

П.С. Микляев^{1,2}, Т.Б. Петрова³, П.А. Сидякин⁴, А.М. Маренный², Р.А. Текеев⁵,
А.А. Цапалов⁶, Д.В. Щитов⁴, Д.Н. Цебро⁴, М.А. Мурзабеков⁴, Л.Э. Карл², С.Г. Гаврильев¹

ФОРМИРОВАНИЕ РАДОНОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗДАНИЯХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ г. ЛЕРМОНТОВА

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва

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

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

⁴ Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

⁵ Центр гигиены и эпидемиологии № 101 г. Лермонтова, Лермонтов

⁶ НПП «Доза», Зеленоград, Москва

Контактное лицо: Петр Сергеевич Микляев, e-mail: peterm7@inbox.ru

РЕФЕРАТ

Цель: определение содержания радона в воздухе зданий образовательных учреждений г. Лермонтова в долгосрочном режиме для оценки дозы облучения за счет радона, а также выявления закономерностей формирования повышенных уровней радона в помещениях.

Материал и методы: Проведение измерений объемной активности (ОА) радона в холодный и теплый сезоны трековым методом с применением комплекта аппаратуры «ТРЭК-РЭИ_1М» и определением эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона ($F=0,5$), удельной активности естественных радионуклидов в строительных материалах и грунтах с применением сцинтилляционного гамма-спектрометра «Прогресс-2000» на основе детектора NaI(Tl), плотности потока радона (ППР) на участках, прилегающих к зданиям, используя комплекс «Камера-01», а также проведение непрерывных измерений (мониторинга) ОА радона в помещениях с помощью радоновых мониторов Radon Eye и Radex MR107. Всего обследовано 19 зданий 1950–1980-х гг. постройки.

Результаты: Установлено, что территория характеризуется высокой потенциальной радоноопасностью, по всем исследованным объектам среднее значение удельной активности радия-226 в грунте составило 103 Бк/кг (от 45 до 230 Бк/кг), среднее значение ППР – 263 мБк/(м²с) (от 31 до 2730 мБк/(м²с)). Значения ЭРОА радона в помещениях 1 этажей зданий образовательных учреждений колебались от 12 до 1347 Бк/м³. Превышения нормативного уровня ЭРОА радона были обнаружены во всех обследованных зданиях, кроме детского сада, построенного в 2015 г. с соблюдением требований противорадоновой защиты при проектировании. Изучение поведения ЭРОА радона в помещениях зданий не выявило четких сезонных закономерностей, а также существенного снижения содержания радона на верхних этажах зданий, что, по-видимому, объясняется интенсивным перемешиванием воздуха между этажами. Основным источником радона в зданиях является его выделение из грунтов. Поступление радона в здания обусловлено преимущественно конвективным переносом радона через негерметичные врезки коммуникаций и другие дефекты в подземных ограждающих конструкциях. Обращает на себя внимание неэффективность радонозащитных мероприятий во всех зданиях, где они когда-либо проводились. Это объясняется неэффективным распределением ответственности, а также применением весьма устаревших технологий только пассивной защиты и отсутствием необходимого опыта у строительных организаций, выполняющих подобного рода работы.

Ключевые слова: ЭРОА радона, оценка доз, плотность потока радона, удельная активность радия, радоновый мониторинг, г. Лермонтов

Для цитирования: Микляев П.С., Петрова Т.Б., Сидякин П.А., Маренный А.М., Текеев Р.А., Цапалов А.А., Щитов Д.В., Цебро Д.Н., Мурзабеков М.А., Карл Л.Э., Гаврильев С.Г. Формирование радоновой обстановки в зданиях образовательных учреждений г. Лермонтова // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 2. С. 40–48. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-2-40-48

P.S. Miklyaev^{1,2}, T.B. Petrova³, P.A. Sidiyakin⁴, A.M. Marennyy², R.A. Tekeev⁵,
A.A. Tsapalov⁶, D.V. Shchitov⁴, D.N. Tsebro⁴, M.A. Murzabekov⁴, L.E. Karl², S.G. Gavriliev¹

Formation of Radon Situation in Buildings of Educational Institutions of Lermontov Town

¹ E.M. Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Moscow, Russia

² Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Moscow, Russia

³ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴ North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

⁵ Center of Hygiene and Epidemiology № 101, Lermontov, Russia

⁶ Scientific Production Company «Doza», Zelenograd, Moscow, Russia

Contact person: V.A. Manukova, e-mail: mmmvvvaa@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To determine the levels of indoor radon EEC of educational institutions in Lermontov city, to estimate the doses due to radon, to establish the causes of increased radon activity concentration in the indoor air and the patterns of its change.

Material and methods: measurements of radon EEC in cold and warm seasons were performed using the SSNTD (TRACK-REI_1M equipment), the content of natural radionuclides in building materials and soils using the Progress-2000 scintillation gamma spectrometer based on NaI(Tl) detector, the radon exhalation rate, using the Camera-01 charcoal complex, and radon continuous monitoring was carried out with the Radon Eye and Radex MR107. A total of 19 buildings were surveyed.

Results: It was found that the territory is characterized by a high geogenic radon, the average radium-226 content is 103 Bq/kg (range from 45 to 230 Bq/kg), the average value of radon exhalation is 263 mBq/(m²s) (range from 31 to 2730 mBq/(m²s)). The indoor radon EEC values of the 1st floors of educational institutions ranged from 12 to 1347 Bq/m³. Exceeding the permissible levels was found in all surveyed buildings, except for one kindergarten, where basement reliably protect against radon entering buildings. There are no clear seasonal patterns in the distribution of indoor radon, as well as a significant decrease in radon concentrations on the upper floors of buildings, which is apparently explained by intense convective mixing of air between floors. The main source of radon in buildings is its release from the soil. The entry of radon into buildings is caused by the convective transfer of radon through leaky tie-ins of communications and other defects in basement. The ineffectiveness of the radon mitigation measures is highlighted in all buildings where they were carried out. This is due to the inefficient allocation of responsibilities and the lack of competence and experience of the construction organisations carrying out this work.

Keywords: EEC, dose assessment, radon exhalation rate, soil radium content, radon monitoring, Lermontov city

For citation: Miklyaev PS, Petrova TB, Sidyakin PA, Marenyy AM, Tekeev RA, Tsapalov AA, Shchitov DV, Tsebro DN, Murzabekov MA, Karl LE, Gavriliev SG. Formation of Radon Situation in Buildings of Educational Institutions of Lermontov Town. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(2):40–48. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-2-40-48

Введение

Известно, что наибольшую дозу облучения население получает за счет природных источников ионизирующих излучений, из них наиболее значимый вклад дает радиоактивный газ радон. Облучение радоном считается второй после курения причиной заболевания раком легких [1]. Согласно рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) максимальная среднегодовая объемная активность радона в жилых помещениях не должна превышать 300 Бк/м³ [2]. В Российской Федерации нормируется не ОА, а эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона в воздухе помещений, которая не должна превышать 100 Бк/м³ для вновь построенных жилых и общественных зданий, и 200 Бк/м³ для эксплуатируемых зданий, согласно НРБ-99/2009.

Основным источником радона в помещениях считается его поступление из грунтов под зданием [3]. Поступление радона в здания происходит за счет диффузионно-конвективного переноса радона. Однако повышенные концентрации радона в эксплуатируемых зданиях формируются, как правило, за счет конвективных потоков воздуха, обусловленных градиентом давления, который зависит от перепадов температуры, скорости ветра и других факторов [4–6]. Основные пути переноса – трещины и неплотности в строительных конструкциях, незагерметизированные стыки, каналы коммуникаций и т.п. Вторичными источниками радона в помещениях являются строительные материалы с повышенным содержанием радия, а также водоснабжение, в случаях повышенного содержания радона в воде, особенно при использовании частных скважин и колодцев [3, 6].

Баланс ОА радона в помещениях обусловлен совокупным влиянием двух конкурирующих факторов – интенсивности вентиляции (или кратности воздухообмена) и скорости поступления радона в помещения из разных источников [3]. В работе [6] указывается на четкую зависимость уровней радона в помещениях от содержания радона в геологической среде, интенсивности его выделения из грунтов, а также от климатических/метеорологических условий. Температура воздуха, осадки, скорость ветра, влажность почвы приводят к временной изменчивости концентрации радона в помещениях в диапазоне от часа до сезона. Кроме того, важнейшими факторами, определяющими концентрации радона в помещениях, являются характеристики жилья, такие как уровень пола, год постройки, строительные материалы и тип здания. Наконец, в качестве менее значимых факторов рассматриваются расположение зданий на склонах,

что определяет повышенную площадь контакта здания с грунтом, а также тектонические разломы, как причина локального увеличения содержания радона в геологической среде и в зданиях.

Интенсивность выделения радона из грунтов характеризуется плотностью потока радона (ППР) с поверхности грунта. Для различных территорий значения ППР варьируются от нескольких единиц до сотен мБк/(м²с), иногда до тысяч мБк/(м²с) на локальных участках [4]. При этом ППР из материалов ограждающих конструкций, как правило, имеют весьма низкие значения, редко превышающие 5 мБк/(м²с) даже при значимых концентрациях радия-226 [3, 5]. ППР с поверхности строительных конструкций не нормируется. В то же время, для участков, предназначенных под строительство жилых или общественных зданий, значения ППР с поверхности грунта, согласно ОСПОРБ-99/2010, не должны превышать 80 мБк/(м²с), в противном случае в проекте должны быть предусмотрены мероприятия по защите от радона.

Основным фактором облучения населения Ставропольского края являются природные источники ионизирующих излучений, при этом все радоноопасные участки края находятся в курортном регионе Кавказских минеральных вод (КМВ) [7]. Это связано с высокой радиоактивностью горных пород, слагающих территорию, системой глубинных разломов, разгрузкой радоновых вод. Повышенная радиоактивность геологической среды обуславливает экстремально высокие концентрации радона в домах городов и поселков, таких как Лермонтов, Пятигорск, Иноземцево [8]. КМВ является территорией с повышенными дозами облучения населения (более 5 мЗв/год), причем на долю радона приходится существенно больше половины вклада в формирование эффективной дозы облучения населения в регионе [8].

Город Лермонтов располагается в центре КМВ и является одним из самых молодых городов Ставропольского края. Город расположен в нижней части западного склона горы Бештау, в недрах которой в период с 1950-х по 1980-е гг. функционировал урановый рудник №1 Лермонтовского горно-химического рудоуправления, организованного в 1949 г. [9]. Бештаугорский горный массив сложен щелочными породами гранитного состава, близкого к трахитам, получившими название «бештауниты», для которых характерны повышенные концентрации природных радионуклидов [10]. На территории города верхняя часть геологического разреза, являющаяся основанием зданий, представлена толщей рыхлых склоновых отложений (дресвой и суглинком с обломками бештаунита), а также глинами майкопской серии, харак-

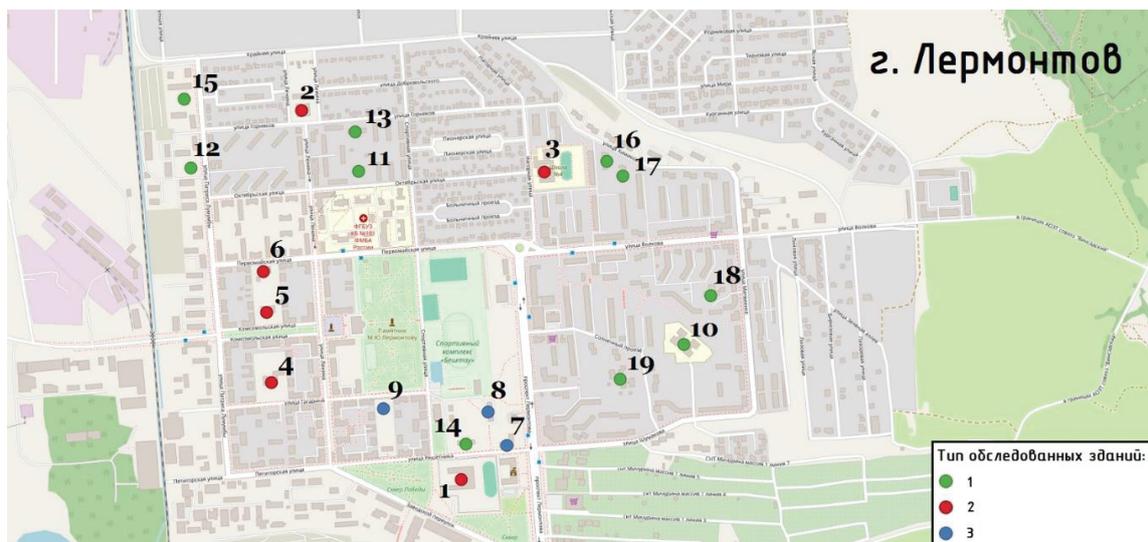


Рис. 1. Расположение зданий образовательных учреждений на карте г. Лермонтова (1 – детские сады, 2 – школы, 3 – внешкольные образовательные учреждения)

Fig. 1. Location of educational institutions on the map of Lermontov (1 – kindergartens, 2 – schools, 3 – extracurricular educational institutions)

теризующихся повышенным содержанием радия-226. В связи с повышенным содержанием радионуклидов в грунтах, в городе отмечается весьма непростая радиационная обстановка, в первую очередь, связанная с высокими концентрациями радона в помещениях зданий [9].

Цель данной работы – определение уровней объемной активности радона в воздухе помещений образовательных учреждений г. Лермонтова. На основании полученных результатов установить причины повышенной ЭРОА радона в воздухе помещений и закономерности ее формирования, а также оценить эффективные дозы обучающихся и педагогов за счет облучения радоном в помещениях образовательных учреждений.

Материал и методы

На рис. 1 показано расположение зданий образовательных учреждений на карте г. Лермонтова, в которых проводились радиационно-экологические исследования.

В процессе исследований были обобщены и уточнены результаты изучения радиационных характеристик зданий, выполненные с 2016 по 2024 гг. В г. Лермонтове на момент проведения исследований эксплуатировалось 19 зданий образовательных учреждений, все они были обследованы. На первом этапе была проведена оценка ЭРОА радона в помещениях исследуемых зданий на основе длительного мониторинга ОА радона интегральным трековым методом¹ с применением комплекта аппаратуры ТРЭК-РЭИ_1М на основе твердотельных трековых детекторов (LR 115–2)². Обработка результатов проводилась в соответствии с методическими документами³. Для преобразования измеренной ОА в единицы ЭРОА радона принимался фактор равновесия $F=0,5$.

¹ МВИ 2.6.1.003–99. «Радон. Измерение объёмной активности интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях»;

МИ «Радон. Измерение объёмной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом». Свидетельство об аттестации № 40090.2И385 от 16.07.2012.

² Комплект аппаратуры для измерений средней объёмной активности радона в воздухе трековым методом «ТРЕК-РЭИ-1М». Руководство по эксплуатации. ШТКД.1.297.001 РЭ. Зарегистрирован в реестре средств измерений под № 59297

³ МУ 2.6.1.037–2015. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности.

Измерения дублировались в теплый и холодный сезоны года. Холодный сезон соответствует отопительному периоду. Время экспозиции трековых детекторов составляло от 3 до 6 месяцев. В табл. 1 приведена общая информация об интегральных измерениях содержания радона, выполненных в зданиях образовательных учреждений г. Лермонтова.

Таблица 1

Общая информация о проведенных измерениях
General information about the measurements performed

Вид обследованных учреждений	Число обследованных зданий	Число измерений
Детские сады	10	1103
Средние школы	6	668
Внешкольные образовательные учреждения	3	271
Всего	19	2042

Всего было выполнено 2042 измерения. В каждом здании было проведено в среднем 113 измерений. Среди обследованных зданий преобладают 2–3-этажные здания, преимущественно из кирпича, 1950–1980-х гг. постройки. Подвалами оборудовано 65 % зданий. В подвалах и на цокольных этажах было выполнено 309 измерений (около 15 %).

На втором этапе в зданиях, где среднегодовое значение ЭРОА радона превышало уровень 200 Бк/м³, выполнялись углубленные исследования, в соответствии с разработанной методикой⁴, включающие измерения ОА радона в режиме непрерывного мониторинга с помощью мониторов радона Radon Eye Plus и Radex MR107. Периодичность регистрации усредненных данных для мониторов Radon Eye составлял 1 час и 4 часа у Radex MR107. Радон-мониторы располагались во всех основных помещениях зданий на высоте 0,5–2 м от пола. Продолжительность непрерывных измерений составляла от 3 до 10 сут, обычно в условиях естественной вентиляции. Также была определена объемная активность радона в водопроводной воде с помощью оборудования, входящего в измерительный комплекс «Камера-01».

⁴ МУ 2.6.5.062-2017. Углубленное обследование объектов с высокими уровнями содержания радона в помещениях.

На третьем этапе проводились исследования потенциальной радоноопасности территорий, прилегающих к исследуемым зданиям. С этой целью проводились измерения параметров, прямо или косвенно характеризующих выделение радона из геологической среды: ППР с поверхности грунта, удельная активность естественных радионуклидов в грунтах и мощность AMBIENTного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения. Измерения ППР выполнялись методом открытой камеры с активированным углем, применялся измерительный комплекс «Камера-01». Время экспонирования накопительных камер составляло 3–5 ч. Расширенная неопределенность результата измерений (2σ) составляет 20–40 %. Было выполнено в среднем по 10–12 измерений ППР на территории каждого детского сада и по 20–35 измерений на территории каждой школы. Всего выполнено более 200 измерений ППР. Измерения МАЭД внешнего гамма-излучения на открытой местности (территории) выполнялись на высоте около 1 м над землей в местах отбора проб и установки накопительных камер. Измерения МАЭД в помещениях выполнялись в центре на высоте около 1 м и по четырем углам. Неопределенность измерения не превышала 10 %.

На каждом участке отбиралось не менее 5 проб грунта, а также пробы строительных материалов. Пробы грунта и строительных материалов объемом не менее 1 л, отбирались в полиэтиленовые пакеты и снабжались этикетками. Измерения удельной активности радионуклидов проводились на стационарном гамма-спектрометрическом комплексе «Прогресс» на основе сцинтилляционного детектора NaI(Tl) 63×63 мм. Измерения удельной активности радия проводились по гамма-излучению дочерних продуктов распада радона без выдерживания проб в герметичном состоянии, то есть при отсутствии радиоактивного равновесия между радием и радоном, что могло несколько занижать результат (не более чем на 10–20 %).

Результаты и обсуждение

Оценка потенциальной радоноопасности территории

Результаты измерений удельной активности радионуклидов в грунтах г. Лермонтова представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, во всех пробах зарегистрированы высокие значения удельной активности радия-226, что предполагает высокую степень потенциальной радоноопасности участков. Среднее значение удельной активности радия-226 в исследуемых почвах и горных породах составило 103 Бк/кг, медиана – 79 Бк/кг, диапазон колебаний от 45 до 208 Бк/кг. Среднее содержание радия-226 в пробах грунта в несколько раз превышает среднемировой показатель, составляющий 39,2 Бк/кг, и в целом соответствует верхнему диапазону значений, характерных для кислых магматических пород [11]. Во всех пробах удельная активность радия-226 превышает условное граничное значение 40 Бк/кг [4] при превышении которого ППР на участке с большой вероятностью может превышать уровень, установленный ОСПОРБ-99/2010.

Среднее значение плотности потока радона с поверхности грунта на всех обследованных территориях превышало допустимый уровень для жилых и общественных зданий (80 мБк/(м²с)). В некоторых случаях зафиксировано превышение допустимого уровня в 3–5 раз. Обобщение данных по всем обследованным объектам показывает среднее значение ППР, равное

Таблица 2

Удельная активность естественных радионуклидов в пробах грунта

Specific activity of natural radionuclides in soil samples

№ п/п	Удельная активность радионуклидов в грунтах (почвах), Бк/кг			Тип пробы
	²²⁶ Ra ± Δ	²³² Th ± Δ	⁴⁰ K ± Δ	
1	182 ± 34	60 ± 15	1066 ± 180	глины мергелистые серо-бурые
2	57 ± 10	88 ± 10	745 ± 81	почва влажная черная
3	62 ± 18	104 ± 23	790 ± 136	почва черная с гравием
4	156 ± 32	251 ± 42	1586 ± 393	почва очень рыхлая влажная
5	160 ± 34	169 ± 23	1221 ± 190	почва рыхлая влажная
6	120 ± 24	132 ± 17	1134 ± 150	глина
7	151 ± 24	196 ± 20	1231 ± 140	обломки бештаунита
8	63 ± 15	26 ± 6	621 ± 137	почва черная влажная
9	94 ± 24	184 ± 34	1149 ± 318	почва с бештаунитом
10	64 ± 18	161 ± 28	1054 ± 267	почва черная с бештаунитом
11	46 ± 12	62 ± 15	504 ± 158	почва, деловый без включений
12	137 ± 34	160 ± 37	1222 ± 384	почва с бештаунитом
13	61 ± 18	91 ± 22	888 ± 261	почва черная
14	208 ± 37	243 ± 41	786 ± 253	грунт в подножие отвала
15	45 ± 9	43 ± 8	470 ± 90	техногенная почва
16	62 ± 13	65 ± 10	643 ± 128	глина, обл. бештаунита
17	45 ± 8	30 ± 6	530 ± 91	почва без включений
18	150 ± 30	182 ± 40	1280 ± 169	Почва с обл. бештаунита

263 мБк/(м²с), что более чем в 3 раза превышает уровень, установленный ОСПОРБ-99/2010, и более чем в 15 раз выше среднемирового значения [12]. Среднее геометрическое значение ППР составило 189 мБк/(м²с), медиана – 187 мБк/(м²с), диапазон колебаний – 31–2730 мБк/(м²с). Учитывая, что исследования проводились только при благоприятных условиях (в теплый период в сухую погоду), полученные результаты можно считать достоверными.

В табл. 3 в качестве примера представлены значения радиационных параметров на территориях, прилегающих к некоторым из обследованных зданий, а также средние значения ЭРОА на первых этажах этих зданий. В качестве примера выбраны одна из школ, два детских сада и одно внешкольное учреждение. Радоновая обстановка в школе, детском саду Б и внешкольном учреждении, представленных в таблице, является типичной для зданий образовательных учреждений г. Лермонтова. Детский сад А отличается от остальных обследованных зданий низким содержанием радона в помещениях. Этот детский сад был построен в 2015 г. с учетом всех требований к проектированию и строительству зданий на радоноопасных территориях. Фундамент здания представляет собой единый монолитный железобетонный короб, предотвращающий поступление радона из грунтов в подвальные помещения. Это единственное из обследованных зданий, где уровни ЭРОА радона во всех помещениях в полной мере соответствуют требованиям НРБ-99/2009.

Полученные результаты свидетельствуют о весьма высокой степени потенциальной радоноопасности территории, а, следовательно, высоком уровне выделения радона из грунтов основания в здания. Принимая во

Таблица 3

Средние значения и диапазоны МАЭД гамма-излучения, удельной активности радия-226 и ППР на территориях, прилегающих к зданиям некоторых образовательных учреждений г. Лермонтова, а также средние значения ЭРОА радона на первых этажах

Values of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation, specific activity of radium-226 and RFD (radon flux density) in the areas adjacent to some educational institutions in Lermontov, as well as average values of radon EEC on the first floors

Учебное заведение, Год постройки	МАЭД территории, мкЗв/ч	Удельная активность радия-226 в грунте, Бк/кг	ППР, мБк/(м ² с)	ЭРОА ср.год., Бк/м ³
Школа, 1971	0,19 0,15–0,22	128 74–176	258 51–2730	463
Детский сад А, 2015	0,19 0,12–0,24	80 55–114	152 94–520	43,5
Детский сад Б, 1977	0,18 0,14–0,22	65 50–98	207 97–725	456
Внешкольное образовательное учреждение, 1957	0,20 0,15–0,23	85 68–102	277 66–586	250

внимание высокие концентрации радия-226 в грунтах, большинство значений ППР, зарегистрированных на исследуемой территории, скорее всего, обусловлены выносом радона непосредственно из приповерхностного слоя грунта. Вместе с тем, на западном склоне горы Бештау ранее была выявлена мощная радоновая аномалия, связанная с конвективным переносом радона в зоне разлома [13], в этой связи можно предположить, что отдельные наиболее высокие значения ППР, зарегистрированные в г. Лермонтове, возможно, могут быть связаны с зонами повышенной трещиноватости горных пород. Высокая потенциальная радоноопасность территории обуславливает повышенные уровни радона в помещениях зданий.

Результаты определения ЭРОА радона в зданиях

Обработка результатов проведенных интегральных измерений показывает, что во всех обследованных зданиях, кроме упомянутого выше детского сада А, значения ЭРОА радона в тех или иных помещениях превышают уровень, установленный НРБ-99/2009 для эксплуатируемых зданий. В табл. 4 представлены полученные значения ЭРОА радона в четырех описанных выше зданиях в разные сезоны года.

Как видно из табл. 4, полученные результаты не позволяют установить четкой закономерности в сезонных колебаниях ЭРОА радона. Например, в школе значения ЭРОА в подвале и на 1 этаже летом выше, чем зимой, что не согласуется с общепринятыми представлениями

Таблица 4

Значения ЭРОА радона в помещениях образовательных учреждений г. Лермонтова на разных этажах в разные сезоны года (вверху – среднее значение, внизу – диапазон)
Radon EEC values in the premises of educational institutions in Lermontov on different floors in different seasons of the year (top – average value, bottom – range)

Учебное заведение, год постройки	ЭРОА радона, Бк/м ³							
	Подвал		1 этаж		2 этаж		3 этаж	
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето
Школа, 1971	377 137–864	800 631–1200	333 43–850	593 123–951	200 56–606	30 130–221	261 42–358	209 45–873
Детский сад А, 2015	58 16–120	50 28–81	42 12–85	45 28–60	45 12–68	46 31–70	–	–
Детский сад Б, 1977	12 4–28	140 104–199	462 13–1117	450 194–1347	339 187–660	238 71–178	–	–
Внешкольное учреждение, 1957	–	–	365 102–732	134 16–504	310 213–408	76 45–113	–	–

Примечание: «Зима» соответствует отопительному периоду, «Лето» – остальная часть года

о сезонных колебаниях радона в помещениях. На наш взгляд, это обусловлено различной эксплуатацией образовательных учреждений в холодный и теплый периоды года. В холодный период года школы работают в штатном режиме и помещения регулярно проветриваются. В то время как летом в школах трехмесячные каникулы, окна и двери, как правило, закрыты. Такое ограничение вентиляции может приводить к накоплению радона в помещениях.

Также из табл. 4 видно, что весьма высокие значения ЭРОА радона наблюдаются не только на 1-ом, но и на более высоких этажах, что характерно для большинства обследованных зданий. Результаты исследований показывают, что строительные материалы и водопроводная вода не могут быть источниками повышенного радона в зданиях г. Лермонтова, т.к. концентрация радия-226 в строительных материалах составляет 20–50 Бк/кг, редко достигая значения 70 Бк/кг, а содержание радона в водопроводной воде не превышает 0,3–0,7 Бк/л, что существенно ниже уровня вмешательства, равного 60 Бк/л. Таким образом, причиной формирования повышенных концентраций радона на 2 и 3-ем этажах является перенос воздушных масс за счет перепада давления и разности температуры воздуха между разными зонами и этажами здания, возникающими вследствие естественного воздухообмена из-за стек-эффекта, неравномерной инсоляции и ветрового напора, что подтверждается результатами исследования динамики радона в зданиях, которые описаны подробнее ниже. Как показали наши предыдущие исследования, в зданиях малой этажности конвективная циркуляция воздуха может приводить к существенному росту содержания радона в помещениях [14]. Интересно также, что в детском саду Б содержание радона в подвале существенно ниже, чем на 1 и 2 этажах, что, скорее всего, связано тем, что подвал, имеющий достаточно надежные бетонные ограждающие конструкции, сооружен не под всем зданием, а только в его центральной части, в результате, радон поступает в помещения 1-го этажа напрямую из грунта, минуя подвал.

Оценка доз облучения радоном в зданиях образовательных учреждений

Для оценки индивидуальной годовой эффективной дозы за счет радона в воздухе помещений образовательных учреждений г. Лермонтова, использовались следующие исходные данные: время нахождения в помещениях образовательных учреждений – 1000 ч в год, из них 650 ч в холодный (отопительный) период, и 350 ч – в теплый период года. Эффективная доза определялась на основании рекомендаций, представленных в [12, 15] по следующей формуле:

$$E_{\text{вн. Rn}} = 9,0 \cdot 10^{-6} \cdot 650 \cdot \bar{A}_{\text{экв ОП}} + 9,0 \cdot 10^{-6} \cdot 350 \cdot \bar{A}_{\text{экв ТП}} \quad (1)$$

где: $9,0 \cdot 10^{-6}$ мЗв/(ч·Бк/м³) – дозовый коэффициент, указанный в докладе НКДАР ООН за 2000 г. [12] и применяемый в отечественных нормативных документах [15]; $\bar{A}_{\text{экв ОП}}$ – среднее значение ЭРОА радона в воздухе помещений образовательных учреждений в холодный (отопительный) период года; $\bar{A}_{\text{экв ТП}}$ – среднее значение ЭРОА радона в воздухе помещений образовательных учреждений г. Лермонтова в теплый период года.

В результате проведения расчетов по формуле (1) с учетом данных, представленных в табл. 4, для каждого обследованного здания получены значения индивидуальной годовой эффективной дозы, представленные в табл. 5.

Таблица 5

Средние значения и диапазон индивидуальной годовой эффективной дозы облучения за счет радона в образовательных учреждениях г. Лермонтова

Average values and range of individual annual effective dose of radiation due to radon in educational institutions in Lermontov

Учебное заведение, год постройки	Значения индивидуальной годовой эффективной дозы, мЗв/год			
	Подвал*	1 этаж	2 этаж	3 этаж
Школа, 1971	2,73 1,79–8,83	3,82 0,64–7,98	1,58 0,43–4,25	2,18 0,39–4,85
Детский сад А, 2015	0,50 0,18–0,95	0,39 0,16–0,69	0,41 0,17–0,62	–
Детский сад Б, 1977	0,51 0,35–0,78	4,10 0,67–10,78	2,73 1,31–4,22	–
Внешкольное образовательное учреждение, 1957	–	1,30 0,70–6,85	2,04 1,39–2,75	–

Примечание: * Подвальные помещения не предназначены для пребывания обучающихся. Данные по подвальным помещениям представлены для сопоставления результатов с этажами, расположенными выше.

Годовые дозы облучения, представленные в табл. 5, как было указано выше, рассчитаны с учетом пребывания учащихся и педагогов в учебных заведениях в течение 1000 ч в год. Фактическое пребывание в помещениях учебных заведений может быть больше или меньше. Для оценки общей эффективной дозы, получаемой населением города за счет облучения радоном, необходимо учесть уровни облучения в жилых домах, что планируется выполнить в будущем.

Динамика ОА радона в помещениях

С целью выявления закономерностей формирования радонового режима зданий и уточнения основных путей поступления радона, были проведены исследования динамики ОА радона в помещениях в течение 3–10 сут. Измерения проводились во всех образовательных учреждениях г. Лермонтова, характеризующихся повышенными уровнями радона. На рис. 2–4 представлены графики колебаний ОА радона в воздухе помещений для трех упомянутых выше образовательных учреждений (за исключением детского сада А).

Измерения ОА радона в школе, представленные на рис. 2, проводились в период летних каникул, т.е. в теплый сезон. Как видно, ОА радона во многих помещениях существенно (в десятки раз) превышает нормативное значение. Во многих помещениях наблюдается хорошо выраженная суточная динамика ОА радона с максимумами в ночные часы и минимумами днем. Особенно высокие уровни радона, характеризующиеся четким и постоянным суточным ритмом зарегистрированы в подвале, в помещении щитовой, где максимальные значения ОА радона ночью превышали 10 тыс. Бк/м³, а днем происходило уменьшение ОА радона до значений, иногда близких к нормативным. Схожие по периоду суточные колебания ОА радона происходили в коридоре подвала, а также в помещениях первого этажа, но с существенно меньшей амплитудой и некоторой задержкой по времени. Следует особо отметить, что мониторинг радона проводился во внеучебное время, когда здание практически не эксплуатировалось, двери и окна были постоянно закрыты, вентиляционные системы отключены. Как показало детальное обследование, крайне высокие значения ОА радона в щитовой связаны с наличием негерметичной врезки подземных коммуникаций в данном помещении. Коммуникации проложены в подземных коллекторах, где радон накапливается в очень высоких концентрациях, по-видимому, близких к радиоактивному равновесию с радием-226, содержащимся в порах грунта. Недостаточная изоляция мест врезки коммуникаций приводит к поступлению радона из подземных коллекторов в подвальные помещения. Регулярность колебаний ОА радона в щитовой во внеучебное время объясняется, скорее всего, конвективным движением воздуха, обусловленным перепадом температуры внутри и снаружи здания (стек-эффектом). Ночью, когда температура снаружи снижается, более теплый воздух

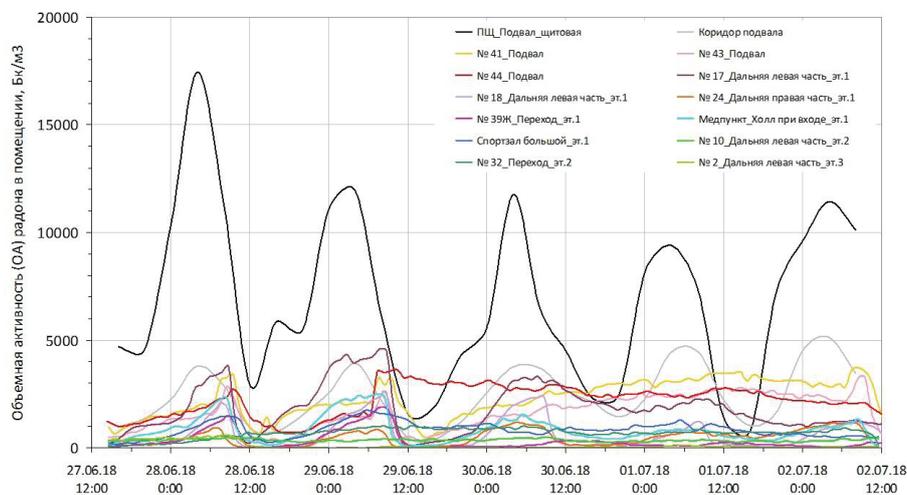


Рис. 2. Результаты непрерывных измерений ОА радона в помещениях школы

Fig. 2. Results of continuous measurements of indoor radon in the premises of school

внутри здания поднимается вверх, при этом на нижних этажах и в подвале создается область пониженного давления, плотный наружный воздух давит на оболочку здания, что приводит к затягиванию воздуха из подземных коллекторов и формированию повышенных концентраций радона в подвале. В дневное время стек-эффект отсутствует, но при этом усиливается перемещение (и перемешивание) воздуха между разными зонами и этажами здания вследствие проветривания, неравномерной инсоляции и ветрового напора. Последние два фактора работают и в закрытом здании, что приводит к снижению ОА радона днем. Проведенный мониторинг радона в разных помещениях школы показывает, что радон поступает из помещения щитовой на верхние этажи через один из центральных лестничных пролетов. Достаточно синхронные вариации ОА радона в помещениях разных корпусов и их частей, повторяющиеся с некоторой задержкой колебания радона в щитовой, свидетельствуют о значимом влиянии данного источника на поведение радона во всем здании.

На рис. 3 приведены результаты мониторинга ОА радона в помещениях детского сада Б.

Результаты непрерывных измерений ОА радона в детском саду Б вызывают интерес, поскольку для отдельных помещений зафиксированы резкие всплески ОА радона до аномально высоких значений. Всплески совпадают по времени с пробным запуском систем отопления в детском саду перед отопительным сезоном. Таким образом, повышение температуры внутри помещений в результате включения системы отопления приводит к существенному повышению ОА радона в от-

дельных помещениях, что, по-видимому, также связано с увеличением скорости переноса радона из геологической среды за счет влияния стек-эффекта. Регистрация подобных всплесков локально только в отдельных помещениях может свидетельствовать о плохой изоляции этих помещений от поступления радона из грунта (по сравнению с другими помещениями на 1-ом этаже), а также о слабом перемещении воздушных масс внутри здания в период наблюдения.

На рис. 4 представлены результаты непрерывного мониторинга радона в помещениях внешкольного образовательного учреждения. Результаты непрерывных измерений ОА радона в здании внешкольного образовательного учреждения также показывает наличие хорошо выраженного суточного ритма, причем схожие по характеру колебания ОА радона регистрируются практически во всех помещениях. Из рис. 4 видно, что в период с 6.00 – 9.00 утра в разных помещениях начинается снижение ОА радона, которое продолжается до 12.00. Интересно отметить, что в большинстве помещений содержание радона снижается ниже нормативного уровня. Начиная с 18.00 происходит увеличение ОА радона, которая к 21.00 в большинстве помещений достигает значений, существенно превышающих норматив. Зарегистрированные колебания ОА радона могут быть объяснены режимом регулярного проветривания здания (измерения проводились в сентябре во время штатного режима работы учреждения). Воздухообмен (проветривание) резко увеличивается в дневные часы, когда в здании присутствуют учащиеся. Вместе с тем, в формировании радонового режима здания определенную роль

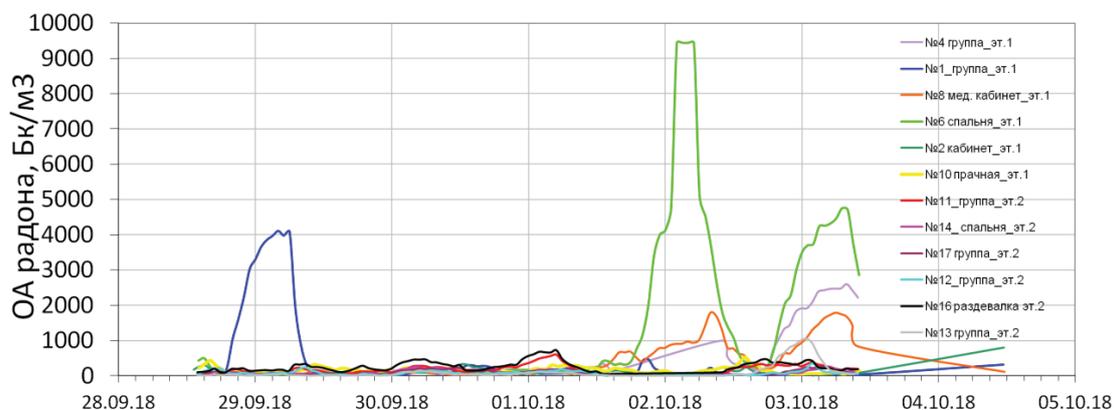


Рис. 3. Результаты непрерывных измерений ОА радона в помещениях детского сада Б
Fig. 3. Results of continuous measurements of indoor radon in the premises of kindergarten B

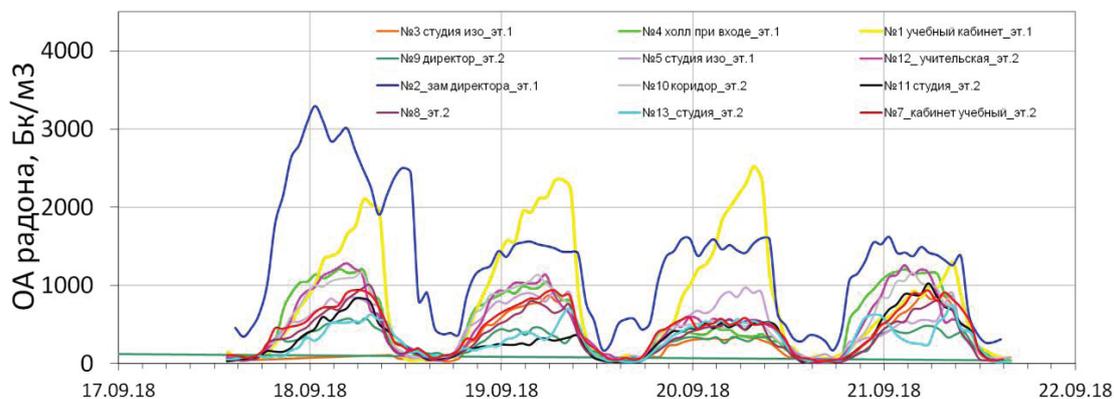


Рис. 4. Результаты непрерывных измерений ОА радона в помещениях внешкольного образовательного учреждения
Fig. 4. Results of continuous measurements of indoor radon in the premises of an extracurricular educational institution

может также играть стек-эффект, что подробно обсуждалось выше на примере школы (рис. 2). Об этом свидетельствуют, во-первых, почти синхронный рост ОА радона по вечерам на 1 и 2-ом этажах, что указывает на быстрое распространение радона из грунтов основания по всему зданию. Во-вторых, обращает на себя внимание схожесть характера суточных колебаний радона во внешнем учреждении (рис. 4) и в подвальных помещениях школы (см. рис. 2), где регулярного проветривания не было и значительную роль стек-эффекта в формировании радоновой обстановки здания можно считать доказанной. Однако для более обоснованных выводов необходимо проведение дополнительных исследований.

Проведенные исследования показывают, что в зданиях образовательных учреждений г. Лермонтова сложилась сложная радиационная обстановка, обусловленная крайне высоким выделением радона из геологической среды и его распространением на верхние этажи зданий. Высокие значения ЭРОА радона, в некоторых помещениях временами превышающие допустимый уровень в десятки раз, требуют принятия срочных мер по снижению уровней радона до значений, удовлетворяющих требованиям НРБ-99/2009.

Оценка эффективности радонозащитных мероприятий

Проведенные исследования показали недостаточную эффективность проведенных ранее противорадоновых мероприятий во всех обследованных зданиях, где такие мероприятия когда-либо выполнялись. Противорадоновые мероприятия были выполнены в 5 из 19 обследованных зданий в период с 1998 по 2016 гг. Меры включали устройство бетонных стяжек, гидроизоляцию внешних стен, полов, примыканий, рабочих швов, мест ввода инженерных коммуникаций и т.п., в отдельном случае выполнялась организация принудительного вентилирования подвальных помещений.

Однако, как показали результаты наших измерений, все эти мероприятия не привели к существенному снижению уровней радона в зданиях. Так, во внешнем учреждении, упомянутом выше, противорадоновые мероприятия выполнялись в 2011 г. в пяти наиболее проблемных помещениях на 1-ом этаже. Выполнялась изоляция полов мембраной из 2 слоев пленки ПВХ и битума, толщиной не менее 2 мм, с захлестом на вертикальные стены не менее чем на 30 см, а также герметизация специальными мастиками трещин, швов, стыков и узлов прохода инженерных коммуникаций через пол и стены. Однако, по результатам измерений в 2016–2018 гг., ЭРОА радона в здании существенно превышала допустимые уровни, в том числе, в помещениях, где проводились защитные мероприятия (табл. 4). Это связано с тем, что радонозащита выполнялась только в отдельных помещениях на основе устаревших пассивных технологий (герметизация щелей, изоляционные покрытия) эффективность которых составляет менее 50 % [16]. В то же время международный опыт показывает, что наиболее надежным и часто применяемым подходом для защиты зданий практически любого типа является принцип создания активной системы депрессии (АСД) в грунте или подпольном пространстве [16]. Кроме того, очевидно, что контроль эффективности противорадоновых мероприятий во всех 5 зданиях либо не проводился вовсе, либо был недостаточно надежным.

Анализ общей ситуации показывает, что в настоящее время решение проблемы повышенных уровней радона в зданиях образовательных учреждений возложено непосредственно на администрацию этих учреждений.

Дирекция детских садов и школ должна самостоятельно изыскать средства, объявить тендер и нанять строительную организацию. Однако у строительных организаций отсутствуют специалисты, навыки и опыт, необходимые для разработки проекта и осуществления противорадоновых мероприятий. Кроме того, на эти работы выделяется достаточно скромный бюджет в рамках возможностей образовательных учреждений. В итоге защитные мероприятия ограничиваются выполнением некоторого традиционного набора устаревших неэффективных мер пассивной защиты в отдельных проблемных помещениях, что в итоге не приводит, да и не может привести к снижению уровня радона в здании. На примере г. Лермонтова существующий подход продемонстрировал свою неэффективность. Очевидно, что для снижения содержания радона в зданиях (не только образовательных учреждений) необходим централизованный подход с привлечением соответствующих профильных специалистов, разбирающихся в особенностях формирования радоновой обстановки зданий, применением эффективных систем защиты от радона, а также выделением финансовых средств, достаточных для устройства надежной радонозащиты всего здания.

Заключение

В результате исследований была впервые проведена комплексная оценка средних по сезонам значений ЭРОА радона в помещениях зданий образовательных учреждений г. Лермонтова на основе длительного мониторинга с применением трекового метода, а также выполнен расчет эффективной дозы облучения, получаемой учащимися и педагогами за счет радона в период обучения. Во всех обследованных зданиях, кроме одного детского сада, зафиксированы существенные превышения допустимого уровня ЭРОА радона для жилых и общественных зданий (200 Бк/м^3). По результатам углубленного обследования зданий выяснено, что основным источником поступления радона в помещения является его выделение из грунтов основания и последующий перенос по всем этажам за счет конвекции. Подтверждена типичная временная закономерность поведения радона в зданиях, когда уровень радона существенно изменяется в течение суток от максимальных значений в ночные часы до минимальных значений в дневные часы.

Проведенные исследования выявили проблему неэффективности противорадоновых мероприятий, проводившихся в отдельных помещениях обследуемых зданий только на основе пассивной защиты. Показано, что данная проблема не может быть решена силами только администрации школ или муниципальных органов власти, а требует решения на федеральном уровне, например, в рамках национального плана действий по снижению облучения населения радоном, необходимость разработки которого давно назрела [17], но еще пока не осознана до конца лицами, принимающими решения. Кроме того, важным условием успеха является внедрение надежных современных методов радонозащиты с организацией надлежащего контроля их эффективности, включая разработку надежных методов тестирования зданий на основе рационального подхода [18], а не «мгновенных» (или «экспрессных») измерений, не обеспечивающих достоверность оценки.

Исследуемая территория является потенциально радоноопасной в связи с чем при проектировании и строительстве новых зданий на территории города необходимо в обязательном порядке предусматривать меры по противорадоновой защите зданий. В этой свя-

зи особую актуальность не только для г. Лермонтова, но и Кавказских Минеральных Вод в целом приобретает составление детальной карты потенциальной радоноопасности территории, на которой были бы показаны радоноопасные зоны, где необходимо при-

нимать превентивные меры радонозащиты при новом строительстве, а также, что не менее важно, выявлять существующие здания со сверхнормативным содержанием радона и неотложно проводить радонозащитные мероприятия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective / Ed. by Hajo Zeeb and Ferid Shannoun. Geneva: WHO Press, 2009. doi: 10.1080/00207230903556771.
2. Lecomte J.F., Solomon S., Takala J., Jung T., Strand P., Murith C., Kiselev S., Zhuo W., Shannoun F., Janssens A. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ottawa, 2014. 43 p.
3. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 118 с.
4. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
5. Гулябянц Л.А. Новый подход к решению проблемы защиты зданий от радона // Вестник МГСУ. 2011. №3-2. С.3-8.
6. Petermann E., Bossew P., Kemski J., Gruber V., Suhr N., Hoffmann B. Development of a High-Resolution Indoor Radon Map Using a new Machine Learning- Based Probabilistic Model and German Radon Survey Data // Environ. Health Perspect. 2024. V.132. No.9. P.97009. doi: 10.1289/EHP14171.
7. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Ставропольском крае в 2023 году: Государственный доклад. Ставрополь: Роспотребнадзор, 2023. 180 с.
8. Сидякин П.А., Янузян Э.Г., Фоменко Н.А., Вахилевич Н.В. Формирование уровней облучения населения региона Кавказских Минеральных Вод за счет радиоактивности горных пород // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2016. №1. С.66-70.
9. Петоян И.М., Шандала Н.К., Титов А.В., Зиновьева Н.В. Заболеваемость взрослого населения, проживающего в районе «уранового наследия» в условиях воздействия радона // Гигиена и санитария. 2022. Т.101. №3. С.281-287.
10. Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. М.: МГУ, 1963. 356 с.
11. IAEA. The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition. Technical Reports Series No.476. Vienna: IAEA, 2014.
12. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Unsear Report to the General Assembly VI. NY: UN, 2000. 654 p.
13. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Климшин А.В., Маренный А.М., Текеев Р.А., Финьковская Н.С., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А., Цебро Д.Н. Радиационная обстановка в районе горного массива Бештау // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2024. Т.33. №2. С. 65-78.
14. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Вариации объемной активности радона в традиционных деревенских домах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т.60. №1. С. 89-98. doi: 10.31857/S0869803120010117.
15. Стамат И.П., Барковский А.Н., Крисюк Э.М. и др. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. 22 с.
16. Khan S.M., James G., Krewski D.R. Radon Interventions Around the Globe. A Systematic Review // Heliyon. 2019. No.5 P.e01737. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01737.
17. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению // АНРИ. 2024. Т.1. №116. С.3-29. doi:10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
18. Цапалов А.А., Киселев С.М., Ковлер К.Л., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Жукковский М.В., Ярмошенко И.В., Маренный А.М., Тутельян О.Е., Кувшинников С.И. Стандартизация контроля радона в зданиях на основе рационального критерия оценки соответствия // Радиационная гигиена. 2023. Т.16. №4. С.84-104. doi: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104.

REFERENCES

1. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Ed. Hajo Zeeb and Ferid Shannoun. Geneva, WHO Press, 2009. DOI: 10.1080/00207230903556771.
2. Lecomte J.F., Solomon S., Takala J., Jung T., Strand P., Murith C., Kiselev S., Zhuo W., Shannoun F., Janssens A. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ottawa, 2014. 43 p.
3. Kriasyuk E.M. *Radiatsionnyy Fon Pomeshcheniy* = Radiation Background of Premises. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 118 p. (In Russ.).
4. Marennyy A.M., Tsapalov A.A., Miklyayev P.S., Petrova T.B. *Zakonomernosti Formirovaniya Radonovogo Polya v Geologicheskoy Srede* = Regularities of Radon Field Formation in the Geological Environment. Moscow, Pero Publ., 2016. 394 p. (In Russ.).
5. Gulabyants L.A. New Approach to Solving the Problem of Protecting Buildings from Radon. *Vestnik MGSU* = Bulletin of MGSU. 2011;3;2:3-8 (In Russ.).
6. Petermann E., Bossew P., Kemski J., Gruber V., Suhr N., Hoffmann B. Development of a High-Resolution Indoor Radon Map Using a new Machine Learning- Based Probabilistic Model and German Radon Survey Data. *Environ. Health Perspect.* 2024;132;9:97009. doi: 10.1289/EHP14171.
7. On the State of Sanitary and Epidemiological Well-Being of the Population in the Stavropol Territory in 2023. State Report. Stavropol, Rospotrebnadzor Publ., 2023. 180 p. (In Russ.).
8. Sidiyakin P.A., Yanukyayn E.G., Fomenko N.A., Vakhilevich N.V. Formation of Radiation Levels of the Population of the Caucasian Mineral Waters Region Due to the Radioactivity of Rocks. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka* = News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration. 2016;1:66-70 (In Russ.).
9. Petoyan I.M., Shandala N.K., Titov A.V., Zinov'yeva N.V. Morbidity of the Adult Population Living in the "Uranium Legacy" Area under Conditions of Radon Exposure. *Gigiyena i Sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2022;101;3:281-287 (In Russ.).
10. Milanovskiy Ye.Ye., Khaïn V.Ye. *Geologicheskoye Stroyeniye Kavkaza* = Geological Structure of the Caucasus. Moscow, Moskovskiy Gosudarstvennyy Universitet Publ., 1963. 356 p. (In Russ.).
11. IAEA. The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition. Technical Reports Series No.476. Vienna, IAEA, 2014.
12. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly VI. NY, Unsear, 2000. 654 p.
13. Miklyayev P.S., Petrova T.B., Klimshin A.V., Marennyy A.M., Tekeyev R.A., Fin'kovskaya N.S., Shchitov D.V., Sidiyakin P.A., Murzabekov M.A., Tsebro D.N. Radiation Situation in the Area of the Beshtau Mountain Massif. *Radiatsiya i Risk (Byulleten' Natsional'nogo Radiatsionno-Epidemiologicheskogo Registra)* = Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry). 2024;33:2:65-78 (In Russ.).
14. Miklyayev P.S., Petrova T.B. Variations in the Volumetric Activity of Radon in Traditional Village Houses. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2020;60;1:89-98. doi: 10.31857/S0869803120010117.
15. Stamat I.P., Barkovskiy A.N., Kriasyuk E.M., et al. *Otsenka Individual'nykh Effektivnykh Doz Oblucheniya Naseleniya za Schet Prirodnykh Istochnikov Ioniziruyushchego Izlucheniya* = Assessment of Individual Effective Doses of Population Irradiation Due to Natural Sources of Ionizing Radiation. Methodological Guidelines. Moscow, Federal'nyy Tsentri Gossanepidnadzora Minzdrava Rossii Publ., 2002. 22 p. (In Russ.).
16. Khan S.M., James G., Krewski D.R. Radon Interventions Around the Globe. A Systematic Review. *Heliyon.* 2019;5:e01737. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01737.
17. Tsapalov A.A., Miklyayev P.S., Petrova T.B., Kuvshinnikov S.I. Radon Regulation Crisis in Russia: Scale of the Problem and Proposals for Correction. *ANRI.* 2024;1;116:3-29 (In Russ.). doi: 10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
18. Tsapalov A.A., Kiselev S.M., Kovler K.L., Miklyayev P.S., Petrova T.B., Zhukovskiy M.V., Yarmoshenko I.V., Marennyy A.M., Tutel'yan O.Ye., Kuvshinnikov S.I. Standardization of Radon Control in Buildings Based on a Rational Conformity Assessment Criterion. *Radiatsionnaya Gigiyena* = Radiation Hygiene. 2023;16;4:84-104 (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-84-104.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-00028.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.12.2024. Принята к публикации: 25.01.2025.

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

Financing. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-00028.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.12.2024. Accepted for publication: 25.01.2025.