным содержанием радона, а период интегрирования при обработке результатов измерений составлял не менее 1 сут (табл. 2, исключая первую строку данных), статистическая неопределенность такой усредненной относительной активности не превышала нескольких процентов.

Результаты годовых мониторингов ОА и ЭРОА радона

Результаты годовых мониторингов ОА и ЭРОА радона в экспериментальных помещениях с периодом регистрации (усреднения) данных 3 ч приводятся на рисунке 2(а–в). Из этих рисунков видно, что все ЭП имели повышенный уровень радона. В большинстве случаев ОА и ЭРОА радона в летний период выше, чем в зимний. Даже при отсутствии людей в постоянно закрытых помещениях (ЭП 1, 3, 4, 10) наблюдались такие же существенные временные вариации ОА и ЭРОА радона, как и в помещениях ЭП 2, 7, 8, 9, которые эксплуатировались без каких-либо ограничений.

Из рисунка 2(а–в) видно, что частотные распределения ОА (или ЭРОА) радона не имеют общей закономерности (например, нормальной или логнормальной), а характер их временных вариаций в течение года в разных ЭП достаточно разнообразный. Тем не менее, несмотря на существенные отличия этих временных рядов, почти во всех случаях (кроме ЭП 5) наблюдается схожий характер непрерывного снижения во времени коэффициента $K_f(t)$, согласно рисункам 4 и 5.

Кроме того, поскольку в экспериментальных помещениях ЭП 7, 10 проводились одновременные мониторинги ОА и ЭРОА радона, на рисунке 3 приводятся временные вариации

фактора равновесия (отношение одновременно измеренных значений ОА и ЭРОА радона) по каждому из них.

Анализ результатов годового мониторинга в офисном помещении ЭП 7 производственного здания показывает, что ОА или ЭРОА радона в период выходных дней (суббота и воскресенье), когда здание закрыто и в нем нет людей, в среднем в 1,5–2,0 раза выше, чем в период осуществления производственного процесса (будние дни). Причем временные вариации как ОА, так и ЭРОА радона почти не отличались в абсолютном выражении между данными периодами. Соответственно, в относительном выражении вариации были ниже в 1,5–2,0 раза в период выходных. Также установлено, что средняя ОА радона в период только рабочего времени и круглосуточно в будние дни почти равны, но средняя ЭРОА радона примерно в 1,5 раза ниже в период рабочего времени, чем круглосуточно в будние дни.

В других ЭП подобные закономерности не обнаружены, т.к. ни в одном из них, включая ЭП 2, не было строгой цикличности интервалов разного пользования помещением и зданием.

Оценка временных вариаций ОА и ЭРОА радона

Оценка коэффициента временных вариаций ОА и ЭРОА радона выполнялась в соответствии с алгоритмом, подробно описанном в Части 1, на основе результатов годовых мониторингов (см. рис. 2), проводившихся в экспериментальных помещениях (см. табл. 1) при естественной вентиляции. Результаты такой оценки показаны на рисунке 4 (а, б) для случая одного измерения в течение года, а также на рисунке 5 (а, б), если в течение года проводились по 2 или 4 измерения с интервалом начала измерений 6 или 3 мес. соответственно. В подписях к рисунку 5 (а, б) при упоминании минимальной продолжительности одного из 2 или 4 измерений подразумевается, что длительность сезонных измерений (т.е. выполняемых в разное время года) может быть неодинаковой.

На рисунке 6 приводится зависимость коэффициента $K_f(t)$ от продолжительности непрерывных измерений в условиях естественной вентиляции помещений с учетом температурного влияния (см. Часть 1). Сравнение этой зависимости с рисунком 5 (а, б) показывает, что благодаря учету температурного влияния табличные значения $K_f(t)$ снижаются почти в 2 раза. Однако такое существенное снижение $K_f(t)$ наблюдается лишь при определенных условиях: стабильный источник радона, окна и двери постоянно закрыты, продолжительность измерений не превышает 2 недели. Расчетные исследования показывают, что учет температурного влияния не дает значимого эффекта, если выполняются долгосрочные измерения либо несколько измерений проводятся в разные сезоны года.

В случае ЭП 5 значения $K_f(t)$ не были приняты во внимание, т.к. оказались несопоставимо высокими вследствие аварийного состояния подвала в здании, о чем указывалось ранее. Тем не менее, это тоже полезный опыт, который обсуждается в следующем разделе.

Надежность контроля радона в зданиях гарантируется за счет реализации предложенного в Части 1 принципа контроля на основе экспериментально определенных значений $K_f(t)$. В таблице 2 приводятся табличные значения $K_f(t)$ в отношении вариаций ОА и ЭРОА радона в зависимости от продолжительности и режима измерений

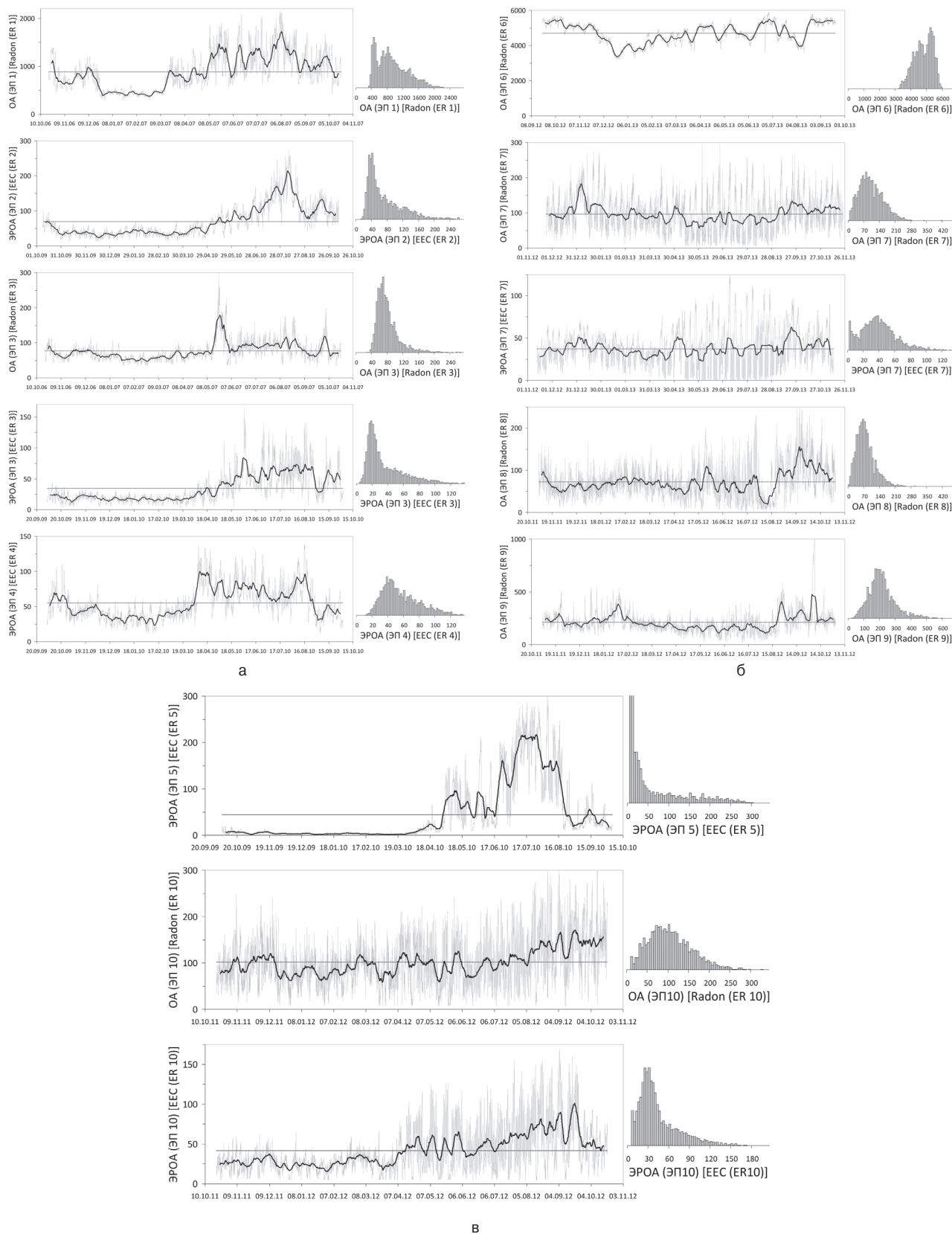


Рис. 2. Результаты годовых мониторингов ОА и ЭРОА радона (Бк/м³) в экспериментальных помещениях ЭП 1–4 (а), ЭП 6–9 (б) и ЭП 5, 10 (в), а также недельные тренды (толстая кривая), СОА или СЭА (тонкая линия) и частотные распределения результатов измерений в соответствующих ЭП [2]

[Fig. 2.] The results of annual monitoring of the radon activity concentration (Bq/m³) and EEC (equilibrium equivalent concentration in Bq/m³) in the experimental rooms ER 1-4 (a), ER 6-9 (b) and ER 5, 10 (c), the weekly trends (thick lines), AAIR levels (thin lines) and the patterns of the measurement results' distributions [2]

в условиях естественной вентиляции помещений, также учитывая температурное влияние. Однако необходимо принимать во внимание, что данные, таблице 2 были получены на относительно ограниченном экспериментальном материале, поэтому они должны подлежать верификации и при необходимости уточняться. Эта проблема более подробно обсуждается в последнем разделе.

Обсуждение результатов

Достаточно интересными и важными являются результаты годового мониторинга фактора равновесия в двух экспериментальных помещениях (ЭП 7 и 10), согласно рисунку 3. Как видно из рисунка, во-первых, временные вариации не истинного, а инструментально определяемого фактора равновесия в экспрессном режиме являются чрезвычайно высокими. Даже недельный тренд фактора равновесия, независимо от характера эксплуатации помещений (см. табл. 1), тоже отличается значительными вариациями. Во-вторых, в отапливаемом помещении ЭП 10 жилого одноэтажного дома (но без жильцов) наблюдались ярко выраженные сезонные вариации фактора равновесия. Поэтому контроль фактора равновесия в краткосрочном и даже долгосрочном режимах не имеет смысла, т.к. не способствует уточнению ни степени влияния воздухообмена на радоновую обстановку в помещении, ни оценки индивидуальных или коллективных доз облучения от радона. При оценке доз наибольшая точность будет достигаться, если использовать наиболее вероятное значение фактора равновесия, равное 0,4 [5], либо 0,5 (согласно МУ 2.6.1.2838-11)¹ с некоторым запасом надежности, что также подтверждается результатами нашего предыдущего исследования [6].

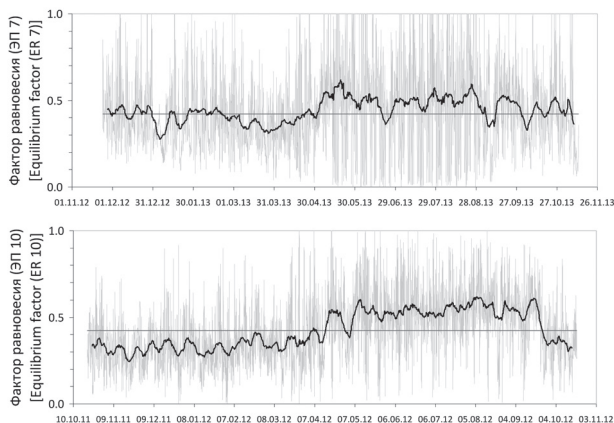


Рис. 3. Временные вариации фактора равновесия в двух экспериментальных помещениях (ЭП 7, 10), а также недельные тренды (толстая кривая) и среднегодовые значения (тонкая линия) [2]

[Fig. 3. Temporal variations of equilibrium factor in two experimental rooms (ER 7, 10), the weekly trends (thick lines) and annual average values (thin lines) [2]]

Вышеизложенные соображения и утверждения в полной мере относятся к помещениям с естественной вентиляцией. Однако вследствие работы механической вентиляции фактор равновесия может существенно снижаться, принимая значения 0,2 и ниже, что характерно для помещений зданий в основном производственного или общественного типа. Скорее всего, при стабильной работе вентиляции с увеличением ее мощности можно ожидать, что $K_V(t) \rightarrow 0$. В этом случае целесообразно ограничиться лишь краткосрочным измерением ЭРОА радона либо в экспрессном режиме, либо в режиме монитора в течение нескольких сут, что требует уточнения. Поэтому необходимо изучение характера и амплитуды временных вариаций ЭРОА и объемной активности радона в условиях стабильной работы механической вентиляции для проверки справедливости предположения, что $K_V(t) \rightarrow 0$. В случае производств, связанных с техногенными нестабильными источниками радона, для организации контроля необходима разработка специальных подходов и методов, учитывающих специфику производства.

Анализ зависимости коэффициента $K_V(t)$ от продолжительности и режима, а также других условий измерений, согласно таблице 2, приводит к следующим соображениям.

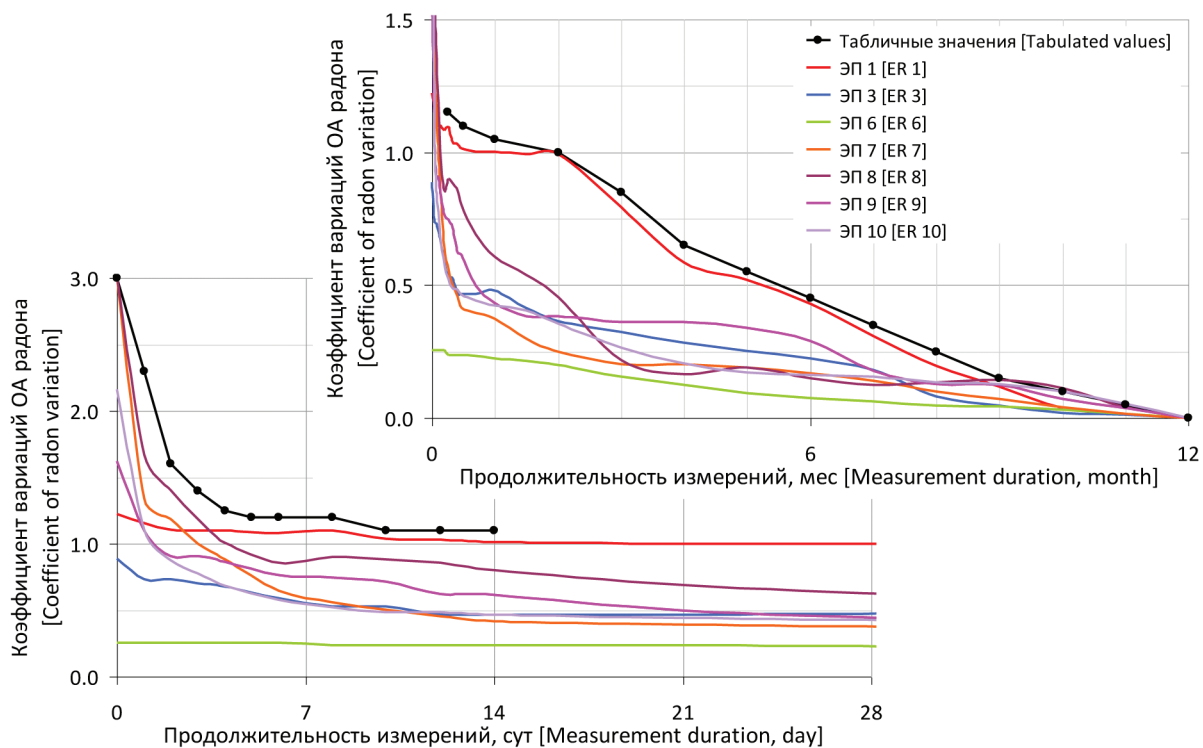
Временные вариации ЭРОА радона выше, чем вариации ОА радона в среднем на 20–60% в связи с дополнительным влиянием на ЭРОА таких факторов, как осаждение дочерних продуктов распада радона на поверхностях в помещении, включая человека, а также их дополнительный сток (удаление) за счет воздухообмена. В то же время если проводятся 4 измерения в разные сезоны, то вариации ОА и ЭРОА радона в среднем равны, как это можно видеть в последнем столбце таблицы 2.

Значительное, почти двукратное снижение коэффициента $K_V(t)$ достигается за счет учета температурного влияния, согласно рисунку 7. Однако такой подход возможен только в период краткосрочных измерений и лишь для помещений определенного типа, что может существенно ограничивать его практическое применение. Тем не менее, несмотря на целый набор ограничений, учет температурного влияния, как было показано в Части 1, может применяться в значительной доле зданий на территории России.

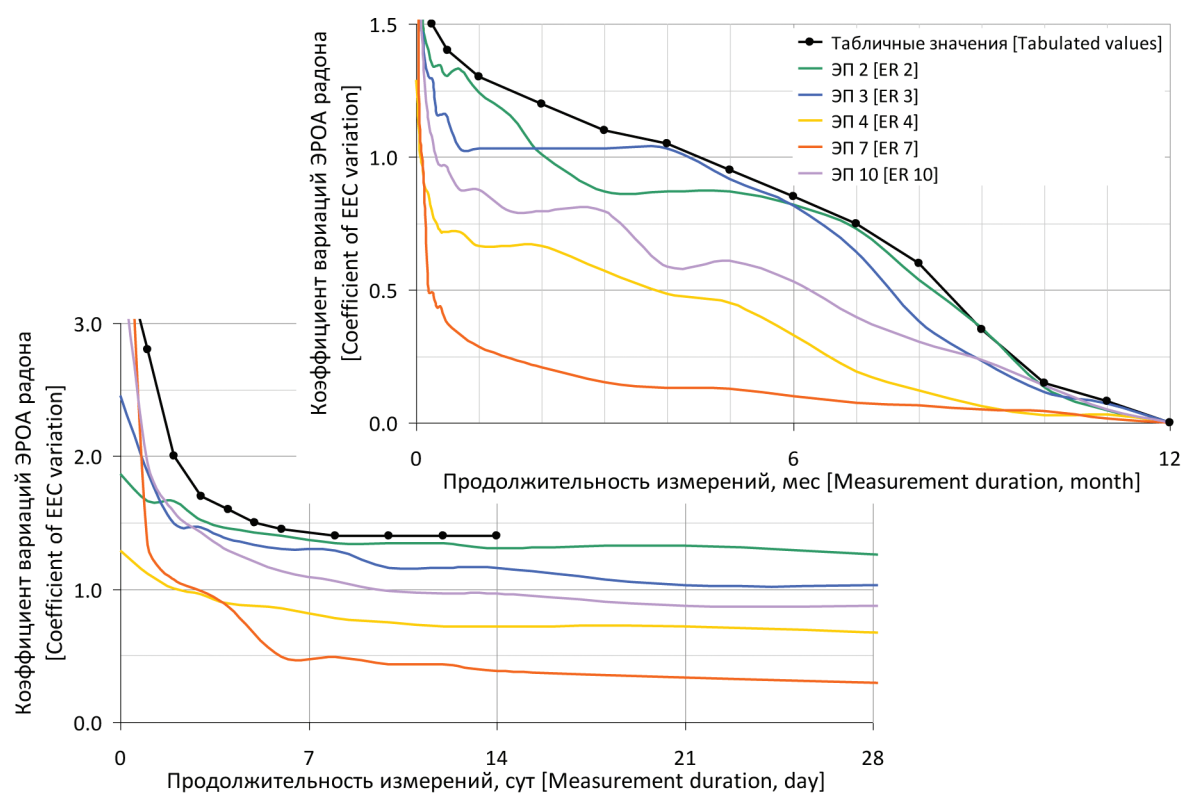
Возможно, табличные данные в отношении вариаций ОА радона при непрерывных измерениях в интервале от 1 до 8 мес. могут быть завышены (см. табл. 2), поскольку значения $K_V(t)$ для экспериментального помещения ЭП 1 в этот период существенно выше, чем в других экспериментальных помещениях, согласно рисунку 4(а). Такая разница может объясняться тем, что существенное снижение ОА радона в ЭП 1 (закрытая и отапливаемая комната на чердаке со стабильным источником радона) в холодный период, обусловленное увеличением естественного воздухообмена [3], не компенсируется за счет увеличения эксхалляции почвенного радона внутрь здания. Тем не менее, мы предпочитаем консервативный подход в условиях ограниченного экспериментального материала.

Согласно рисункам 4 и 7, значительное снижение $K_V(t)$ в основном наблюдается в течение первых 7–10 сут непре-

¹ Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности. Утв. 28.01.2011. взамен МУ 2.6.1.715-98. [Methodical guidance MU 2.6.1.2838-11. Radiation control and sanitary-epidemiological assessment of residential, public and industrial buildings and constructions after the completion of construction, general overhaul, renovation on the indicators of radiation safety. Approved 28.01.2011].



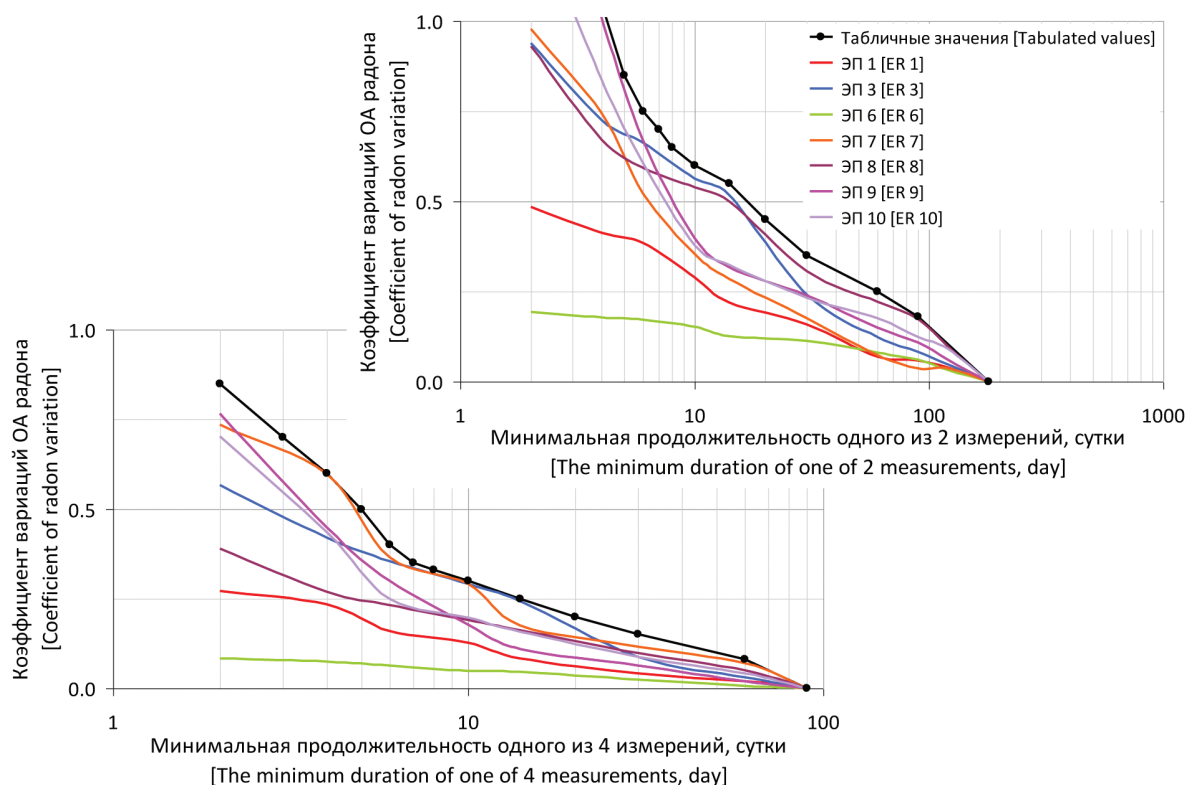
(a)



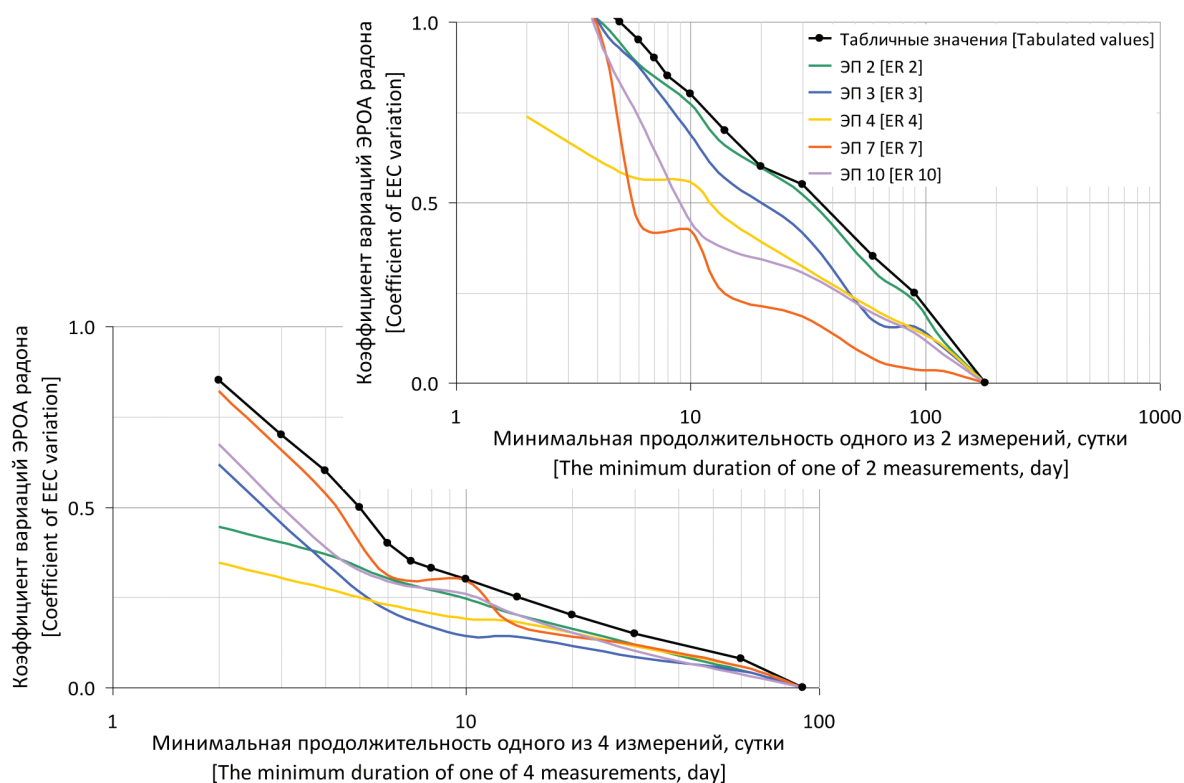
(b)

Рис. 4. Зависимость коэффициента временных вариаций ОА (а) и ЭРОА (b) радона от продолжительности непрерывных измерений в экспериментальных помещениях (ЭП) [2]

[Fig 4. Dependence of the coefficients of temporal variations of radon (a) and EEC (b) on the durations of continuous measurements in the experimental rooms (ER) [2]]



(a)



(b)

Рис. 5. Зависимость коэффициента временных вариаций ОА (а) и ЭРОА (б) радона от минимальной продолжительности одного из 2 или 4 измерений в экспериментальных помещениях (ЭП) с интервалом 6 или 3 мес. соответственно [2]
[Fig. 5.] Dependence of the coefficients of temporal variations of radon (а) and EEC (б) on the minimum duration of one of 2 (top) and 4 (bottom) measurements in the experimental rooms (ER) with an interval of 6 or 3 months, respectively [2]

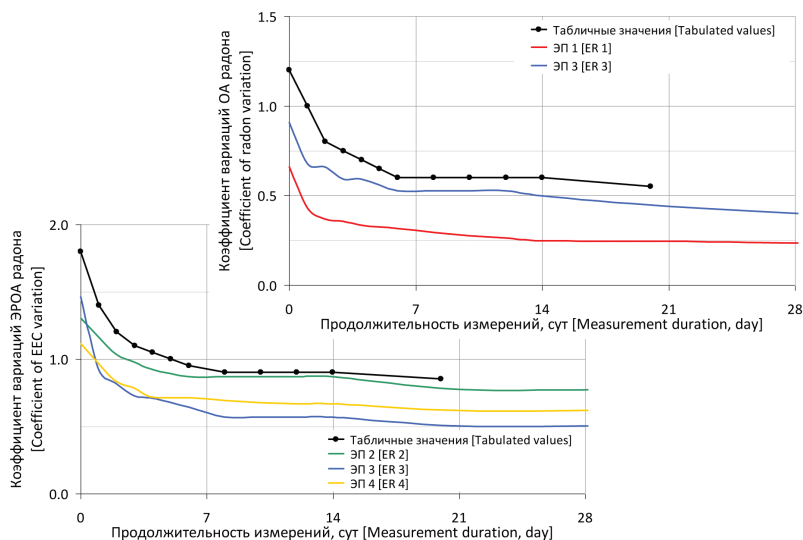


Рис. 6. Зависимость коэффициента временных вариаций ОА и ЭРОА радона от продолжительности непрерывных измерений в экспериментальных помещениях ЭП 1–4 (с постоянно закрытыми дверями и окнами и стабильным источником радона) с учетом температурного влияния

[Fig. 6. Dependence of the coefficient of temporal radon and EEC variation on the duration of continuous measurements in the experimental rooms ER 1-4 (at closed doors and windows, and a stable source of radon) taking into account the temperature effect]

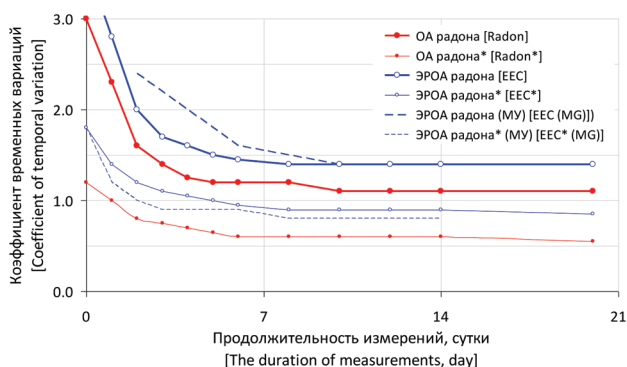


Рис. 7. Сравнение уточненных в данной работе табличных значений коэффициента временных вариаций ОА и ЭРОА радона с данными МУ 2.6.1.037-2015² (* учитывалось температурное влияние)

[Fig. 7. A comparison of précised tabulated values of the coefficients of temporal variation of radon and EEC in this study with the data from MG 2.6.1.037-2015² (* taking into account the temperature effect)]

рывных измерений. Затем в течение следующих нескольких недель и почти до 2 мес. измерений $K_v(t)$ снижается незначительно, например от 1,1 (110%) до 1,0 (100%) в отношении ОА радона (см. табл. 2). Поэтому краткосрочными целесообразно считать измерения, продолжительность которых не превышает 10 сут. Важно отметить, что поскольку в период краткосрочных измерений значения $K_v(t)$ остаются достаточно высокими (более 1,0 (100%) по

таблице 2), то не имеет смысла в этот период выполнять измерения ОА или ЭРОА радона с высокой точностью.

Проведение долгосрочных измерений продолжительностью от 2 мес. до 1 года не всегда эффективно из-за медленного снижения коэффициента $K_v(t)$ во времени, согласно таблице 2. Поэтому в определенных случаях целесообразно выполнение 2 или 4 измерений в разные сезоны года. Например, снижение значений $K_v(t)$ до уровня 0,25 (25%) достигается путем 2 или 4 измерений продолжительностью 2 мес. или 2 недели соответственно, причем тот же самый уровень точности ($K_v(t)=0.25$) достигается при непрерывном измерении продолжительностью 8 мес. Увеличение продолжительности или количества измерений для снижения значений $K_v(t)$ ниже 0,25 нецелесообразно, т.к. существуют межгодовые вариации СОА и СЭА радона в помещениях. В среднем амплитуда межгодовых вариаций СОА радона оценивается в диапазоне от 14% [7] до 26% [8] при максимальных значениях около 40% [9, 10] и даже 53% [11].

По нашему мнению, значительные межгодовые вариации СОА радона могут объясняться образованием новых трещин и отслоением изоляции в фундаментах зданий за счет старения материалов и деформаций грунтового основания, особенно в условиях повышенной сейсмической либо локальной геодинамической активности территории. Кроме того, подобные геологические процессы, по сравнению с естественным воздухообменом в зданиях, отличаются большей временной нестабильностью в долгосрочных интервалах (полуго-

² Методические указания МУ 2.6.1.037-2015. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности. Утв. 14.05.2015. 40 с. [Methodical guidelines MG 2.6.1.037-2015. Estimation of the average annual of equilibrium equivalent concentration of radon isotope in the air of housings based on the measurements of different duration. Approved 14.05.2015. 40 p.].

Таблица 2

Табличные значения коэффициента временных вариаций ОА (ЭРОА) радона в зависимости от продолжительности и режима измерений в условиях естественной вентиляции помещений с учетом и без учета температурного влияния

[Table 2

Table values of the temporal variation coefficient of the radon activity concentration (equilibrium equivalent concentration) depending on the duration and mode of measurements in natural ventilation conditions with and without consideration of the temperature impact]

Длительность измерения (минимальная, если несколько измерений) [Duration of the measurements (minimal if several measurements were performed)]	Одно непрерывное измерение [One continuous measurement]	Два измерения с интервалом начала 6 мес. (± 1 месяц) [Two measurements with an interval of the beginning of 6 months (± 1 month)]	Четыре измерения с интервалом начала 3 мес. (± 2 недели) [Four measurements with an interval of the beginning of 3 months (± 2 weeks)]		
	С учетом температурного влияния*. ** [Considering temperature impact]	Без учета температурного влияния (за исключением помещений с постоянно действующей механической вентиляцией, где $K_{\nu}(t) \rightarrow 0$) [Without considering the temperature impact (excluding the housings with constantly operating mechanical ventilation with $K_{\nu}(t) \rightarrow 0$)]			
От 1 мин до 4 ч [1 minute to 4 hours]	1,2 (1,8)	3,0 (3,6)*	–	–	
Сутки [Day]	1	1,00 (1,40)	2,30 (2,80)	–	–
	2	0,80 (1,20)	1,60 (2,00)	1,60 (1,60)	0,85 (0,85)
	3	0,75 (1,10)	1,40 (1,70)	1,30 (1,30)	0,70 (0,70)
	4	0,70 (1,05)	1,25 (1,60)	1,05 (1,05)	0,60 (0,60)
	5	0,65 (1,00)	1,20 (1,50)	0,85 (1,00)	0,50 (0,50)
	6	0,60 (0,95)	1,20 (1,45)	0,75 (0,95)	0,40 (0,40)
	7	0,60 (0,95)	1,20 (1,45)	0,70 (0,90)	0,35 (0,35)
	8	0,60 (0,90)	1,20 (1,40)	0,65 (0,85)	0,33 (0,33)
	10	0,60 (0,90)	1,10 (1,40)	0,60 (0,80)	0,30 (0,30)
	12	0,60 (0,90)	1,10 (1,40)	0,58 (0,75)	0,28 (0,28)
	14	0,60 (0,90)	1,10 (1,40)	0,55 (0,70)	0,25 (0,25)
	20	0,55 (0,85)	1,10 (1,40)	0,45 (0,60)	0,20 (0,20)
Месяц [Month]	1	–	1,05 (1,30)	0,35 (0,55)	0,15 (0,15)
	2	–	1,00 (1,20)	0,25 (0,35)	0,08 (0,08)
	3	–	0,85 (1,10)	0,18 (0,25)	0
	4	–	0,65 (1,05)	0,12 (0,18)	–
	5	–	0,55 (0,95)	0,06 (0,08)	–
	6	–	0,45 (0,85)	0	–
	7	–	0,35 (0,75)	–	–
	8	–	0,25 (0,60)	–	–
	9	–	0,15 (0,35)	–	–
	10	–	0,10 (0,15)	–	–
	11	–	0,05 (0,08)	–	–
	12	–	0	–	–

* — только для помещений с заранее и впоследствии закрытыми дверями и окнами [only for the housings with doors and windows closed in advance and afterwards];

** – только для помещений со стабильным источником радона (например, помещения выше второго этажа в многоэтажных зданиях, когда основным источником радона являются строительные материалы) [only for the housings with a stable source of radon (for example, housings above 2nd floor in multi-storey buildings when the main source of radon is from construction materials)].

дие, год и более). Тем более геологические явления, как и деградация фундамента, – это обычно скрытые процессы, снижающие надежность контроля радона в зданиях. Поэтому в регионах с нестабильными геологическими условиями необходимо выполнять измерения в разные сезоны года. Отметим, что два дополни-

тельных сезонных измерения, выполненных в течение следующего года, с учетом двух измерений в другие сезоны предыдущего года, могут рассматриваться как 4 сезонных измерения в течение одного года.

В то же время любые детектируемые и визуально распознаваемые факторы, влияющие на временные ва-

риации радона в зданиях, должны учитываться при проведении контроля. Гидрогеологическое состояние грунта в основании здания является одним из наиболее важных факторов такого влияния. Если грунт под зданием насыщен влагой, тем более если в подвале присутствует вода, то перенос радона из грунта внутрь здания практически отсутствует, как это видно на примере ЭП 5 (см. рис. 2 (в)). В этом помещении после снижения уровня грунтовых вод ЭРОА радона увеличивается по мере высыхания грунтового основания, достигая сверх нормативного уровня за счет интенсивного испарения влаги из эманулирующего грунта. В подобных случаях, проведение радонового контроля не имеет смысла, т.к. помещение или даже само здание находится в аварийном состоянии.

Репрезентативность и верификация результатов

Важной проблемой является репрезентативность данных, представленных в таблице 2. Результаты годовых мониторингов (см. рис. 2) показывают довольно разнообразное поведение радона в помещениях. Эти данные были получены в 10 экспериментальных помещениях в 7 зданиях, расположенных в пределах территории с почти однородной геологией и климатом. На первый взгляд, такое количество экспериментальных помещений в нашем исследовании не кажется представительным, по сравнению, например, с работой [12], охватывавшей 62 здания, либо с исследованиями [13] или [14] при охвате 132 и даже 390 зданий соответственно. Однако данные таблицы 3 свидетельствуют о вполне удовлетворительной сходимости результатов нашего исследования с результатами [12], если параметром для сравнения является коэффициент вариаций (КВ) радона в помещениях. В этом отношении представительность набора наших экспериментальных помещений близка к представительности набора из 62 зданий в исследовании [12]. В то же время такое сравнение не является достаточной гарантией репрезентативности полученных данных и поэтому

не отменяет необходимости верификации и уточнения результатов нашего исследования. Необходимо уточнить, что в таблице 3 приводятся значения КВ только с целью анализа репрезентативности результатов нашего исследования, но не для практического использования (см. Часть 1).

Возможно, по отдельности экспериментальные помещения выглядят не совсем представительно (5 подвалов из 10 помещений), но совокупность или набор ЭП в целом вполне представительны, поскольку имеют широкий охват по следующим характеристикам, согласно таблице 1:

- диапазон СОА радона составляет почти два порядка величины;
- источник радона (только грунт, грунт и стройматериалы, только стройматериалы за счет имитации искусственным источником в ЭП 1, 6);
- этаж (от подвала до чердака) и этажность зданий (от 1 до 9);
- назначение (технические, офисные и жилые помещения в производственных и жилых зданиях);
- режим эксплуатации (все закрыто и без людей либо эксплуатируется без ограничений при постоянном присутствии людей);
- размер помещений (от 3×3×2,4 до 12×17×3 м) и площадь зданий (от 56 до 2000 м²);
- наличие окон и внешних стен (имеются в разном количестве или отсутствуют);
- строительные материалы (дерево, кирпич, бетонные плиты) и конструкция фундамента (ленточный или монолит);
- год постройки здания (от 1926 до 2003 г.).

Таким образом, качественные признаки, несмотря на относительно небольшое количество экспериментальных помещений, свидетельствуют о вполне удовлетворительной представительности их совокупного набора, но в пределах одного региона с почти однородной геологией и климатом. Поэтому верификацию данных таблице 2 це-

Сравнение коэффициентов вариаций (КВ) по результатам нашего исследования с результатами [12], в зависимости от продолжительности измерений [2]

Таблица 3

Comparison of the variation coefficients from the current study with the results of [12] considering on the duration of the measurements [2]

[Table 3

Продолжительность непрерывного измерения [Duration of the continuous measurement]	Среднее значение КВ по 7 экспериментальным помещениям (ЭП 1, 3, 6–10), в которых выполнялся мониторинг ОА радона (исключая ЭП 6)* [Mean value of the variation coefficient based on the seven experimental rooms (ER 1,3,6-10) where volume activity of radon was monitored (excluding ER 6)]	Согласно данным D.J. Steck и др. [12] (режим эксплуатации помещения) [According to D.J. Steck et. al. [12] (operating mode of the housing)]
2 сут [2 days]	0,66 (0,73)	0,76 (все закрыто) [(closed)]
4 сут [4 days]	0,59 (0,65)	0,70 (все закрыто) [(closed)]
1 мес. [1 month]	0,44 (0,48)	0,40 (обычный режим) [(normal)]
3 мес. [3 months]	0,31 (0,34)	0,30 (обычный режим) [(normal)]
4 мес. [4 months]	0,27 (0,29)	0,25 (обычный режим) [(normal)]
6 мес. [6 months]	0,18 (0,19)	0,17 (обычный режим) [(normal)]

* — ЭП 6 отличается очень низким (не характерным) воздухообменом [ER 6 has a very low (non-typical) air exchange rate].

лесообразно выполнить на основе результатов годовых непрерывных мониторингов ОА радона в экспериментальных помещениях других зданий, расположенных в регионах с другим климатом и иными геологическими условиями, по сравнению с Московским регионом. По нашему мнению, наиболее подходящими регионами для такой верификации могут быть, например, Северный Кавказ, а также Алтай и Забайкалье. Ландшафт и геология этих регионов характеризуются в основном горным рельефом, трещиноватыми породами и достаточно проницаемым грунтом, что существенно отличается от геологии Московского региона, как и сам климат.

В заключение хотелось бы отметить, что опыт авторов подсказывает, что по результатам верификации, даже в иных климатических и геологических условиях, уточненные табличные значения коэффициента $K_{\nu}(t)$ могут лишь незначительно отличаться от данных таблицы 2. Тем не менее, необходимо экспериментальное подтверждение.

Заключение

В период с 2006 по 2013 г. были проведены полные годовые мониторинги ОА и ЭРОА радона в 10 экспериментальных помещениях с повышенным содержанием радона в условиях естественной вентиляции. Эти помещения находились в 7 зданиях, в основном расположенных в Московском регионе. Обработка данных этих мониторингов с помощью оригинального алгоритма, представленного в Части 1, позволила получить ряд важных результатов:

1. Определены табличные значения коэффициента временных вариаций ОА и ЭРОА радона в зависимости от продолжительности и режима измерений (2 или 4 измерения в разные сезоны года), а также с учетом и без учета температурного влияния (см. табл. 2).

2. Учет температурного влияния позволяет снизить табличные значения $K_{\nu}(t)$ почти в 2 раза. Хотя применение такого учета имеет весьма существенные ограничения, тем не менее, он может применяться в значительной доле зданий на территории России (см. Часть 1).

3. По предварительным данным, ОА или ЭРОА радона в закрытых зданиях без присутствия людей в среднем в 1,5–2,0 раза выше, чем в условиях обычной эксплуатации. Кроме того, средняя ОА радона в период только рабочего времени и круглосуточно в будние дни почти равны, однако ЭРОА радона примерно в 1,5 раза ниже в период рабочего времени, чем круглосуточно в будние дни.

4. Временные вариации ЭРОА радона обычно выше, чем вариации ОА радона в среднем на 20–60%. Поэтому измерения ЭРОА вместо объемной активности радона, как и попытка инструментальной оценки фактора равновесия, не способствуют повышению надежности контроля радона в помещениях с естественной вентиляцией.

Видимо, измерения ЭРОА радона целесообразны лишь в помещениях производственных и общественных зданий в условиях стабильной работы мощной вентиляционной системы, когда $K_{\nu}(t) \rightarrow 0$, что, однако, требует экспериментального подтверждения.

5. Краткосрочными следует считать измерения, продолжительность которых не превышает 10 сут, поскольку лишь в этот период наблюдается резкое снижение коэффициента $K_{\nu}(t)$. Тем не менее, в этот период значения $K_{\nu}(t)$

все равно остаются достаточно высокими (неопределенность выше 100%), поэтому не имеет смысла выполнять краткосрочные измерения ОА или ЭРОА радона с высокой точностью.

6. Принимая во внимание существование межгодовых вариаций СОА радона в помещениях, нецелесообразно увеличивать продолжительность или количество сезонных измерений с целью снижения значений $K_{\nu}(t)$ ниже 0,25. В то же время при нестабильных геологических условиях необходимо выполнять несколько измерений в разные сезоны года. Кроме того, важно контролировать гидрогеологическое состояние грунтового основания здания, а также состояние его фундамента и изолированности коммуникационных каналов.

7. Несмотря на ограниченный экспериментальный материал, представительность результатов исследования оценивается на вполне удовлетворительном уровне. Тем не менее, полученные табличные значения коэффициента $K_{\nu}(t)$ должны подлежать верификации и при необходимости уточняться на основе дальнейшего накопления экспериментальных данных, учитывая рекомендации авторов в заключительном разделе.

8. Применение табличных значений коэффициента $K_{\nu}(t)$ позволяет надежно оценивать неопределенность СОА (или СЭА) радона и корректно выполнять сравнение определяемых среднегодовых значений с нормативным уровнем, согласно представленному в Части 1 принципу, как на стадии приемки, так и в эксплуатируемых зданиях. Кроме того, открывается возможность для разработки на научной основе (т.е. используя строгие алгоритмы и количественные критерии) универсальной стратегии массового контроля и эффективного выявления зданий с высоким уровнем радона.

Исследование было выполнено в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» при финансовой поддержке ФМБА России, а также при участии сотрудников Федерального центра Роспотребнадзора, Научно-исследовательского института строительной физики, ООО «НТЦ Амплитуда» и ООО «Институт «Рязаньграводпроект»».

Литература

1. Цапалов, А.А. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 1. Проблема оценки содержания радона и современный принцип контроля / А.А. Цапалов [и др.] // Радиационная гигиена. – 2018. – Т.11, № 1 (в печати).
2. Tsapalov, A., Kovler, K., 2018. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. Journal of Environmental Radioactivity 183, 59–72.
3. Цапалов, А.А. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха / А.А. Цапалов, С.И. Кувшинников // АНРИ. – 2008. – № 2. – С. 37–43.
4. Цапалов, А.А. Оценка среднегодового уровня ЭРОА радона в помещениях на основе результатов краткосрочных измерений радиометром «АльфаАЭРО» / А.А. Цапалов // АНРИ. – 2008. – № 3. – С. 49–58.
5. 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).

6. Цапалов, А.А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона / А.А. Цапалов // АНРИ. – 2011. – № 3(66). – С. 52–64.
7. Bochicchio, F. [et al.]. 2009. Results of the first 5 years of a study on year-to-year variations of radon concentration in Italian dwellings. *Radiation Measurements* 44 (9-10), 1064–1068.
8. Steck, D. 2009. Annual average radon variation over two decades. *Health Physics* 96 (1), 37–47.
9. Hunter, N., [et al.]. 2005. Year-to-year Variations in Radon Levels in a Sample of UK Houses with the Same Occupants. Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VII). In: *Radioactivity in the Environment Book Series*, Vol. 7. Elsevier, pp. 438–447.
10. Lubin, J. [et al.]. 2005. Adjusting lung cancer risk for temporal and spatial variations in radon concentration in dwellings in Gansu province, China. *Radiation Research*. 163 (5), 571–579.
11. Darby, S., [et al.]. 1998. Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study. *British Journal of Cancer* 78 (3), 394–408.
12. Steck, D. [et al.]. 2004. Indoor radon exposure uncertainties caused by temporal variation. In: 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, Spain, ISBN 84-87078-05-2.
13. Kozak, K. [et al.]. 2011. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. *Applied Radiation and Isotopes* 69 (10), 1459–1465.
14. Ruano-Ravina, A. [et al.]. 2008. Short-versus long-term radon detectors: a comparative study in Galicia, NW Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (7) 1121–1126.

Поступила: 17.01.2018 г.

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

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

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

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

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

Янкин Александр Сергеевич – заведующий лабораторией радиационного контроля ООО «Институт «Рязаньагропроект»», Рязань, Россия

Для цитирования: Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М., Ковлер К.Л., Кувшинников С.И., Янкин А.С. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 2. Экспериментальная оценка неопределенности временных вариаций радона // *Радиационная гигиена*. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 64-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-64-79.

Uncertainty of the results of the radon control in housings. Part 2. Experimental assessment of the temporal variations of radon

Andrey A. Tsapalov¹, Sergey M. Kiselev², Albert M. Marennyy³, Konstantin L. Kovler⁴, Sergey I. Kuvshinnikov⁵,
Alexander S. Yankin⁶

¹Institute of mineralogy, geochemistry and crystal chemistry of rare elements, Moscow, Russia

²Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

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

Andrey A. Tsapalov

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

⁴Israel technological university «Technion», Haifa, Izrael

⁵Federal center of hygiene and epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

⁶Institute «Ryazanagrovodproject», Ryazan, Russia

The first part of the paper was devoted to a detailed investigation of the problems of radon control in buildings as well as to the description of the accurate principle of radon control on housings, which is based on the new parameter – temporal variation coefficient $KV(t)$. This coefficient equalizes the main component of the uncertainty of the average annual level of radon depending on the protocol and duration of measurements. Additionally, a novel algorithm for the estimation of $KV(t)$ is proposed, developed on the base of the results of continuous annual radon monitoring in representative experimental housings. This part of the paper is focused on the results of the annual continuous monitoring of volume activities of radon and its daughter products in ten experimental housings in 2006–2013. These housings were located in seven buildings mainly in the Moscow region. All the experimental buildings have the detailed description. The use of original algorithm of the processing of the results of annual monitoring allowed estimating particular and table values of $KV(t)$ co-efficient, depending on the protocol and duration of the measurements. The values of the coefficient are lower up to a factor of two if the temperature is considered. However, the possibility of such consideration is significantly limited by the number of factors. Additionally, an importance of considering a geological factor is discussed. Evaluation of the representativeness of the data obtained and the method for verification and elaboration of the table values of $KV(t)$ are provided as well. Based on the results obtained, there is a possibility for the development of the approaches in the field of sanitary-epidemiologic surveillance in the field of practical realization of the strategy of mass radon control and effective identification of buildings with increased radon levels.

Key words: Radon, volume activity, equivalent activity, temporal variation coefficient, corrective coefficient, uncertainty, experimental housing, monitoring.

References

1. Tsapalov A.A., Kiselev S.M., Marennyy A.M., Kovler K.L., Kuvshinnikov S.I. Uncertainty of the results of the radon control in housings. Part 1 – The problem of assessment of the radon concentration and modern control principles. Radiatsionnaya ghygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, No. 1 (In the press) (In Russian).
2. Tsapalov, A., Kovler, K., 2018. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. Journal of Environmental Radioactivity 183, 59–72.
3. Tsapalov A.A., Kuvshinnikov S.I. Dependence of the radon volume activity in housings on the difference in inside and outside air temperatures. ANRI = ASAP, 2008, №2, pp. 37-43. (In Russian).
4. Tsapalov A.A. Assessment of the average annual level of radon equivalent equilibrium volume activity, based on the results of shortscale measurements using radiometer «AlphaAERO». ANRI = ASAP, 2008, №3, pp 49-58. (In Russian).
5. 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).
6. Tsapalov A.A. results of the long-scale evaluation of the trends of the behavior of radon volume activity and equivalent equilibrium volume activity in buildings in Moscow region. ANRI, 2001, №3(66), pp. 52-64. (In Russian).
7. Bochicchio, F. [et al.]. 2009. Results of the first 5 years of a study on year-to-year variations of radon concentration in Italian dwellings. Radiation Measurements 44 (9-10), 1064–1068.
8. Steck, D. 2009. Annual average radon variation over two decades. Health Physics 96 (1), 37–47.
9. Hunter, N., [et al.]. 2005. Year-to-year Variations in Radon Levels in a Sample of UK Houses with the Same Occupants. Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VII). In: Radioactivity in the Environment Book Series, Vol. 7. Elsevier, pp. 438–447.
10. Lubin, J. [et al.]. 2005. Adjusting lung cancer risk for temporal and spatial variations in radon concentration in dwellings in Gansu province, China. Radiation Research. 163 (5), 571–579.
11. Darby, S., [et al.]. 1998. Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study. British Journal of Cancer 78 (3), 394–408.
12. Steck, D. [et al.]. 2004. Indoor radon exposure uncertainties caused by temporal variation. In: 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, Spain, ISBN 84-87078-05-2.
13. Kozak, K. [et al.]. 2011. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. Applied Radiation and Isotopes 69 (10), 1459–1465.
14. Ruano-Ravina, A. [et al.]. 2008. Short-versus long-term radon detectors: a comparative study in Galicia, NW Spain. Journal of Environmental Radioactivity, 99 (7) 1121–1126.

Received: January 17, 2018

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

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

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

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

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

Alexander S. Yankin – engineer, Head of Laboratory of Radiation Control, «Institute «Ryazanagrowaterproject» Ltd., Ryazan, Russia

For citation: Tsapalov A.A., Kiselev S.M., Marennyy A.M., Kovler K.L., Kuvshinnikov S.I., Yankin A.S. Uncertainty of the results of the radon control in housings. Part 2. Experimental assessment of the temporal variations of radon. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, No. 1, pp. 64-79. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-64-79.