

С.М. Киселев¹, Ю.Н. Зозуль¹, В.В. Шлыгин¹, А.М. Маренный²,
А.Н. Малахова¹, С.В. Ахромеев¹, Ф.Ф. Файзрахманов³

РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ДЕТСКИХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ г. СНЕЖИНСКА

¹ Федеральное медицинское биофизическое центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

² Научно-технический центр радиационно-химической безопасности гигиены ФМБА России, Москва

³ Центр гигиены и эпидемиологии № 15 ФМБА России, Челябинская область, Снежинск

Контактное лицо: Сергей Михайлович Киселев, e-mail: sergbio@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Радиационно-гигиеническое обследование зданий детских образовательных учреждений г. Снежинска Челябинской области.

Материал и методы: Всего обследовано 209 помещений детских садов и школ (общественные помещения первых этажей, подвалы). Измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) выполнены ДКГ-02У АРБИТР. Объемную активность радона (OA_{Rn}) измеряли интегральным методом в отопительный и теплый периоды года.

Результаты: Мощность дозы гамма-излучения в помещениях варьирует в диапазоне от 0,10 до 0,21 мкЗв/ч. Среднегодовые значения эквивалентной равновесной объемной активности радона ($ЭРОА_{Rn}$) варьируют в широком диапазоне, достигая 590 Бк/м³, в 10 % помещений $ЭРОА_{Rn}$ превышает 100 Бк/м³. Средние значения среднегодовой $ЭРОА_{Rn}$ составляют около 30 Бк/м³ и характеризуют радоновую обстановку в обследованных объектах социальной инфраструктуры в целом как приемлемую. Выявлено различие значений $ЭРОА_{Rn}$ в зданиях, построенных из кирпича и из железобетонных панелей. В зданиях из кирпича значения среднегодовой $ЭРОА_{Rn}$ достигают 590 Бк/м³, в зданиях из железобетонных панелей – 360 Бк/м³, при средних значениях 32 Бк/м³ и 18 Бк/м³ соответственно. При этом герметизация кирпичных и железобетонных зданий посредством установки пластиковых стеклопакетов усиливает эти различия.

Заключение: В результате проведенного обследования выявлена «критическая группа» зданий детских образовательных учреждений г. Снежинска, характеризующаяся повышенным содержанием радона в воздухе помещений. К ним относятся кирпичные здания старой постройки (1950–1970 гг.) с невентилируемыми подвалами и установленными пластиковыми стеклопакетами. Эти здания нуждаются в углубленном радоновом обследовании и, при необходимости, планировании радонозащитных мероприятий.

Ключевые слова: радон, трековый метод, детские сады, школы, подвалы, общественные помещения, деревянные окна, пластиковые окна

Для цитирования: Киселев С.М., Зозуль Ю.Н., Шлыгин В.В., Маренный А.М., Малахова А.Н., Ахромеев С.В., Файзрахманов Ф.Ф. Радиационно-гигиеническое обследование детских образовательных учреждений г. Снежинска // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69. № 4. С. 25–33. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-4-25-33

S.M. Kiselev¹, Yu.N. Zozul¹, V.V. Shlygin¹, A.M. Marenniy², A.N. Malakhova¹, S.V. Akhromeev¹, F.F. Faizrahmanov³

Radiological Survey of Schools and Kindergartens in Snezhinsk

¹ A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

² Scientific and Technical Center for Radiation and Chemical Safety and Hygiene, Moscow, Russia

³ Center for Hygiene and Epidemiology No. 15 FMBA of Russia, Snezhinsk, Russia

Contact person: S.M. Kiselev, e-mail: sergbio@gmail.com

ABSTRACT

Purpose: Radiological survey in schools and kindergartens of Snezhinsk, Chelyabinsk region.

Material and methods: Total 209 public premises on the ground floor and basements were examined. Ambient dose equivalent power measurements were performed by DKG-02U ARBITER. SSNTDs were used to measure annual indoor radon concentrations during the warm and cold seasons.

Results: Indoor gamma dose rate varies within the range 0.10–0.21 μSv/h. Annual equilibrium equivalent concentration of radon (EECRn) varies over a wide range up to 590 Bq/m³, exceeding 100 Bq/m³ in 10 % of surveyed premises. Average annual values of equivalent equilibrium concentration are about 30 Bq/m³ and characterize the radon situation as generally acceptable. The difference in the values of the EECRn in brick buildings and buildings made of reinforced concrete panels has been revealed. The average annual EECRn values reach 590 Bq/m³ in brick buildings, and 360 Bq/m³ in buildings made of reinforced concrete panels, with average values of 32 and 18 Bq/m³, respectively. Sealing brick and reinforced concrete buildings by installing plastic double-glazed windows enhances these differences.

Conclusions: The survey revealed a critical group of buildings with enhanced indoor radon. Old brick buildings (1950–1970) with unventilated basements and installed plastic double-glazed windows are characterized by the highest indoor radon concentration in public premises. These type of buildings require in-depth radon research and planning of radon protection measures if necessary.

Keywords: radon, SSNTD, kindergartens, schools, basements, public premises, wooden windows, plastic windows

For citation: Kiselev SM, Zozul YuN, Shlygin VV, Marenny AM, Malakhova AN, Akhromeev SV, Faizrahmanov FF. Radiological Survey of Schools and Kindergartens in Snezhinsk. Medical Radiology and Radiation Safety. 2024;69(4):25–33. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-4-25-33

Введение

Природные источники ионизирующего излучения вносят основной вклад в облучение населения. Задача обеспечения радиационной безопасности населения от воздействия природных источников излучения, среди которых радон и дочерние продукты его распада (ДПР), представлена в качестве одного из основных направлений реализации государственной политики¹ в области ядерной и радиационной безопасности [1, 3]. При этом констатируется необходимость совершенствования государственного контроля (надзора) в объектах социальной инфраструктуры, к которым относятся детские сады и школы. Мониторинг радона и его ДПР в воздухе детских образовательных учреждений на систематической основе осуществляется учреждениями санитарно-эпидемиологического надзора на предмет соответствия эксплуатируемых помещений требованиям нормативных документов^{2, 3, 4}.

Вместе с тем, как показывает практика, охват детских образовательных учреждений радоновыми обследованиями сильно варьирует от региона к региону, составляя в некоторых регионах лишь менее 1 % зданий данной категории [6]. В целях повышения эффективности мониторинга и выявления зданий, требующих реализации первоочередных радонозащитных мероприятий, представляется важным накопление и систематизация научных данных о характеристиках эксплуатируемых зданий, их конструктивных особенностях, режимов их содержания и других параметров, определяющих высокие уровни накопления радона в воздухе эксплуатируемых помещений. Это позволит выделить «критическую группу» зданий и определить приоритетность мониторинговых радоновых исследований в объектах социальной инфраструктуры. В отсутствие единой программы на государственном уровне подобные исследования проводятся отдельными

¹ Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу (Утверждены Указом Президента Российской Федерации от 13 октября 2018 г. № 585)

² Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534. Введены взамен СП 2.6.1.758-99 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)».

³ Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115. Введены взамен СП 2.6.1.799-99 «ОСПОРБ-99».

⁴ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 № 171. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011, регистрационный № 19587. Введены взамен СП 2.6.1.1292-03 и СанПиН 2.6.1.2750-10 «Изменения и дополнения 1 к СП 2.6.1.1292-03».

ми научными коллективами в разных регионах России [4, 6, 8, 9, 10, 12, 13]. Настоящая работа дополняет эти исследования результатами скринингового радонового обследования детских образовательных учреждений г. Снежинска Челябинской области. В соответствии с законодательством Российской Федерации город имеет статус закрытого административно-территориального образования с градообразующим предприятием атомной отрасли. Геологические особенности Челябинской области характеризуются многочисленными тектоническими нарушениями и распространением горных пород (граниты, сиениты, углистые сланцы и пр.) с повышенным содержанием радионуклидов [9]. Радоноопасность данной территории классифицируется как «опасная» [7], что определяет актуальность настоящих исследований.

Материал и методы

Исследование радиационно-гигиенической обстановки проведено в помещениях общественного назначения (спальни, игровые комнаты, классы, библиотеки, актовые залы) на первых этажах, а также в подвальных помещениях зданий детских садов и школ. Всего обследовано 209 помещений детских образовательных учреждений.

Для оценки радиационно-гигиенической обстановки измерена мощность AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) в помещениях и на открытой местности с использованием ДКГ-02У АРБИТР (Россия).

Определение объемной активности радона (OA_{Rn}) в воздухе помещений детских садов и школ выполнено интегральным методом с использованием камер РЭИ-4 с пленочными трековыми детекторами комплекта ТРЕК-РЭИ 1М (Россия) в соответствии с методикой измерения⁵. Для учета сезонных вариаций экспозиметры размещали в помещениях на отопительный (ноябрь-март) и неоперительный периоды года (июнь-октябрь).

Среднегодовое значение OA_{Rn} рассчитывали по формуле:

$$OA_{\text{ср. год}} = K_{\text{отоп.}} \cdot OA_{\text{отоп.}} + K_{\text{тёпл.}} \cdot OA_{\text{тёпл.}}, \quad (1)$$

$OA_{\text{ср. год}}$ – среднегодовое значение OA_{Rn} в воздухе помещения, Бк/м³;

$OA_{\text{отоп.}}$ и $OA_{\text{тёпл.}}$ – OA радона в воздухе помещения, измеренные в отопительный и тёплый периоды, Бк/м³;

$K_{\text{отоп.}}$ и $K_{\text{тёпл.}}$ – весовые коэффициенты, зависящие от среднегодовой продолжительности отопительного и тёплого периодов.

В соответствии с требованиями⁶ неопределённость OA_{Rn} в воздухе исследуемых помещений в период экспонирования была рассчитана по формуле:

⁵ Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом: Методика измерений. Разработана ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, ООО «ГК РЭИ». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.2И385 от 16.07.2012 г.

⁶ Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений измерения косвенные определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. МИ 2083-90. Утверждена НПО «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» 20.12.89. – 11 с.

$$\Delta OA_{\text{ср. год.}} = \sqrt{(K_{\text{отоп.}} \cdot \Delta OA_{\text{отоп.}})^2 + (K_{\text{тёпл.}} \cdot \Delta OA_{\text{тёпл.}})^2 + (K_{\text{вар.}} \cdot \Delta OA_{\text{ср. год.}})^2}, \quad (2)$$

$\Delta OA_{\text{ср. год.}}$ – погрешность среднегодового значения OA_{Rn} в воздухе помещения при $p = 0,95$, Бк/м³;

$\Delta OA_{\text{отоп.}}$ и $\Delta OA_{\text{тёпл.}}$ – погрешности OA_{Rn} в воздухе помещения⁷, измеренных в отопительный и тёплый периоды, Бк/м³;

$K_{\text{вар.}}$ – коэффициент вариации, установленный в соответствии с МУ 2.6.1.037-2015⁸.

Для сопоставления среднегодового значения OA_{Rn} в помещениях общественного назначения с нормируемой величиной проведен расчет эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА_{Rn}), при использовании рекомендованного значения фактора равновесия $F=0,5$, согласно МУ 2.6.1.2838-11⁹.

Межсезонные коэффициенты OA_{Rn} рассчитывали по формуле:

$$K_{\text{сез.}} = \frac{OA_{\text{отоп.}}}{OA_{\text{тёпл.}}}, \quad (3)$$

$K_{\text{сез.}}$ – межсезонный коэффициент;

$OA_{\text{отоп.}}$ и $OA_{\text{тёпл.}}$ – ОА радона в воздухе помещения, измеренные в отопительный и тёплый периоды, Бк/м³.

Погрешность межсезонного коэффициента рассчитывали по формуле:

$$\Delta K_{\text{сез.}} = \frac{\sqrt{\Delta OA_{\text{отоп.}}^2 + (K_{\text{сез.}} \cdot \Delta OA_{\text{тёпл.}})^2}}{OA_{\text{тёпл.}}}, \quad (4)$$

$\Delta K_{\text{сез.}}$ – погрешность межсезонного коэффициента при $p = 0,95$

$\Delta OA_{\text{отоп.}}$ и $\Delta OA_{\text{тёпл.}}$ – погрешности OA_{Rn} в воздухе помещения¹⁰, измеренных в отопительный и тёплый периоды, Бк/м³.

Математическая обработка результатов исследований проведена в соответствии с общепринятыми методами математической статистики посредством табличного процессора MS Excel. В соответствии с принципом консервативности сравнение фактических среднегодовых значений ЭРОА_{Rn} с нормативами осуществлялось с запасом на погрешность измерения. По этой же причине максимальные значения OA_{Rn} и ЭРОА_{Rn} приведены с запасом на погрешность. Поскольку распределения значений OA_{Rn} , ЭРОА_{Rn} и $K_{\text{сез.}}$ подчиняются логнормальному

⁷ Значение погрешности при $p = 0,95$ в соответствии с руководством по эксплуатации ШТКД.1.297.001 РЭ «Комплект аппаратуры для измерений средней объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М».

⁸ Методические указания МУ 2.6.1.037-2015. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности Утверждены ФМБА России 14.05.2015. – М. 2016. – 48 с.

⁹ 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. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. – 26 с.

¹⁰ Значение погрешности при $p = 0,95$ в соответствии с руководством по эксплуатации ШТКД.1.297.001 РЭ «Комплект аппаратуры для измерений средней объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М».

закону, в качестве основного показателя центральной тенденции выбрано среднее геометрическое значение. Тезис о близости фактических распределений к логнормальному подтвержден близостью средних геометрических и медианных значений данных показателей. Медианные значения и границы их доверительного интервала при $p = 0,95$ вычислены в соответствии с ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004¹¹.

Для оценки взаимосвязи OA_{Rn} в помещениях постоянного пребывания детей на первых этажах и OA_{Rn} в подвалах выбрана модель парной линейной связи. В соответствии с общепринятой практикой вычислены коэффициенты парной корреляции Пирсона и коэффициенты регрессии, рассчитанные методом наименьших квадратов. Проверка гипотезы о достоверности полученных коэффициентов корреляции и оценка границ их доверительных интервалов проведена с помощью z-преобразования Фишера [2].

Характеристика зданий и помещений

Детские сады (24 здания) и школы (8 зданий) г. Снежинска построены в период 1950–2021 гг., распределение по годам постройки представлено на диаграмме (рис. 1). Строения различаются по материалам конструкций, этажности, наличию и отсутствию бетонированных подвальных помещений и вентиляционных отверстий в них. Оконные проемы в помещениях общественного назначения на первых этажах стандартного размера с высоким подоконником, в основном с остеклением пластиковыми стеклопакетами, в 34 % помещений – деревянные рамы.

Основная часть зданий детских учреждений относится к периоду постройки 1950–1970 гг. (65 %), больше половины из них (64 %) – кирпичные. В 77 % зданий этого периода постройки установлены пластиковые стеклопакеты. В большинстве строений есть подвальные помещения (82 %), в половине из них предусмотрены вентиляционные окна (55 %). Здания с бетонированными полами подвальных помещений составляют 56 %, в остальной части – полы земляные.

Значительно меньше зданий построены в период 1971–1990 гг. (24 %), все из железобетонных панелей, с подвальными помещениями. В четверти помещений установлены окна с деревянными рамами. В большей части (88 %) подвальных помещений предусмотрены вентиляционные окна. Подвальные помещения в основном бетонированные, земляной пол присутствует лишь в 25 % помещений.

К 1991–2020 гг. постройки относится 12 % обследованных зданий, 75 % из них построены из железобетона, 25 % – из кирпича. Во всех из них есть подвалы с бетонированными полами, вентиляционные окна отсутствуют в 25 % в подвалах.

Результаты и обсуждение

Радиационно-гигиеническая обстановка в детских садах и школах

Мощность дозы гамма-излучения в помещениях зданий характеризуется значениями на уровне естественного радиационного фона. Медианные значения МАЭД составили 0,12 мкЗв/ч, максимальное – 0,21 мкЗв/ч (табл. 1). В результате исследований не выявлено помещений, в которых МАЭД отличается от значений на

¹¹ ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистические методы. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.

Таблица 1

Распределение значений МАЭД в помещениях образовательных учреждений ЗАТО г. Снежинск

Distribution of AEDR values in the premises of schools and kindergartens of Snezhinsk

Место измерений	Количество измерений	МАЭД, мкЗв/ч*		
		Макс	Ср. геом.	Медиана
Детские сады, первые этажи	125	0,21	0,11 (<0,10–0,15)	0,12 (<0,10–0,18)
Детские сады, подвалы	31	0,20	0,12 (<0,10–0,16)	0,12 (<0,10–0,19)
Школы, первые этажи	38	0,19	<0,10 (<0,10–0,14)	0,12 (<0,10–0,18)
Школы, подвалы	10	0,20	0,13 (0,10–0,18)	0,13 (<0,10–0,23)
На открытой местности	150	0,14	<0,10 (<0,10–0,12)	<0,10 (<0,10–0,13)

Примечание: * – в скобках указаны границы доверительного интервала

открытой местности на 0,2 мкЗв/ч и более¹². МАЭД в помещениях детских садов и школ г. Снежинска соответствует уровню естественного радиационного фона, характерного для данной местности.

В рамках скринингового обследования детских образовательных учреждений исследования проведены в помещениях пребывания детей на первых этажах зданий. Повышенные уровни ЭРОА_{Rn} (более 100 Бк/м³) отмечены в 10 из 114 обследованных помещений. В четырех помещениях (игровые и спальные комнаты) ЭРОА_{Rn} превышает установленный норматив 200 Бк/м³. При этом средние значения среднегодовой ЭРОА_{Rn} в детских садах и школах города составляют 24 и 31 Бк/м³ соответственно (табл. 2) и в целом определяют радиационную обстановку как благополучную.

Таблица 2

Распределение ЭРОА_{Rn} в общественных помещениях детских садов и школ г. Снежинск

Distribution of EECRn in public premises of schools and kindergartens of Snezhinsk

Место измерений	Количество измерений*	Среднегодовое значение ЭРОА _{Rn} **, Бк/м ³		
		Макс	Ср. геом.	Медиана
Детские сады	94 (3 %)	5,9·10 ²	24 (18–33)	25 (13–39)
Школы	20 (5 %)	2,6·10 ²	31 (17–54)	29 (<10–84)

Примечание: * – в скобках указан процент помещений, где ЭРОА_{Rn} >200 Бк/м³; ** – в скобках указан доверительный интервал

¹² Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534. Введены взамен СП 2.6.1.758-99 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)».

Таблица 3

Характеристика распределения ОА_{Rn} в подвальных помещениях в зависимости от типа пола и наличия вентиляционных окон

Characteristics of the distribution of radon concentration in basements depending on the type of floor covering and the presence of air vents

Тип пола в подвале	Среднегодовое значение ОА _{Rn} *, Бк/м ³					
	Подвалы с вентиляционными окнами			Подвалы без вентиляционных окон		
	Отопительный период	Теплый период	Ср. за год	Отопительный период	Теплый период	Ср. за год
Земляной	58 (33–100)	79 (37–170)	79 (50–130)	280 (120–670)	86 (<20–400)	150 (50–440)
Бетонный	<20 (<20–60)	86 (38–200)	64 (32–130)	200 (74–520)	210 (67–670)	180 (60–520)
Все подвалы	31 (<20–65)	83 (48–140)	70 (46–110)	240 (130–440)	140 (57–370)	160 (78–350)

Примечание: * – ср. геом. значение, в скобках указан доверительный интервал

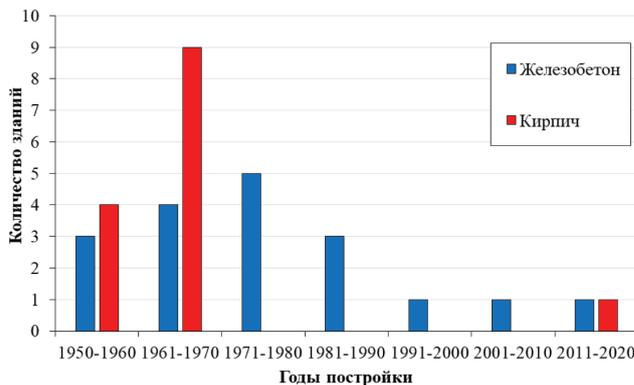


Рис. 1. Диаграмма распределения зданий детских садов и школ г. Снежинска по годам постройки с учетом материала конструкций
Fig. 1. Distribution of kindergartens and schools by year of construction and construction material in Snezhinsk

Следует отметить, что представленные данные получены с применением интегральных методов и дают консервативную оценку среднегодовых уровней содержания радона в воздухе помещений. Это связано с тем, что период экспонирования детекторов охватывает круглые сутки, включая ночное время, когда помещения в отсутствие детей не проветриваются, что способствует накоплению радона в воздухе помещений. Вместе с тем полученные данные позволяют охарактеризовать здания по потенциальной радоноопасности, выявить наиболее неблагоприятные из них с точки зрения гигиенической обстановки и сосредоточить усилия на определении источников поступления радона, а также выявить необходимость проведения радонозащитных мероприятий.

Анализ распределения радона в воздухе помещений первых этажей и подвалах

Наличие подвальных помещений и особенности их эксплуатации играют важную роль в накоплении радиоактивного газа в зданиях. Как было отмечено выше, большинство детских садов и школ г. Снежинска имеют подвалы. Вентиляционные окна предусмотрены в 62 % из них. Учитывая разные режимы вентилирования и отсутствие количественных показателей воздухообмена в подвальных помещениях, для проведения сравнительных оценок распределения содержания радона в исследуемых зданиях анализировали величину ОА_{Rn}, непосредственно измеряемую в ходе обследования. В таблице представлены результаты измерения среднегодовой ОА_{Rn} в общей выборке подвальных помещений детских садов и школ (табл. 3). Показано, что в подвалах с отсутствием вентиляционных окон ОА_{Rn} в два и более раза выше по сравнению с вентилируемыми подвальными помещениями. Наиболее высокие уровни радиоактивного газа отмечены в отопительный период в не-

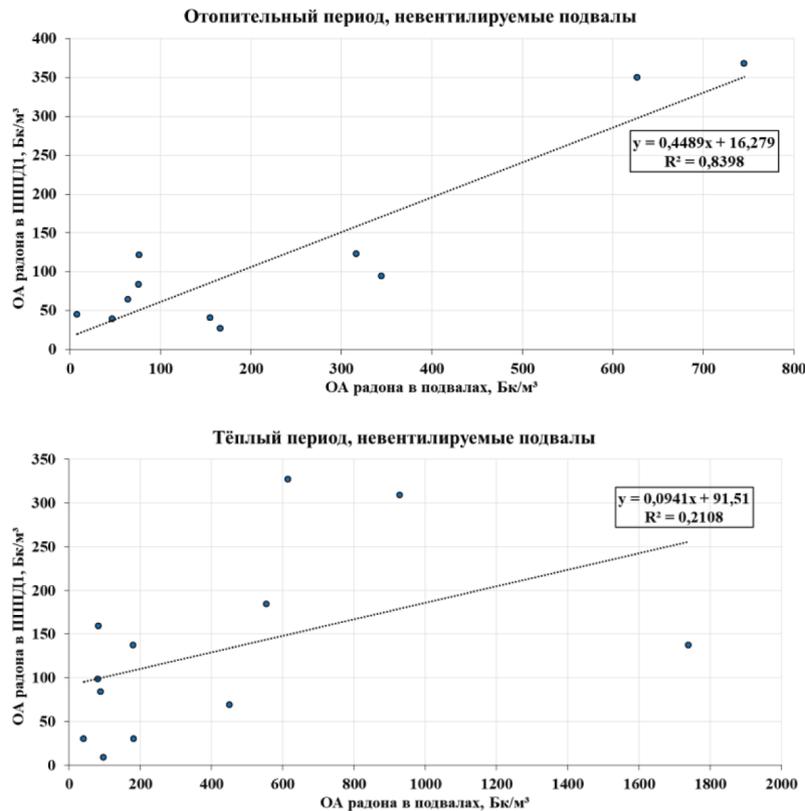


Рис. 2. Корреляционная зависимость между значениями среднегодовой OA_{Rn} в подвальном помещении и общественных помещениях на 1 этажах зданий в отопительный и теплый периоды года
 Fig. 2. Correlation between the values of the average annual radon concentration in the basements and public premises on the ground floors during the heating and warm periods

проветриваемых подвальных помещениях с земляными полами ($OA_{Rn} = 280$ Бк/м³). Наименьшие значения наблюдаются также в отопительный период в вентилируемых подвальных помещениях с бетонированными полами ($OA_{Rn} < 20$ Бк/м³).

Анализ взаимосвязи средних показателей среднегодовой OA_{Rn} в воздухе общественных помещений первых этажей и подвалов детских учреждений показывает (рис. 2), что в случае проветриваемых подвальных помещений и в теплый, и в отопительный периоды года корреляция отсутствует. В зданиях с неветилируемыми подвальными помещениями отмечается устойчивая положительная корреляционная зависимость (коэффициент Пирсона 0,8) между среднегодовыми значениями OA_{Rn} в подвалах и общественных помещениях как в те-

плый, так и в отопительный периоды.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что основным источником поступления радона в воздушную среду помещений являются грунт и подстилающие породы под зданием.

Содержание радона в воздухе общественных помещений зданий разных годов постройки

По сроку эксплуатации зданий все детские учреждения объединены в три группы: построенные в период 1950–1970 гг., 1971–1990 гг. и после 1991 г. Основной массив общественных помещений всех зданий характеризуется значениями ЭРОА_{Rn} ниже 50 Бк/м³. Значения ЭРОА_{Rn} выше 150 Бк/м³ отмечаются в зданиях наиболее раннего периода постройки (рис. 3). Наблюдается сниже-

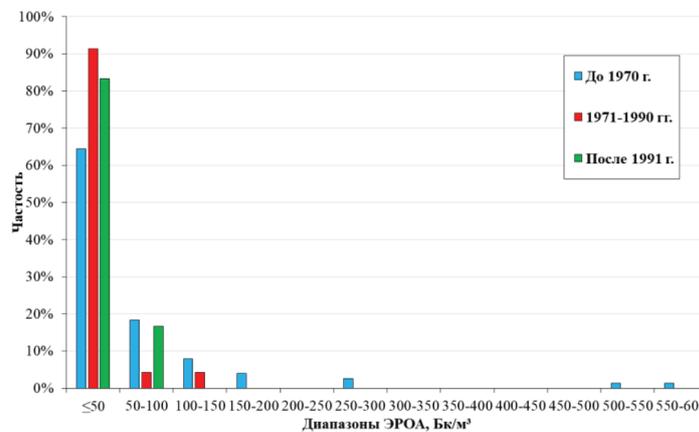


Рис. 3. ЭРОА_{Rn} в общественных помещениях детских садов и школ г. Снежинска
 Fig. 3. EEC_{Rn} in public premises of kindergartens and schools in Snezhinsk

Таблица 5

Характеристика распределения ЭРОА_{Rn} в общественных помещениях в зданиях из кирпича и железобетона, построенных в период 1950–1970 гг.

Characteristics of EEC_{Rn} distribution in public premises in brick and reinforced concrete buildings, built in the period 1950–1970

Строительный материал	Количество измерений*	Среднегодовое значение ЭРОА _{Rn} **, Бк/м ³		
		Макс	Ср. геом.	Медиана
Здания с подвальными помещениями без вентиляционных окон				
Железобетон	15 (10 %)	360	25 (10–60)	28 (<10–140)
Кирпич	17 (10 %)	590	48 (25–93)	62 (16–120)
Здания с подвальными помещениями с вентиляционными окнами				
Железобетон	12 (0 %)	80	14 (<10–29)	18 (<10–46)
Кирпич	41 (2 %)	260	25 (18–36)	29 (14–62)

Примечание: * – в скобках указан процент помещений, где ЭРОА_{Rn} >200 Бк/м³; ** – в скобках указан доверительный интервал

Таблица 4

Характеристика распределения ЭРОА_{Rn} в общественных помещениях детских садов и школ в зависимости от материала конструкций

Characteristics of EEC_{Rn} distribution in public premises of kindergartens and schools depending on construction material

Строительный материал	Год постройки	Кол-во измерений, ед.	ЭРОА _{Rn} , Бк/м ³ *		
			Ср. геом.	Медиана	Макс
Железобетон	До 1970	23	23 (18–39)	21 (11–38)	360
	1971–1990 гг.	23	20 (15–28)	21 (11–42)	130
	1991 г. и позже	8	12 (<10–23)	13 (<10–30)	73
Кирпич	До 1970	53	34 (22–41)	32 (14–62)	590
	1971–1990 гг.	–	–	–	–
	1991 г. и позже	4	29 (19–45)	33 (11–56)	56

Примечание: * – в скобках указан доверительный интервал

ние верхней границы регистрируемых значений ЭРОА_{Rn} для сооружений более новых годов постройки (600 Бк/м³ – для периода постройки 1950–1970 гг., 150 Бк/м³ – 1970–1990 гг., 100 Бк/м³ – после 1991 г. постройки).

Анализ конструктивных особенностей зданий на накопление радона в воздухе помещений

Материал постройки

Изучение влияния строительных материалов конструкций на накопление радона в воздухе помещений выявило ряд закономерностей. Для зданий из железобе-

Таблица 6

Характеристики распределения ЭРОА_{Rn} в помещениях с деревянными рамами и пластиковыми стеклопакетами в зависимости от материала конструкции и наличия вентиляционных окон в подвальном помещении

Characteristics of EEC_{Rn} distribution in rooms with wooden and plastic double-glazed windows, depending on the construction material and the presence of air vents in the basement

Тип окон в помещении	Среднегодовое значение ЭРОА _{Rn} , Бк/м ³ *					
	Железобетон			Кирпич		
	Ср. геом.	Медиана	Макс	Ср. геом.	Медиана	Макс
Здания с подвальными помещениями с вентиляционными окнами						
Деревянные	16 (<10–41)	18 (<10–62)	80	20 (<10–49)	12 (<10–170)	260
Пластиковые	15 (11–21)	19 (<10–30)	75	27 (19–38)	31 (14–61)	200
Здания с подвальными помещениями без вентиляционных окон						
Деревянные	Нет данных		120	33 (10–110)	26 (<10–500)	500
Пластиковые	19 (<10–36)	17 (<10–73)	360	81 (48–140)	80 (33–190)	590
Все здания						
Деревянные	27 (13–55)	30 (10–110)	120	24 (12–49)	19 (<10–88)	500
Пластиковые	16 (12–23)	19 (<10–30)	360	35 (25–48)	36 (18–72)	590

Примечание: * Для медианных и средних геометрических значений в скобках указаны границы их доверительных интервалов при p = 0,95

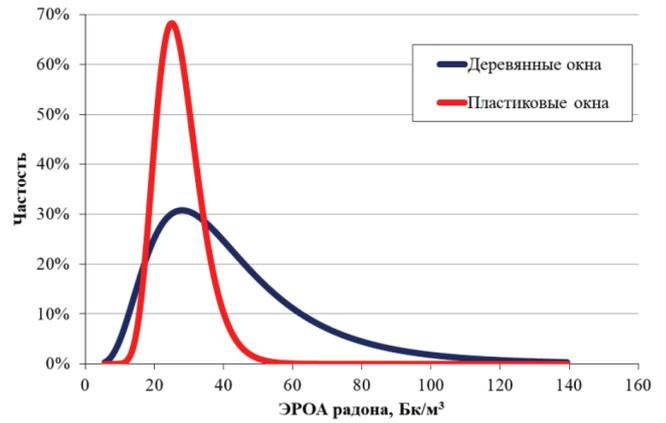


Рис. 4. Распределение ЭРОА_{Rn} в общественных помещениях с разным типом остекления

Fig.4. Distribution of EEC_{Rn} in public premises with different types of glazing

тонных панелей прослеживается тенденция увеличения содержания радона в воздухе общественных помещений с увеличением срока их эксплуатации (табл. 4), что согласуется с данными других исследований [12]. В отношении кирпичных зданий подобной закономерности не установлено в связи с отсутствием достаточного для сравнительного анализа количества кирпичных зданий современной постройки.

Вместе с тем, показано, что содержание радона в воздухе помещений кирпичных зданий ранней постройки (1950–1970 гг.) характеризуется в целом более высокими значениями, по сравнению с железобетонными аналогичного периода. Наиболее явно это прослеживается в зданиях с подвальными помещениями без вентиляционных окон (табл. 5).

Тип остекления

Современные тенденции к повышению тепловой эффективности зданий обуславливают применение строительных технологий, в т.ч. направленных на улучшение герметизации зданий. Это достигается, в частности, заменой деревянных оконных рам пластиковыми рамами со стеклопакетами. Однако их применение существенно снижает воздухопроницаемость и предъявляет особые требования к организации регулируемого, управляемого воздухообмена, осуществляемого с применением соответствующих систем вентиляции.

Для оценки влияния разных типов остекления на уровни накопления радона в детских учреждениях были проанализированы выборки зданий с деревянными рамами и пластиковыми стеклопакетами. Сравнение данных объединенной выборки зданий (рис. 4), построенных из разного материала, не выявило значимых различий средних тенденций ЭРОА_{Rn}. В общественных помещениях первых этажей с деревянными рамами среднегометрическое значение ЭРОА_{Rn} составило 36 Бк/м³ (доверительный интервал 14–92 Бк/м³), с пластиковыми стеклопакетами – 33 Бк/м³ (доверительный интервал 21–51 Бк/м³).

Вместе с тем, при сравнении распределения ЭРОА_{Rn} в выборках зданий, построенных из кирпича или железобетона, обнаруживаются значимые различия содержания радона в помещениях с разным типом остекления (табл. 6). Наиболее выраженное накопление радона в общественных помещениях кирпичных зданий выявлено в помещениях, остекленных пластиковыми стеклопакетами (ср. геом. – 35 Бк/м³), по сравнению с зданиями из железобетона (ср. геом. – 16 Бк/м³). При этом в помещениях кирпичных зданий уровни ЭРОА_{Rn} выше в помещениях, где установлены пластиковые стеклопакеты, по сравнению с деревянными рамами (ср. геом. 35 и 24 Бк/м³ соответственно).

Обнаруженные тенденции более четко проявляются в выборке зданий с неветилируемыми подвалами (табл. 6, рис. 5, 6). Среднегодовые уровни ЭРОА_{Rn} в помещениях с пластиковым остеклением в зданиях из кирпича и железобетона составляют 81 и 19 Бк/м³ соответственно, против 27 и 15 Бк/м³ в зданиях с наличием вентиляционных окон в подвалах.

Анализ данных для зданий с неветилируемыми подвалами подчеркивает выраженность отличий в накоплении радона в эксплуатируемых помещениях первых этажей кирпичных зданий с разным типом остекления: ЭРОА_{Rn} в помещениях с деревянными рамами 33 Бк/м³ (доверительный интервал 1–110 Бк/м³), с пластиковыми стеклопакетами – 85 Бк/м³ (доверительный интервал 48–150 Бк/м³).

Анализ сезонных распределений объемной активности радона в воздухе помещений

Перенос радона из подстилающих грунтов под зданием в помещение определяется сочетанием двух основных механизмов – диффузионного, обусловленного разностью концентраций радона в источнике и в помещении, и конвекционного, связанного с разностью давлений в разных частях здания [5, 11]. Сравнительный вклад диффузионного и конвекционного механизмов можно оценить путем сопоставления средних значений ОА_{Rn} в помещениях в теплый и отопительный сезоны года и расчета межсезонных коэффициентов.

Сопоставление средних значений межсезонных коэффициентов ОА_{Rn} в помещениях первых этажей зданий с наличием и отсутствием вентиляционных окон в подвалах (ср. геом. 1,0 и 0,84 соответственно) не выявило различий, что свидетельствует о смешанном диффузионно-конвекционном механизме поступления радона. Вместе с тем, в кирпичных зданиях обнаружена разнонаправленная тенденция в распределении ОА_{Rn} в отопительном и теплом периодах в зависимости от наличия вентилируемых подвальных помещений (табл. 7). Так, в кирпичных зданиях с неветилируемыми подвалами ОА_{Rn} в помещениях первых этажей в отопительный период в целом выше, чем в теплый ($K_{сез} > 1$). Это может свидетельствовать о существенном вкладе конвекционного механизма поступления радона, наряду с диффу-

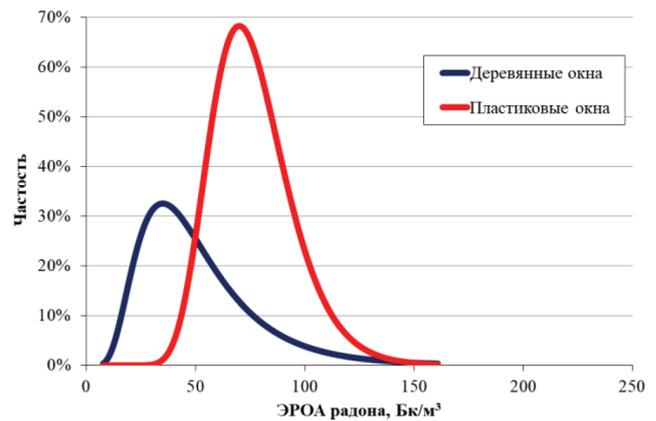


Рис. 5 Распределение ЭРОА_{Rn} в помещениях с разным типом остекления в кирпичных зданиях

Fig.5. Distribution of EECRn in public premises with different types of glazing in brick buildings

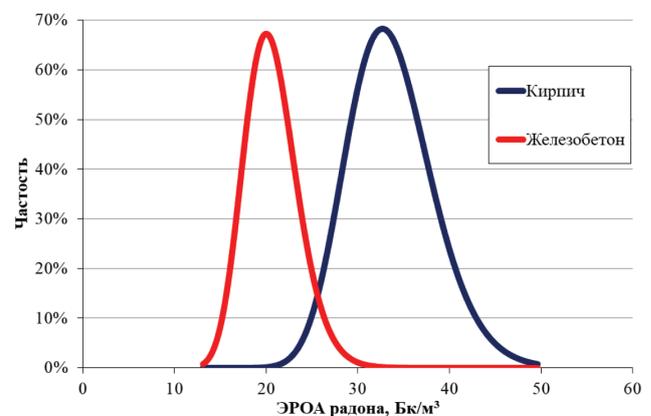


Рис. 6. Распределение ЭРОА_{Rn} в помещениях с пластиковыми стеклопакетами в зданиях, построенных из кирпича и железобетонных панелей

Fig.6. Distribution of EECRn in public premises with plastic double-glazed windows in brick buildings and buildings made of reinforced concrete panels

зионным. Что закономерно, учитывая эффект теплового напора при градиенте температур в холодное время года. Наоборот, в кирпичных зданиях с наличием вентилируемых подвалов содержание радона в помещениях первых этажей в отопительный период ниже, чем в теплый, что определяет вероятность преобладания диффузионного механизма поступления. Данные наблюдения требуют подтверждения на большем объеме экспериментального материала. Определение межсезонных отношений ОА_{Rn} в воздухе помещений является необходимым для принятия решения по реализации радонозащитных мероприятий в зданиях с высокими уровнями радона.

Заключение

Результаты скринингового обследования детских садов и школ г. Снежинска позволяют охарактеризовать радиационно-гигиеническую обстановку в целом как удовлетворительную. Мощность дозы гамма-излучения в помещениях соответствует уровню естественного радиационного фона характерного для данной местности.

Содержание радона в воздухе помещений пребывания детей характеризуется выраженной гетерогенностью (неравномерностью). Это связано с особенностями поступления и распределения радона в здания, которые определяются их конструкционными характеристика-

Таблица 7

Распределение межсезонных коэффициентов OA_{Rn} в воздухе помещений кирпичных зданий 1950–1970 гг. постройки

Distribution of seasonal coefficients ratio of radon concentration in the indoor air of brick buildings, built in the period 1950–1970

Тип остекления	Количество измерений	$K_{сез} = OA_{отоп.} / OA_{тепл.}$	
		Ср. геом.	Медиана
Здания с подвальными помещениями без вентиляционных окон			
Пластиковые и деревянные	14	1,5 (0,7–3,0)	1,3 (0,1–8,9)
Пластиковые	7	1,2 (0,5–2,9)	1,2 (0,1–15)
Деревянные	7	1,9 (0,6–5,6)	1,9 (0,1–39)
Здания с подвальными помещениями с вентиляционными окнами			
Пластиковые и деревянные	35	0,77 (0,5–1,2)	0,68 (0,1–1,8)
Пластиковые	24	0,66 (0,4–1,1)	0,58 (0,1–1,5)
Деревянные	11	1,1 (0,6–2,0)	1,1 (0,1–6,6)

ми, спецификой содержания и эксплуатации помещений. Здания детских садов и школ г. Снежинска различаются по годам постройки, материалу строительных конструкций, типу остекления, состоянию подвальных помещений. В ходе проведенного исследования определены характеристики зданий, в помещениях которых обнаруживаются повышенные уровни радона. К ним относятся кирпичные здания 1950–1970 гг. периода постройки. Наблюдаемые различия между кирпичными и

железобетонными зданиями более выражены в помещениях с установленными пластиковыми стеклопакетами. При этом для зданий, где в подвальных помещениях отсутствуют вентиляционные отверстия, выявлена прямая корреляционная связь между содержанием радона в подвале и его накоплением в воздухе помещений первых этажей.

Полученные результаты позволяют выделить «критическую группу» зданий детских садов и школ г. Снежинска по содержанию радона в воздухе помещений и оптимизировать объем контроля детских учреждений, осуществляемого учреждениями ФМБА России в рамках надзора за обеспечением радиационной безопасности населения от природных источников излучения. Представляется важным объединение и накопление данных о содержании радона и характеристиках зданий детских образовательных учреждений, получаемых разными группами исследователей на единой методологической базе в формате общей информационной системы, прототипом которой в настоящее время является ИАС ПИИ, функционирующая на базе НТЦ РХБГ ФМБА России.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГБУЗ ЦгиЭ № 15 ФМБА России за содействие в выполнении исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. V. I. Sources. Annex B: Exposures from Natural Radiation Sources. New York: United Nations, 2000. 76 p. ISBN 92-1-142238-8.
- Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики // Электронная библиотека университета Синергия. URL: <https://www.e-biblio.ru/?page=about&about=29> (дата обращения: 29.02.2024).
- Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., Барышков Н.К., Библин А.М., Братилова А.А., Воробьев Б.Ф., Кормановская Т.А., Романович И.К., Титова Т.Н., Журавлева В.Е., Сивенков А.Г., Цовьянов А.Г. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: Информационный сборник. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2021. 83 с.
- Васильев А.С., Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Историк О.А., Еремина Л.А. Сравнительная оценка доз облучения и радиационных рисков у обучающихся и сотрудников некоторых детских учреждений Ленинградской области в зависимости от методов и подходов к измерению содержания радона в воздухе помещений // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 6-18. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-6-18.
- Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б., Ярмошенко И.В. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 180 с. ISBN 5-7691-1088-0.
- Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К., Еремина Л.А., Королева Н.А., Балабина Т.А., Кононенко Д.В., Кокоулина Е.С., Васильев А.С. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
- Максимовский В.А., Харламов М.Г., Мальцев А.В., Лучин И.А., Смыслов А.А. Районирование территории России по степени радоноопасности // АНРИ. 1996/97. № 3. С. 66–73.
- Маренный А.М., Киселева М.Е., Нефёдов Н.А., Сулягина Г.И., Карл Л.Э. Обследование зданий города Лесной на содержание радона в помещениях // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 92-106. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-92-106.
- Маренный А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е. Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариабельности объемной активности радона // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 51–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67.
- Маренный А.М., Романов В.В., Астафуров В.И., Губин А.Т., Киселёв С.М., Нефёдов Н.А., Пенезев А.В. Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России // Радиационная гигиена. 2015. Т.8, № 1. С. 23-29.
- Организация и проведение мероприятий по снижению содержания изотопов радона в помещениях жилых и общественных зданий и сооружений: Методические рекомендации. МР № 35-14.
- Онищенко А.Д., Васильев А.В., Малиновский Г.П., Жуковский М.В. Влияние строительных характеристик зданий на накопление радона в детских дошкольных учреждениях Свердловской области // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 28-36. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36.
- Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Балабина Т.А., Королева Н.А., Историк О.А., Еремина Л.А. Результаты выборочного исследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области // Здоровье населения и среда обитания. 2017. № 10. С. 46-49.

REFERENCES

- UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from Natural Radiation Sources. New York, United Nations, 2000. 76 p. ISBN 92-1-142238-8.
- Ayvazyan S.A., Mkhitaryan V.S. Applied statistics and fundamentals of econometrics [electronic resource] Synergy University Electronic Library. URL: <https://www.e-biblio.ru/?page=about&about=29>. (In Russ.). (date of the application: 29.02.2024).

3. Barkovskiy A.N., Akhmatdinov R.R., Akhmatdinov R.R., Baryshkov N.K., Biblin A.M., Bratilova A.A., Vorobyev B.F., Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Titova T.N., Zhuravleva V.E., Sivenkov A.G., Tsovyanov A.G. Radiation Doses to the Population of the Russian Federation in 2020: Information Collection. St.-Petersburg Publ., 2021. 83 p. (In Russ.).
4. Vasilyev A.S., Romanovich I.K., Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V., Istorik O.A., Eremina L.A. Comparative Assessment of Doses and Health Risks for Students (Pupils) and Employees of Several Educational Institutions in the Leningrad Region, Depending on Methods and Approaches to Measuring Indoor Radon Concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15:2:6-18 (In Russ.). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-6-18.
5. Zhukovskiy M.V., Kruzhalov A.V., Gurvich V.B., Yarmoshenko I.V. Radon Safety of Buildings. Ekaterinburg Publ., 2000. 180 p. ISBN 5-7691-1088-0.
6. Kormanovskaya T.A., Istorik O.A., Romanovich I.K., Eremina L.A., Koroleva N.A., Balabina T.A., Kononenko D.V., Kokoulina E.S., Vasilyev A.S. Radon Surveys in the Buildings of Children Institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14:2:6-20 (In Russ.). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
7. Maksimovskiy V.A., Kharlamov M.G., Maltsev A.V., Luchin I.A., Smyslov A.A. Zoning of the Territory of Russia According to the Radon Potential. *ANRI = ANRI*. 1996/97;3;9:66–73 (In Russ.).
8. Marennyy A.M., Kiseleva M.E., Nefedov N.A., Sutiagina G.I., Karl L.E. Survey of Buildings in the City Lesnoy on the Indoor Radon Concentration. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11;3:92-106 (In Russ.) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-92-106.
9. Marennyy A.M., Kononenko D.V., Trufanova A.E. Radon Survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of Spatial Variability of Indoor Radon Concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13;3:51-67 (In Russ.). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67.
10. Marennyy A.M., Romanov V.V., Astafurov V.I., Gubin A.T., Kiselev S.M., Nefedov N.A., Penesov A.V. Survey for Indoor Radon in Dwellings on the Territories Supervised by FMBA of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8;1:23-29 (In Russ.).
11. Organization of the Activities on the Reduction of the Radon Isotopes in the Premises of the Residential and Public Buildings and Constructions. Guidelines. MR № 25-14. (In Russ.).
12. Onishchenko A.D., Vasilyev A.V., Malinovskiy G.P., Zhukovskiy M.V. Influence of Building Features on Radon Accumulation in Kindergartens of the Sverdlovsk Region. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11;2:28-36 (In Russ.) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36.
13. Romanovich I.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Balabina T.A., Koroleva N.A., Istorik O.A., Eremina L.A. Results of Sampling Analysis of Radon Content in Preschool and School Organizations in the Leningrad Region. *Zdorovye Naseleniya i Sreda Obitaniya = Population Health and Habitat*. 2017;10;295:46-49 (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Финансирование исследований проводилось за счёт оплаты по Государственному контракту в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2030 г.».

Участие авторов. Киселев С.М. – сбор материала и обработка данных, написание текста; Зозуль Ю.Н. – сбор материала и обработка данных, написание текста; Шлыгин В.В. – проведение измерений, статистическая обработка данных; Маренный А.М. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Малахова А.Н. – проведение измерений проб; анализ литературного материала; Ахромеев С.В. – проведение измерений, редактирование текста; Ф.Ф. Файзрахманов – редактирование текста.

Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Поступила: 20.03.2024. Принята к публикации: 25.04.2024.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. Financing. The work was financed under the State Contract as part of the Federal Target Program «Nuclear and Radiation Safety for 2016-2020 and for the period until 2030».

Contribution. Kiselev S.M. – data collection and processing, writing the text; Zozul Yu.N. – data collection and processing, writing the text; Shlygin V.V. – sample measurements, statistical data processing; Marenny A.M. – study conception and design, writing and editing the text; Malakhova A.N. – sample measurements, literary material analysis; Akhromeev S.V. – sample measurements, editing the text; Faizrahmanov F.F. – editing the text.

All authors are responsible for approval of the final version of the article and integrity of all parts of the article.

Article received: 20.03.2024. Accepted for publication: 25.04.2024.