

**П.С. Микляев^{1,2}, Е.И. Кайгородов², Т.Б. Петрова³, А.М. Маренний², Л.Э. Карл², Д.В. Щитов⁴, П.А. Сидякин⁴,
М.А. Мурзабеков⁴, Д.Н. Цебро⁴, Ю.К. Губанова², М.Р. Мнацаканян², Г.П. Герцен²**

КАРТИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РАДОНООПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ Г. ПЯТИГОРСКА С УЧЕТОМ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

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

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

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

⁴ Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

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

РЕФЕРАТ

Цель: Картирование потенциальной радоноопасности территорий на основе результатов выборочных измерений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в помещениях общественных зданий в совокупности с анализом геологической информации, отраженной на Государственных геологических картах масштаба 1:200 000, подкрепленных результатами рекогносцировочных измерений содержания естественных радионуклидов в пробах грунта, на примере г. Пятигорска.

Материал и методы: Использовались результаты измерений ЭРОА радона в помещениях г. Пятигорска, проведенные преимущественно в детских садах, школах и ВУЗах города отдельно в летний и зимний периоды с помощью трекового метода с применением комплекта аппаратуры ТРЕК-РЭИ_1М (детекторы LR-115-2, помещенные в экспозиметры РЭИ-4). Всего проанализировано 2851 измерение ЭРОА радона в 97 зданиях. Измерения удельной активности естественных радионуклидов в 20 пробах грунта проведены с помощью гамма-спектрометра NaI(Tl) с программным обеспечением «Прогресс-2000».

Результаты: Проведено районирование территории г. Пятигорска по степени потенциальной радоноопасности. Предложены критерии выделения радиоопасных территорий. Установлено, что потенциально радиоопасными являются районы, сложенные покровными суглинками и майкопскими глинами с удельной активностью ^{226}Ra 40–84 Бк/кг. Среднее арифметическое значение ЭРОА радона в зданиях в таких районах составляет 125 и 109 Бк/м³, а доля значений ЭРОА, превышающих допустимый уровень 200 Бк/м³, – 18 и 13 % соответственно. Районы, сложенные относительно слаборадиоактивными аллювиальными отложениями, а также коренными мергелями, характеризуются относительно низким содержанием радия в грунтах (15–32 Бк/кг) и низкими значениями ЭРОА радона в помещениях (в среднем 50–70 Бк/м³), доля значений ЭРОА радона, превышающих допустимый уровень 200 Бк/м³, в таких районах не превышает 5 %. Для корректного выделения областей, характеризующихся грунтами различного типа, использовались карты как дочетвертичных, так и четвертичных отложений. В ряде случаев разрешение и детальность масштаба 1:200 000 оказалась недостаточной, что требует дополнительных геологических исследований для уточнения положения геологических границ на местности. В дальнейшем планируется проведение более детальных исследований удельной активности радионуклидов в грунтах, а также дополнение имеющихся данных результатами измерений плотности потока радона с поверхности грунта.

Заключение: Полученный опыт районирования может быть использован при разработке теоретических основ картирования потенциально радиоопасных территорий.

Ключевые слова: потенциальная радиоопасность, ЭРОА радона, удельная активность радия, картирование, районирование, геологические данные, Пятигорск

Для цитирования: Микляев П.С., Кайгородов Е.И., Петрова Т.Б., Маренний А.М., Карл Л.Э., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А., Цебро Д.Н., Губанова Ю.К., Мнацаканян М.Р., Герцен Г.П. Картирование потенциальной радиоопасности территории г. Пятигорска с учетом геологических данных // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 1. С. 45–52. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-1-45-52

**P.S. Miklyaev^{1,2}, E.I. Kaygorodov², T.B. Petrova³, A.M. Marenny², L.E. Karl², D.V. Shchitov⁴, P.A. Sidiakin⁴,
M.A. Murzabekov⁴, D.N. Tsebro⁴, Yu.K. Gubanova², M.P. Mnatsakanyan², G.P. Gertsen²**

Radon Hazard Mapping of Pyatigorsk City Considering Geological Data

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

² Enterprise 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

Contact person: P.S. Miklyaev, e-mail: peterm7@inbox.ru

ABSTRACT

Aim: To map the potential radon hazard of territories based on the results of sample measurements of radon equivalent equilibrium concentration (EEC) in the premises of public buildings in connection with the analysis of geological information reflected in the state geological maps at the scale of 1:200 000, supported by the results of reconnaissance measurements of the content of natural radionuclides in soil samples, using Pyatigorsk as an example.

Material and methods: The results of measurements of radon EEC in the premises of Pyatigorsk were used, which were carried out mainly in kindergartens, schools and higher educational institutions of the city separately in summer and winter periods with the help of the track

method using the equipment set TREC-REI_1M (LR-115-2 detectors placed in REI-4 dosimeters). A total of 2851 measurements of radon EEC in 97 buildings were analysed. Measurements of the specific activity of natural radionuclides in 20 soil samples were carried out using the gamma spectrometer Nal(Tl) with 'Progress-2000' software.

Results: The territory of Pyatigorsk was mapped according to the degree of potential radon hazard. It was found that potentially radon-hazardous areas are those composed of cover loams and clays with specific activity of ^{226}Ra 30–64 Bq/kg. The arithmetic mean value of radon EEC in buildings in these areas is 125 and 109 Bq/m³, and the proportion of EEC values exceeding the permissible level of 200 Bq/m³ is 18 and 13 %, respectively. Areas consisting of relatively low radioactive alluvial sediments and marls are characterised by a relatively low radium content in the soil (11–32 Bq/kg) and low radon EEC values in buildings (on average 50–70 Bq/m³); the proportion of radon EEC values exceeding the permitted level of 200 Bq/m³ in these areas does not exceed 5 %. Maps of both preQuaternary bedrocks and Quaternary sediments were used to correctly delineate areas characterised by different soil types. In some cases, the resolution and detail of the 1:200,000 scale proved to be insufficient, requiring additional geological investigations to clarify the position of geological boundaries on the ground. In the future it is planned to carry out more detailed studies of the specific activity of radionuclides in soils and to supplement the available data with the results of surface radon flux density measurements. The experience gained in zoning can be used in the development of theoretical bases for the mapping of potentially radon-hazardous areas.

Keywords: potential radon hazard, EEC, soil radium content, mapping, zoning, geological data, Pyatigorsk

For citation: Miklyaev PS, Kaygorodov EI, Petrova TB, Marenny AM, Karl LE, Shchitov DV, Sidiyakin PA, Murzabekov MA, Tsebro DN, Gubanova YuK, Mnatsakanyan MP, Gertsen GP. Radon Hazard Mapping of Pyatigorsk City Considering Geological Data. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(1):45–52. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-1-45-52

Введение

Как известно, облучение радоном и его дочерними продуктами распада в помещениях является второй по значимости причиной развития рака легкого после курения [1]. В соответствии с руководящими принципами Международной комиссии по радиационной защите (Публикация 126 МКРЗ) [2], объемная активность (OA) радона в жилых помещениях не должна превышать 300 Бк/m³. Отечественными Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) регулируется эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) дочерних продуктов распада радона, которая не должна превышать 200 Бк/m³ в помещениях существующих зданий и 100 Бк/m³ в новых зданиях. В последние десятилетия во многих странах мира в рамках национальных и международных программ, направленных на снижение облучения населения радоном, составляются карты содержания радона в помещениях с целью выявления областей наибольшего риска. Одна из первых таких карт была создана в 1990-е гг. в США [3]. Недавно была создана Европейская карта содержания радона в домах. В Европейском союзе в 2013 г. принята Директива 2013/59/Euroatom, которая предписывает выделять т.н. радоновые приоритетные области (Radon priority areas или RPA) – территории, где ожидается, что в значительном количестве домов среднегодовая концентрация радона будет превышать национальный референсный уровень [4]. В настоящее время в законодательстве большинства европейских стран к RPA относят области, где не менее чем в 10 % домов прогнозируемая среднегодовая объемная активность радона на 1-ом этаже превышает референсный уровень, который в разных странах составляет 100, 200 или 300 Бк/m³ [5].

Вместе с тем, крайне неравномерное пространственное распределение измерений содержания радона в домах, недостаточная достоверность таких измерений, а иногда и полное отсутствие возможности их проведения, заставляет использовать для составления карт радонового риска различные косвенные признаки. Прежде всего это геологические данные, такие как содержание радона в грунтовом газе, концентрация урана в почвах и горных породах, наличие определенных геологических формаций, разломов, карстовых пустот и т.п. [5–7]. Впервые полноценная детальная карта потенциальной радоноопасности, базирующаяся на геологической информации, была построена для территории штата Кентукки, США. Карта основана на сопоставлении 71 930 резуль-

татов краткосрочных тестов на радон (продолжительностью 4 сут) с детальной геологической картой масштаба 1:24 000 [8]. Здесь необходимо указать, что во всем мире есть лишь немного территорий, для которых имеются столь детальные геологические карты, что делает данный опыт в своем роде уникальным. Однако исследования в этом направлении активно проводятся во всем мире. В Евросоюзе в настоящее время разрабатывается концепция Индекса геогенной радоновой опасности (Geogenic Radon Hazard Index – GRHI), где пытаются объединить все доступные геологические и радоновые данные для составления единой карты радонового риска на территориях, характеризуемых разным набором измеренных параметров и детальностью геологических данных [9].

В российских нормативных документах требование выделения зон повышенного радонового риска в масштабах страны отсутствует. Вместе с тем, в соответствии с ОСПОРБ-99/2010 при строительстве зданий необходимо выбирать участки, где плотность потока радона не превышает 80 мБк/m² для жилых и общественных зданий и 250 мБк/m² для производственных зданий, в противном случае в проекте зданий должна быть предусмотрена защита от радона. В Методических указаниях «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности» (МУ 2.6.1.2398–08) введено понятие «потенциально радоноопасная территория» — территория, где геологические и геофизические характеристики подстилающих пород могут быть источником повышенного поступления радона в воздух зданий и сооружений. Основным признаком потенциальной радоноопасности считается значение плотности потока радона с поверхности грунта, согласно ОСПОРБ-99/2010. В качестве дополнительных признаков радоноопасности указано превышение допустимых уровней ЭРОА радона в воздухе помещений близлежащих зданий, повышенные значения удельной активности ^{226}Ra в подстилающих породах и объемной активности радона в почвенном воздухе на глубине 0,5–1,0 м. Таким образом, в России также существует требование выявления территорий, где по геологическим признакам возможны повышенные концентрации радона в зданиях. Огромная территория России и высокая неоднородность ее освоения делает использование косвенной геологической информации для составления

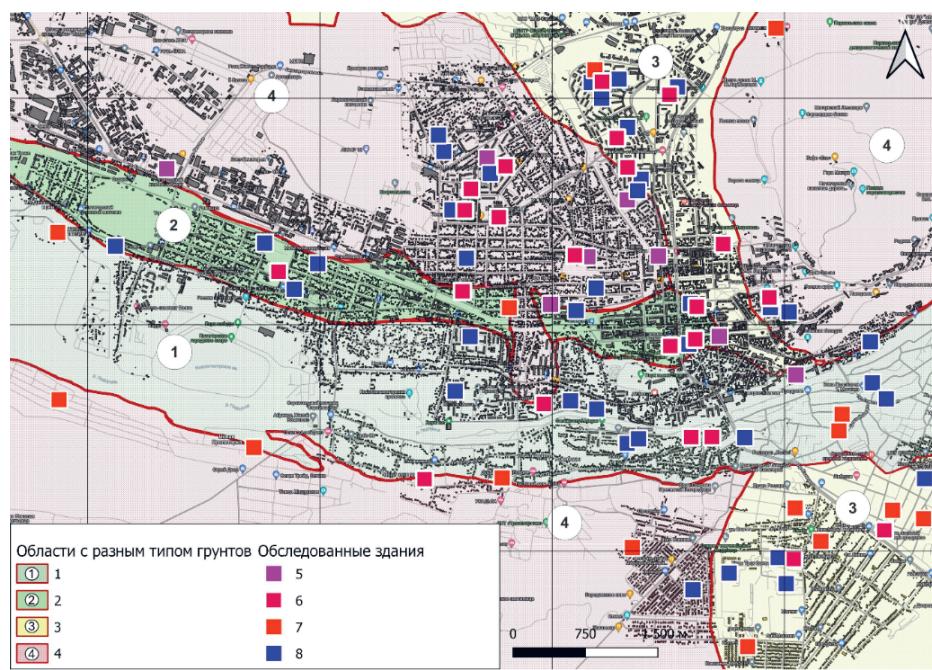


Рис. 1. Районирование территории г. Пятигорска по типу грунтов основания зданий и расположение обследованных зданий. Тип грунтов: 1 – гравийно-галечниковые грунты, 2 – суглинки покровные, 3 – майкопские глины, 4 – мергели с прослоями известняков и глин.

Тип обследованных зданий: 5 – ВУЗы, 6 – школы, 7 – жилые дома, 8 – детские сады

Fig. 1. Mapping of the Pyatigorsk according to the type of soil and the location of the surveyed buildings. The type of soil: 1 – gravel-pebble soils, 2 – loams, 3 – maikop clays, 4 – marls. The type of buildings surveyed: 5 – universities, 6 – schools, 7 – residential buildings, 8 – kindergartens

карт радонового риска весьма актуальным.

Пятигорск – крупнейший город агломерации Кавказских минеральных вод с численностью населения 145 тыс. чел. Регион в целом известен повышенной радиоактивностью геологической среды, присутствием урановых руд, разгрузкой радоновых минеральных вод [10], радоновыми аномалиями [11], повышенным содержанием радона в домах [12]. Таким образом, Пятигорск можно отнести к потенциально раденоопасным территориям, так ли это? Для решения этого вопроса были начаты наши исследования.

Цель данной работы – картирование потенциальной раденоопасности территории на основе результатов выборочных измерений ЭРОА радона в помещениях общественных зданий в совокупности с анализом доступной геологической информации, прежде всего, данных, отраженных на Государственных геологических картах масштаба 1:200 000, подкрепленных результатами рекогносцировочных измерений удельной активности естественных радионуклидов в пробах грунта, на примере г. Пятигорска.

Материал и методы

В ходе исследования использовались результаты измерений ЭРОА радона в помещениях г. Пятигорска полученные в период с ноября 2019 по сентябрь 2021 гг. НТЦ РХБГ ФМБА России при содействии кафедры «Строительство» инженерного факультета Пятигорского филиала СКФУ [13]. Измерения проводились в образовательных учреждениях (детские сады, школы, ВУЗы), а также выборочно в жилых зданиях. В каждом помещении детекторы экспонировались отдельно в летний (теплый) и зимний (холодный) периоды. Зимний сезон принимался в соответствии с отопительным периодом, который в Пятигорске продолжается с конца октября до середины апреля. Время экспозиции трековых детекторов составляло от 22 до 200 сут. В единичном случае время экспозиции составило 435 сут, что было связано

с ограничением доступа в некоторые помещения в связи с пандемией COVID-19. Измерения проводились интегральным трековым методом в лаборатории природных источников ионизирующего излучения НТЦ РХБГ ФМБА России с применением комплекта аппаратуры ТРЕК-РЭИ_1М с трековыми детекторами LR-115-2, помещенными в экспозиметры РЭИ-4. В результате измерений получали величину ОА радона в помещениях, переход к значениям ЭРОА радона осуществлялся с помощью коэффициента равновесия $F=0,5$.

Расположение исследованных зданий по территории города приведено на рис. 1. Количество и назначение обследованных зданий, а также количество выполненных измерений в целом и по сезонам года, а также основные характеристики обследованных зданий представлены в табл. 1. В каждом здании было проведено от 10 до 70 измерений (в среднем 33 измерения). Среди обследованных зданий преобладают 1–3-этажные здания, разных годов постройки (начиная с 1866 до 2020), преимущественно из кирпича, тип вентиляции, в основном, естественный. Подвалами оборудовано 65 % зданий. В основном измерения проводились на первом и втором этажах. Так, на 1-х этажах было проведено 1507 измерений, что составляет 60 % от общего количества измерений. На 2-х этажах выполнено в общей сложности 670 измерений (27 %). В подвалах и на цокольных этажах было выполнено 136 измерений (около 10 %). На 3-х и 4-х этажах измерения проводились выборочно: 67 (2,7 %) и 20 (1 %) измерений соответственно.

Для предварительной характеристики содержания ^{226}Ra в грунтах исследуемой территории, в районах города, характеризующихся различным типом грунтов, было отобрано по 5 проб грунта каждого литологического типа для определения удельной активности естественных радионуклидов. Пробы грунта отбирались из заброшенных карьеров, дорожных выемок, а также их небольших скважин, глубиной до 1,0 м, пройденных с помощью ручного бура. Измерения удельной активности

радионуклидов в пробах проводились на сцинтилляционном гамма-спектрометре с детектором NaI(Tl), оснащенном программным обеспечением «Прогресс-2000» в геометрии Маринелли 1 л.

Таблица 1

Количество и тип обследованных зданий и количество проведенных измерений
The number and type of buildings surveyed and the number of measurements taken

Вид обследованных учреждений	Количество зданий, шт	Количество измерений, шт		
		Лето	Зима	Всего
Детские сады	39	621	620	1 363
Школы	27	511	561	1 139
ВУЗы	12	107	226	337
Жилые здания	19	—	19	19
Всего	97	1 239	1 425	2 851

Пробы перед измерением гомогенизировались и высушивались. Пробы не выдерживались предварительно в герметичных контейнерах для восстановления радиоактивного равновесия между радием и его дочерними продуктами распада, эманирование радона учитывалось путем введения поправки с учетом коэффициента эманирования, принятого равным в среднем 0,24 по результатам предыдущих исследований [14].

Результаты и обсуждение

Результаты измерений представлены в табл. 2 и на рис. 2. Были построены гистограммы распределения значений ЭРОА и их натуральных логарифмов, а также Q-Q диаграммы. Анализ полученных данных свидетельствует о логнормальном характере распределения значений ЭРОА радона в помещениях, что подтверждается тестом Шапиро–Уилки и критерием Колмогорова–Смирнова.

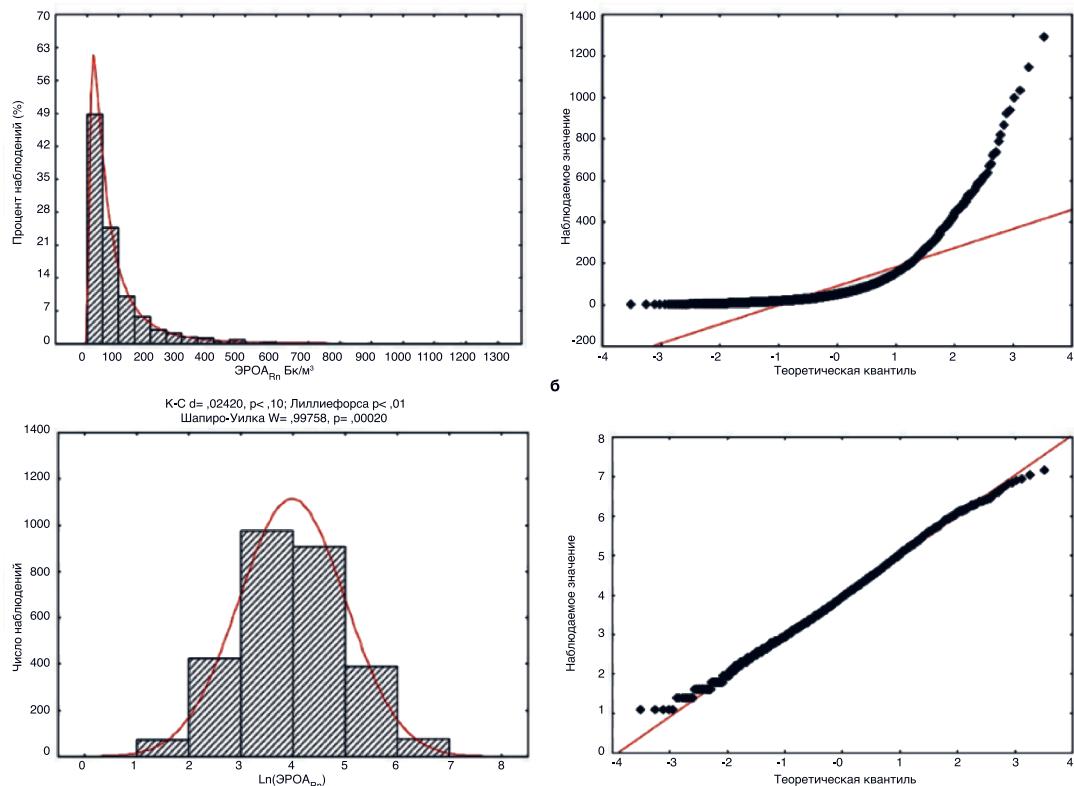


Рис. 2. Гистограммы частотного распределения и Q-Q диаграммы распределения измеренных значений ЭРОА радона (а) и их логарифмов (б) на территории г. Пятигорска

Fig. 2. Histograms of the frequency distribution and Q-Q diagrams of the distribution of the measured values of the EEC radon (a) and their logarithms (b) in buildings in Pyatigorsk

Таблица 2
Параметры распределения значений ЭРОА радона в зданиях г. Пятигорска
Parameters of the distribution of EEC radon values of buildings in Pyatigorsk

Кол-во изме-рений	Сред-не, $\text{Бк}/\text{м}^3$	Меди-ана, $\text{Бк}/\text{м}^3$	Сред-нее гео-метр., $\text{Бк}/\text{м}^3$	Гео-метр. стан-дарт	Диапазон, $\text{Бк}/\text{м}^3$	Доля значе-ний ЭРОА радона $> 200 \text{ Бк}/\text{м}^3$, %
2851	91	52	54	2,8	<10 – 2408	11

Как видно из табл. 2, среднее арифметическое значение ЭРОА радона составляет $91 \text{ Бк}/\text{м}^3$, что существенно выше, чем в большинстве городов России [15, 16], а также выше среднего содержания радона в домах Европы [6]. В то же время, это значение ниже, чем средние ЭРОА радона в пределах территорий, известных как зоны повышенного радонового риска, таких, например, Забайкальский край, Республика Алтай, Тыва, Еврейская АО [17]. Доля измеренных значений ЭРОА радона, превышающих уровень $200 \text{ Бк}/\text{м}^3$, составляет 11 %, что соответствует показателям, характерным для территорий с наиболее высокими уровнями радона, перечисленных выше [18].

Сравнивая с зарубежными стандартами регулирования радонового риска, можно сказать, что среднегодовое значение ОА радона в помещениях Пятигорска, равное $182 \text{ Бк}/\text{м}^3$ (с учетом коэффициента равновесия 0,5), превышает принятый в США уровень «красной» радоновой зоны ($148 \text{ Бк}/\text{м}^3$). Доля измеренных значений ОА радона, превышающих уровень, рекомендованный Европейским законодательством ($300 \text{ Бк}/\text{м}^3$) составляет 16 %. Таким образом, территория города может быть уверенно отнесена к приоритетным радоновым областям (Radon Priority Areas), для которых необходима разработка первоочередных противорадоновых мероприятий.

Вместе с тем, пространственное распределение повышенных значений ЭРОА радона в зданиях на территории Пятигорска неоднородно. В некоторых районах города здания, в которых норматив по ЭРОА радона превышен в большей части помещений, встречаются чаще, чем в других. Очевидно, что повышенное содержание радона в отдельных зданиях связано с особенностями их конструкции, допускающей проникновение радона в помещения, однако вероятность регистрации таких зданий на той или иной территории зависит от геологических и геофизических характеристик подстилающих пород, то есть, от потенциальной радиоопасности территории. Для дифференцированной оценки потенциальной радиоопасности территории г. Пятигорска было проведено районирование территории по типу приповерхностных отложений, являющихся основанием зданий. Для районирования использовались как геологические карты коренных дочетвертичных пород, так и карты четвертичных отложений, входящие в комплект Государственной геологической карты масштаба 1:200 000. Территория города была разделена на следующие четыре района с разным составом грунтов в основании зданий (см. рис. 1):

1. Область распространения поймы, I и II надпойменных террас р. Подкумок, протягивающиеся широкой полосой по обоим берегам реки. Территория сложена четвертичными аллювиальными гравийно-галечниковыми отложениями, песками, супесями с гравием и галькой, мощностью 3–20 м. Удельная активность ^{226}Ra в гравийно-галечниковых отложениях по результатам рекогносцировочных исследований составляет 15–29 Бк/кг, при среднем значении 22 Бк/кг.
2. Область распространения III надпойменной террасы р. Подкумок вытянута в меридиональном направлении вдоль северного (левого) борта речной долины, с поверхности покрыта слоем покровных суглинков, высокопористых, местами просадочных, мощностью до 12 м. Удельная активность ^{226}Ra в суглинках колеблется в диапазоне 40–72 Бк/кг, при среднем значении 52 Бк/кг.

3. Центральная часть города, а также водораздельные поверхности на правом берегу Подкумка, сложенные глинами майкопской серии. Майкопские глины характеризуются повышенными значениями удельной активности ^{226}Ra , которые по результатам предварительных измерений на исследуемой территории колеблются от 40 до 84 Бк/кг, среднее значение 68 Бк/кг.

4. Северо-восточная часть города, а также склоны горы Машук, сложенная преимущественно мергелями с прослойками глин и известняков палеогенового возраста с удельной активностью ^{226}Ra 14–32 Бк/кг, среднее 22 Бк/кг.

Для корректной оценки потенциальной радиоопасности территории по результатам выборочных измерений ЭРОА радона в зданиях необходим учет влияния на ЭРОА радона конструктивных особенностей зданий и других факторов, не связанных с геологией. На рис. 3 показано распределение среднеарифметических значений ЭРОА радона в помещениях в зависимости от различных факторов.

Как видно из рис. 3а, наибольшие значения ЭРОА радона регистрируются в подвалах и на первых этажах зданий. Это свидетельствует о ведущей роли грунтов основания как основного источника поступления радона в помещения. Учитывая, что в зданиях выше 2-го этажа выполнялись только выборочные измерения, а в подвалах, как правило, расположены помещения, не предусматривающие постоянного пребывания людей

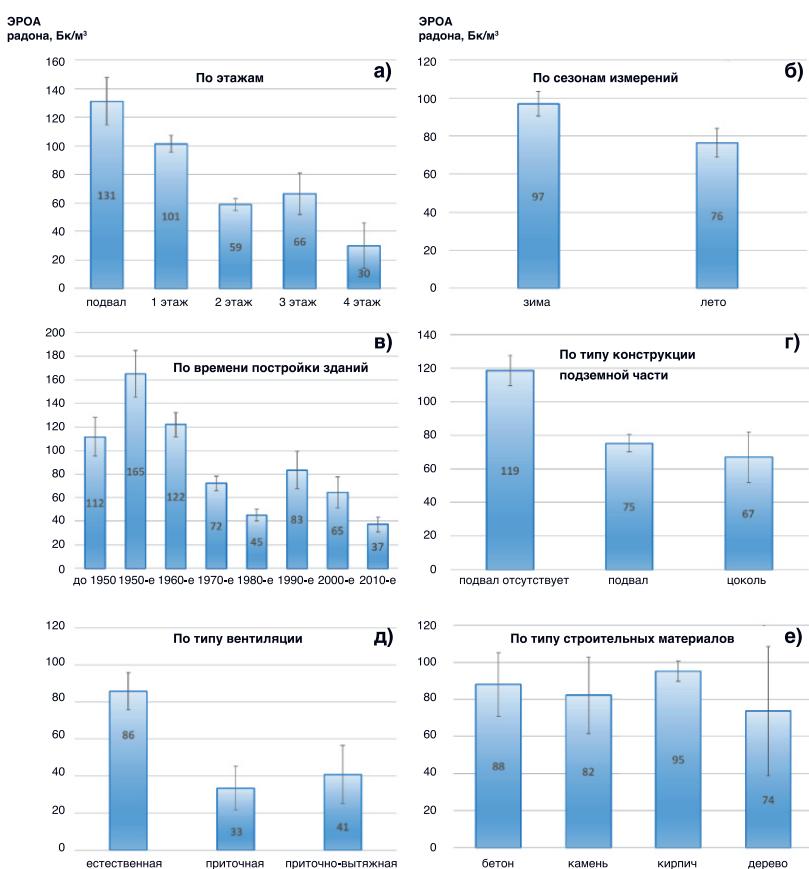


Рис. 3. Влияние различных факторов на ЭРОА радона в помещениях г. Пятигорска

Fig. 3. The influence of various factors on EEC radon in buildings of Pyatigorsk

(бойлерные, кладовые, подсобные и складские помещения) в дальнейшем анализ проводился для результатов измерений, полученных на 1-х и 2-х этажах. Анализ сезонной изменчивости ЭРОА радона в помещениях показывает, что в зимний период ЭРОА радона в среднем на 20 % выше, чем в летний (рис. 3б), что в целом соответствует общеизвестному тренду [6]. Здания постройки до 1970 г. характеризуются более высокими значениями ЭРОА радона, чем более поздние (рис. 3в). Наиболее высокие значения ЭРОА, в среднем, характерны для домов, построенных в 1950-е годы, которые имеют в основном ленточный фундамент и часто земляной пол в подвале. Близкие закономерности были установлены и в других городах России [16]. В зданиях, не оборудованных подвалами, ЭРОА радона на 1-х и 2-х этажах в среднем выше, чем в зданиях с подвалами и/или цокольными этажами, т.к. радон, по-видимому, напрямую поступает из грунтов основания в помещения 1-го этажа (рис. 3г). Наличие принудительной вентиляции ожидаемо приводит к снижению средних значений ЭРОА радона (рис. 3д). Наконец, тип строительных материалов не влияет существенно на содержание радона в помещениях исследуемых зданий (рис. 3е).

Таким образом, среднегодовое значение ЭРОА радона в обследованных помещениях в наибольшей степени зависит от года постройки здания, определяющего его конструктивные особенности и износ конструкций, а также от наличия в здании подвала и принудительной вентиляции. В связи с тем, что принудительной вентиляцией оборудовано только 12 % обследованных зданий, эти здания были выключены из дальнейшего анализа. По годам постройки и наличию подвалов выделенные районы отличаются друг от друга несущественно, не более чем на 20–25 %, что демонстрирует табл. 3. То есть, эти параметры не могут существенно повлиять на результаты оценки потенциальной радиоопасности территории.

Таблица 3

Характеристика обследованных зданий по году постройки и наличию в них подвалов в районах с разным типом грунта

Characteristics of the surveyed buildings by year of construction and the presence of basements in them in areas with different types of soil

Район	1	2	3	4
Доля зданий до 1970 г постройки, %	31	51	35	37
Доля зданий с подвалами, %	50	70	71	66

Для каждой из четырех выделенных областей, различающихся типом грунтов основания зданий, были рассчитаны параметры распределения ЭРОА радона в помещениях, результаты приведены в табл. 4. Полученные данные показывают, что наибольшие значения ЭРОА радона характерны для районов 2 и 3, сложенных грунтами с повышенным содержанием ^{226}Ra . В обоих районах средние по району значения ЭРОА радона превышают $100 \text{ Бк}/\text{м}^3$ (допустимый уровень для новых зданий), а доля значений ЭРОА радона, превышающих допустимый уровень $200 \text{ Бк}/\text{м}^3$, составляет более 10 %. Всего в пределах этих двух районов выявлено 77 помещений, где ЭРОА радона превышает допустимый уровень. Доля домов, в которых среднегодовое значение ОА радона хотя бы в одном помещении превышает $300 \text{ Бк}/\text{м}^3$, составляет более 50 %. Таким образом, районы 2 и 3 могут быть отнесены к потенциально радиоопасным территориям.

На остальной территории города, для которой характерно низкое содержание ^{226}Ra в грунтах (районы 1 и 4), средние по районам значения ЭРОА радона ниже допустимых пределов, а превышения допустимых

Таблица 4

Параметры распределения ЭРОА радона в помещениях в пределах районов с грунтом различных типов

Parameters of the distribution of EEC radon in buildings within areas characterized by different types of soils

№ района (состав грунта)	Содержание ^{226}Ra в грунтах, $\text{Бк}/\text{кг}$	ЭРОА радона в помещениях						
		Кол-во измерений	Среднее АМ, $\text{Бк}/\text{м}^3$	Среднее геометр. GM $\text{Бк}/\text{м}^3$	Медиана Med, $\text{Бк}/\text{м}^3$	Геометр. стандарт GSD	Диапазон Max-Min, $\text{Бк}/\text{м}^3$	Доля значений ЭРОА радона > 200 $\text{Бк}/\text{м}^3$, %
1 (галька, гравий, песок)	15–29	515	59	42	41	2,2	<10–591	2,5
2 (покровные суглинки)	40–72	418	125	74	70	2,7	<10–1293	18
3 (майкопские глины)	40–84	680	109	67	64	2,5	<10–2408	13
4 (мергели, известняки)	15–32	692	67	47	46	2,3	<10–513	4,3

уровней содержания радона встречается в отдельных помещениях менее чем в 5 % измерений. То есть, нет оснований для того чтобы считать данные территории потенциально радиоопасными. Однако в этих областях все же выявлены 24 помещения, в которых зарегистрированы превышения допустимого уровня ЭРОА радона $200 \text{ Бк}/\text{м}^3$. Следует отметить, что в основном это единичные помещения с затрудненным воздухообменом. Возможность присутствия зданий с повышенным содержанием радона вне радиоопасных зон широко известна [19]. Повышенное содержание радона в домах на безопасных по радиону территориях могут быть обусловлены особенностями конструкции здания, например, неудачной системой вентиляции, подсасывающей воздух из подвалов и/или коллекторов подземных коммуникаций, применением отделочных материалов с повышенным содержанием радия. Кроме того, на геологических картах масштаба 1: 200 000 (в 1 см 2 км) за счет высокой степени генерализации данных могут быть не отражены отдельные распространенные локально геологические слои, возможно содержащие повышенные концентрации радия, также возможны неточности в привязке геологических границ на местности.

Интерес представляет тот факт, что в зданиях, расположенных вблизи горы Горячка, где происходит разгрузка радионовых вод, превышения допустимых уровней ЭРОА радона практически не выявлено. Возможно, это связано с недостаточной плотностью сети обследованных зданий, что требует дополнительных исследований в будущем. Однако на данный момент можно предположить, что повышенные уровни ЭРОА радона в зданиях Пятигорска не связаны с переносом радона по разломам из более глубоких областей земной коры, а обусловлены поступлением радона, образующегося непосредственно в толще грунтов основания зданий за счет распада радия, содержащегося в этих грунтах.

Таким образом, опыт проведенных исследований показывает, что целесообразно введение понятия потенциальной радиоопасности территории не только для отдельных участков застройки, но и для крупных тер-

риторий, например, территорий городов, районов или областей. Это необходимо для обоснования первоочередных мер по проведению массовых измерений (скри-нинга) ЭРОА радона в зданиях и разработки комплекса радионозащитных мероприятий, направленных на снижение доз облучения населения за счет радона в зонах наибольшего риска, а также для информирования населения об условиях проживания и рисках для здоровья.

Полученные результаты позволяют предложить следующие критерии для выделения потенциально радиоопасных территорий: а) долю значений ЭРОА радона в помещениях, превышающих допустимый уровень (более 10 %), б) значение удельной активности ^{226}Ra в грунтах (более 40 Бк/кг), в) значение плотности потока радона с поверхности грунта (более 80 мБк/м²с). Территорию следует относить к потенциально радиоопасной в случае превышения указанных уровней хотя бы по одному из критериев. Выборочные измерения ЭРОА радона целесообразно проводить в помещениях общественных зданий, таких, как детские сады и школы, доступ в которые упрощён по сравнению с частным жилым фондом.

В качестве основы для районирования территории удобно и эффективно использовать Государственные геологические карты масштаба 1:200 000, которые находятся в открытом доступе и не являются секретными. Необходимо использовать карты как дочетвертичных, так и четвертичных отложений. Геологические карты дочетвертичных отложений показывают пространственное распространение разных типов коренных горных пород и геологических разломов, эти карты необходимы для районирования горных районов, где четвертичные отложения слабо развиты. Карты четвертичных отложений важны на равнинных территориях, во впадинах и долинах рек, где четвертичные отложения широко распространены и имеют значительную мощность. В предгорных областях требуется комплексное применение карт обоих типов. В ряде случаев разрешение и детальность масштаба 1:200 000 недостаточна, что требует дополнительных геологических исследований для уточнения границ на местности и выяснения характера

приповерхностных грунтов с обследованием горных пород в карьерах, дорожных выемках и строительных котлованах, бурением небольших скважин до глубины 1–1,5 м, а также анализом доступных материалов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий для строительства.

Заключение

В результате проведенных исследований была впервые проведена оценка содержания радона в жилых и общественных зданиях г. Пятигорска. Установлено, что значения ЭРОА радона в помещениях выше, чем в большинстве городов России. Доля значений ЭРОА радона, превышающих допустимый уровень 200 Бк/м³, составляет в среднем по городу 11 %, что сопоставимо со значениями, характерными для территорий наибольшего радионового риска не только в России, но и в мире. Проведено районирование города по степени потенциальной радиоопасности с использованием Государственных геологических карт масштаба 1:200 000, а также результатов выборочных измерений ЭРОА радона в зданиях и рекогносцировочных исследований содержания ^{226}Ra в грунтах, на основе чего выделены потенциально радиоопасные районы, где необходимо проведение первоочередных противорадоновых мероприятий.

Предложено в качестве критерии для выделения потенциально радиоопасных территорий использовать долю значений ЭРОА радона в помещениях, превышающих допустимый уровень (более 10 %), значение удельной активности ^{226}Ra в грунтах (более 40 Бк/кг) и значение плотности потока радона с поверхности грунта (более 80 мБк/м²с).

В дальнейшем планируется провести более детальные исследования удельной активности радионуклидов в грунтах исследуемой территории, а также дополнить имеющиеся данные результатами измерений плотности потока радона с поверхности грунта. Полученный опыт районирования может быть использован при разработке теоретических основ картирования потенциально радиоопасных территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective / Ed. Hajo Zeeb and Ferid Shannoun. Geneva: WHO Press, 2009. doi: 10.1080/00207230903556771.
- Lecomte J.F., Solomon S., Takala J., Jung T., Strand P., Murith C., Kiselev S.M., Zhuo W., Shannoun F., Janssens A. Radiological Protection Against Radon Exposure // Annals of the ICRP. 2014. V.43. No.3. P. 4-54.
- Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: от фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. 432 с.
- Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>.
- Bossew P. Radon Priority Areas-Definition, Estimation and Uncertainty // Nucl. Technol. Radiat. Prot. 2018. No.33. P. 286–292. DOI: 10.2298/NTRP180515011B.
- Cinelli G., De Cort M., Tollesen T. European Atlas of Natural Radiation. Luxembourg: Publication Office of the European Union, 2019. doi: 10.2760/46388.
- Čeliković I., Pantelić G., Vukanac I., Nikolić J.K., Živanović M., Cinelli G., Gruber V., Baumann S., Cirotti G., Poncela L.S.Q. et al. Overview of Radon Flux Characteristics, Measurements, Models and Its Potential Use for the Estimation of Radon Priority Areas // Atmosphere. 2022. V.13. No.12. P. 2005. <https://doi.org/10.3390/atmos13122005>.
- Haneberg W.C., Wiggins A., Curl D.C., Greb S.F., Andrews Jr. W.M., Rademacher K., Kay Rayens M., Hahn E.J. A Geologically Based Indoor-Radon Potential Map of Kentucky // GeoHealth. 2020. V.4. No.11. P. e2020GH000263. doi: 10.1029/2020GH000263.
- Bossew P., Cinelli G., Cirotti G., Crowley Q.G., De Cort M., Elío Medina J., Gruber V., Petermann E., Tollesen T. Development of a Geogenic Radon Hazard Index-Concept, History, Experiences // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. No.17. P. 4134. doi: 10.3390/ijerph17114134.
- Бондарева Г.Л. Гидрогеодинамические и гидрохимические особенности Пятигорского месторождения минеральных вод: Автoref. дис канд. геол.-минерал. наук. Пермь, 2011. 24 с.
- Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V., Sidiyakin P.A., Murzabekov M.A., Tsebro D.N., Marenny A.M., Nefedov N.A., Gavriliev S.G. Radon Transport in Permeable Geological Environments // Science of The Total Environment. 2022. V.852. P. 158382. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
- Пахолкина О.А., Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Лежнин В.Л., Верейко С.П. Исследование связи рака легкого с профессионально-бытовым облучением радоном в городе Лермонтов по принципу случай – контроль // Радиационная биология. Радиоэкология. 2011. Т.51. №6. С. 705.
- Кайгородов Е.И., Губанова Ю.К., Мнацаканян М.Р., Карл Л.Э. Обследование детских учреждений Пятигорска на содержание радона в помещениях // Матер. X Российской конференции с международным участием «Радиохимия-2022». Санкт-Петербург, 26-30 сентября 2022 г. СПб., 2022. С. 207.
- Маренний А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радионового поля в геологической среде. М.: Пере, 2016. 394 с.
- Маренний 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.
16. Жуковский М.В., Ярмощенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Назаров Е.И. Оценка уровней содержания радона в многоэтажных зданиях на примере восьми крупных городов России // Радиационная гигиена. 2022. Т.15. №1. С. 47-58. doi: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-47-58.
 17. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Барковский А.Н., Кормановская Т.А., Шевкун И.Г. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности

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.M., Zhuo W., Shannoun F., Janssens A. Radiological Protection Against Radon Exposure. Annals of the ICRP. 2014;43:3:4-54.
3. Kiselev S.M., Zhukovskiy M.V., Stamat I.P., Yarmoshenko I.V. *Radon: ot Fundamental'nykh Issledovaniy k Praktike Regulirovaniya* = Radon: from Fundamental Research to Regulatory Practice. Moscow, A.I. Burnazyan FMBC FMBA Publ., 2016. 432 p. (In Russ.).
4. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom; URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/59/oj>.
5. Bossew P. Radon Priority Areas-Definition, Estimation and Uncertainty. Nucl. Technol. Radiat. Prot. 2018;33:286-292. doi: 10.2298/NTRP180515011B.
6. Cinelli G., De Cort M., Tollesen T. European Atlas of Natural Radiation. Luxembourg, Publication Office of the European Union, 2019. doi: 10.2760/46388.
7. Ćeliković I., Pantelić G., Vukanac I., Nikolić J.K., Živanović M., Cinnelli G., Gruber V., Baumann S., Cirotti G., Poncela L.S.Q., et al. Overview of Radon Flux Characteristics, Measurements, Models and Its Potential Use for the Estimation of Radon Priority Areas. Atmosphere. 2022;13;12:2005. <https://doi.org/10.3390/atmos13122005>.
8. Haneberg W.C., Wiggins A., Curl D.C., Greb S.F., Andrews Jr. W.M., Rademacher K., Kay Rayens M., Hahn E.J. A Geologically Based Indoor-Radon Potential Map of Kentucky. GeoHealth. 2020;4;11:e2020GH000263. doi: 10.1029/2020GH000263.
9. Bossew P., Cinelli G., Cirotti G., Crowley Q.G., De Cort M., Elío Medina J., Gruber V., Petermann E., Tollesen T. Development of a Geogenic Radon Hazard Index-Concept, History, Experiences. Int. J. Environ. Res. Public Health 2020;17:4134. doi: 10.3390/ijerph17114134.
10. Bondareva G.L. *Gidrogeodinamicheskiye i Gidrogeokhimicheskiye Osobennosti Pyatigorskogo Mestorozhdeniya Mineral'nykh Vod* = Hydrogeodynamic and Hydrogeochemical Features of the Pyatigorsk Mineral Water Deposit. Extended Abstract of Candidate's Thesis (Geological and Mineral Sciences). Perm Publ., 2011. 24 p. (In Russ.).
11. Miklyayev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V., Sidyakin P.A., Murzabekov M.A., Tsebro D.N., Marenny A.M., Nefedov N.A., Gavriliev S.G. Radon Transport in Permeable Geological Environments. Science of The Total Environment. 2022;852:158382. doi: 10.1016/j.scitenv.2022.158382.
12. Pakholkina O.A., Zhukovskiy M.V., Yarmoshenko I.V., Lezhnin V.L., Vereyko S.P. Study of the Relationship between Lung Cancer and Occupational and Household Radon Exposure in the City of Lermontov Based on the Case-Control Principle. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2011;51;6:705 (In Russ.).
13. Kaygorodov Ye.I., Gubanova YU.K., Mnatsakanyan M.R., Karl L.E. Survey of Children's Institutions of Pyatigorsk for Radon Content in the Premises. *Radiokhimiya-2022* = Radiochemistry-2022. Proceedings of the X Russian Conference with International Participation. St. Petersburg, September 26-30, 2022. Moscow Publ., 2022. P. 207 (In Russ.).
14. Marenny A.M., Tsapalov A.A., Miklyayev P.S., Petrova T.B. *Zakonomernosti Formirovaniya Radonovogo Polya v Geologicheskoy Srede* = Regularities of Formation of Radon Field in Geological Environment. Moscow, Pero Publ., 2016. 394 p. (In Russ.).
15. Marenny A.M., Romanov V.V., Astafurov V.I., Gubin A.T., Kiselev S.M., Nefedov N.A., Penevez A.V. Conducting Surveys of Buildings of Various Purposes for Radon Content in the Territories Served by the FMBA of Russia. *Radiatsionnaya Gigiiena* = Radiation Hygiene. 2015;8;1:23-29 (In Russ.).
16. Zhukovskiy M.V., Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovskiy G.P., Vasil'yev A.V., Nazarov Ye.I. Assessment of Radon Levels in Multi-Story Buildings Using the Example of Eight Large Russian Cities. *Radiatsionnaya Gigiiena* = Radiation Hygiene. 2022;15;1:47-58 (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-47-58.
17. Onishchenko G.G., Popova A.YU., Romanovich I.K., Barkovskiy A.N., Kormannovskaya T.A., Shevkun I.G. Radiation-Hygienic Passporization and ESKID - an Information Basis for Making Management Decisions to Ensure Radiation Safety of the Population of the Russian Federation. Communication 2. Characteristics of Sources and Doses of Radiation Exposure to the Population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gigiiena* = Radiation Hygiene. 2017;10;3:18-35 (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35.
18. Romanovich I.K., Kormannovskaya T.A., Kononenko D.V. To the Substantiation of Changes in the Standardization of Radon Content in Indoor Air. *Zdorov'ye Naseleniya i Sreda Obitaniya* = Public Health and Life Environment. 2019;6;315:42-48 (In Russ.). doi: [10.3562/2219-5238/2019-315-6-42-48](https://doi.org/10.3562/2219-5238/2019-315-6-42-48).
19. Petermann E., Bossew P., Hoffmann B. Radon Hazard vs. Radon Risk – on the Effectiveness of Radon Priority Areas. Journal of Environmental Radioactivity. 2022;244-245. doi: 10.1016/j.jenvrad.2022.106833.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-17-00217.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 20.10.2024. Принята к публикации: 25.11.2024.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-17-00217.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 20.10.2024. Accepted for publication: 25.11.2024.