

Н. А. Барило¹, Е. А. Удальцов¹✉

Санитарно-гигиеническая оценка содержания радона в воздухе подвальных и цокольных помещений г. Новосибирска

¹ Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ugodnic@gmail.com

Аннотация. Для Новосибирска актуальной является проблема высокой радоноопасности. Это подтверждается статистикой государственных докладов, карт потенциальной радоноопасности и дозовых нагрузок. Причиной высокой радоноопасности являются роговообманково-биотитовые граниты с многочисленными проявлениями и рудопоявлениями естественных радионуклидов (ЕРН): урана ^{238}U и ^{232}Th , на которых расположено около 70% территории города. Как следствие, в отдельных районах города наблюдаются высокие значения объемной активности продукта распада U(Ra) радона ^{222}Rn . Опасность радона для человека становится все актуальнее в результате массового переоборудования подвалов, цокольных и других помещений, расположенных ниже уровня земли под мастерские, магазины, пункты выдачи заказов и другие организации. Целью работы является оценка годовой эффективной индивидуальной дозовой нагрузки от радона и его дочерних продуктов распада и значения пожизненного риска смерти от рака легкого, вызванного облучением радоном и его ДПР в течение одного календарного года на рабочем месте. В результате проведенного исследования установлено, что среднее значение эквивалентной равновесной объемной активности радона и дозовой нагрузки находится в пределах требований норм. Однако выявлены помещения, где дозовая нагрузка превышает допустимый уровень облучения и приводит к увеличению риска заболеваемости и смерти от рака легкого. Данная работа может быть актуальна для организаций и работников, чьи постоянные рабочие места располагаются в подвальных и цокольных помещениях.

Ключевые слова: радон, доза, радиационный риск, плотность потока радона

N. A. Barilo¹, E. A. Udaltsov¹✉

Sanitary and hygienic assessment of radon content in the air of basements and ground floors in Novosibirsk

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ugodnic@gmail.com

Abstract. For Novosibirsk, the issue of high radon hazard is highly relevant. This is confirmed by statistics from state reports, maps of potential radon hazard, and dose loads. The high radon hazard is caused by hornblende-biotite granites with numerous occurrences and ore manifestations of natural radionuclides (NRN): uranium-238 (^{238}U) and thorium-232 (^{232}Th), which underlie about 70% of the city's territory. As a result, certain areas of the city exhibit high levels of volumetric activity of the uranium decay product (Ra) radon-222 (^{222}Rn). The danger of radon to humans is becoming increasingly relevant due to the widespread conversion of basements, ground floors, and other below-ground spaces into workshops, stores, pickup points, and other businesses. The aim of this study is to assess the annual effective individual dose load from radon and its decay products, as well as the lifetime risk of lung cancer mortality caused by exposure to radon and its decay products over one calendar year in the workplace. The results of the study show that the average value of the equivalent equilibrium volumetric activity of radon and the dose load complies with regulatory requirements. However, certain premises were identified where the dose load exceeds permissible exposure levels, leading to an increased risk of lung cancer incidence and mortality. This study may be relevant for

organizations and workers whose permanent workplaces are located in basement and ground-floor premises.

Keywords: radioecology, natural radionuclides, radioactive waste, radioactive contamination

Введение

Воздействие радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) на население представляет собой значимую радиологическую проблему, поскольку средний вклад радона в годовую эффективную дозу облучения в Российской Федерации достигает ~50%, а в отдельных регионах с повышенной естественной радиоактивностью геологических пород может превышать 80% [1].

В 1987 году Международное агентство по изучению рака (МАИР) классифицировало радон и его дочерние продукты распада (ДПР) как канцерогены группы 1 «Достоверные канцерогены для человека», идентифицировав их в качестве прямой причины развития рака легкого [2–3]. Помимо бронхопульмонального рака, повышенная объемная активность радона в воздухе может индуцировать злокачественные новообразования носоглотки и гортани. После ингаляционного поступления в легкие радон подвергается радиоактивному распаду с образованием ДПР, которые, осаждаясь на респираторном эпителии, вызывают локальное радиационное поражение тканей. Это приводит к повреждению ДНК, накоплению мутаций и последующему неконтролируемому делению клеток, т.е. злокачественным новообразованиям. Ключевой радиационный риск связан не с самим радоном, а с его короткоживущими ДПР, которые обеспечивают основной вклад (до 90%) в дозовую нагрузку на органы дыхания. Хроническое профессиональное облучение в условиях повышенных концентраций радона приводит к статистически значимому росту онкологической заболеваемости [4].

За последние три десятилетия в Российской Федерации наблюдается масштабное переоборудование ранее неэксплуатируемых подвальных и цокольных помещений под рабочие зоны с временным и постоянным пребыванием персонала.

Данная практика актуализирует проблему радиационной безопасности работников, поскольку указанные помещения демонстрируют статистически значимо более высокие показатели объемной активности радона по сравнению с надземными сооружениями.

Особую научную и практическую значимость приобретает оценка индивидуальной эффективной дозовой нагрузки и радиационного риска на территориях с потенциально повышенной радоноопасностью. Согласно исследованиям А.Д. Онищенко и М.В. Жуковского, вклад радонового облучения в профессиональные дозовые нагрузки достигает 50% и более, существенно превышая соответствующие показатели для жилых помещений [5]. Кроме того, по материалам А.А. Цапалова и др., в России наблюдается «кризис регулирования радона», включающий в себя вопросы оценки вклада радона в дозовую нагрузку, защиты населения от облучения радоном, а также, ограниченность мероприятий по защите от радона зданий и сооружений [6].

Город Новосибирск расположен в пределах Обского гранитного массива, сложенного преимущественно роговообманково-биотитовыми гранитами с ло-

кальными рудопроявлениями естественных радионуклидов (ЕРН) - урана ^{23}U и тория ^{232}Th , встречающихся как в виде самостоятельных минералов, так и в виде изоморфных примесей. Особенно высокая концентрация ЕРН отмечается в зонах тектонических нарушений [7].

Проведенные исследования свидетельствуют, что около 70% городской территории подстилается гранитами с аномальными содержаниями урана и тория, что обуславливает повышенную объёмную активность радона ^{222}Rn в отдельных районах мегаполиса [8].

Комплексные исследования, выполненные Новосибирским территориальным геологическим управлением совместно с Геоэкоцентром ССП «Березовгеология» и ФГУП «Новосибирская геолого-поисковая экспедиция» в период 1993-1996 гг., позволили составить карту «Радиационной обстановки и радоноопасности г. Новосибирска».

Согласно полученным данным, значительные территории города классифицируются как потенциально радоноопасные.

С момента проведения данных исследований застройка города интенсифицировалась и претерпела значительные изменения (точечная застройка). А подвальные и цокольные помещения как во вновь построенных, так и существующих зданиях обрели новое назначение, в которых располагаются предприятия и организации с постоянными и временными рабочими местами.

В связи с этим представляет интерес оценка эффективной дозовой нагрузки и радиационного риска от облучения радоном работников с постоянным и временным пребыванием на рабочих местах в подвальных и цокольных помещениях.

Методы и материалы

Выбор участков для проведения радиологических исследований обусловлен картой «Радиационной обстановки и радоноопасности г. Новосибирска».

Определение потенциально радоноопасных зданий проведено согласно «Методике экспрессного измерения плотности потока ^{222}Rn с поверхности земли с помощью радиометра радона типа РРА» [9]. Данная методика позволяет оценить радоноопасность территории, на которой находится здание, и на основании измеренных данных ППР (более 80 мБк/(м²·с)) принять решение о переходе к измерениям в помещении. Измерения ППР осуществлялись радиометром радона РРА-01М-01 «Альфарад» с пробоотборным устройством ПОУ-04.

Измерение ППР основано на определении количества радона, накопленного в пробоотборнике или в камере РРА в течение фиксированного времени за счет поступления с поверхности почвы известной площади. Работа РРА основана на электростатическом осаждении ионизированных дочерних продуктов распада радона в измерительной камере на поверхность полупроводникового детектора и последующей регистрацией альфа-излучения RaA (^{218}Po).

Экспрессные измерения ППР (от 20 до 80 мБк/(м²·с)) для начального обследования участка проведены с отбором проб радона в пробоотборники в полевых условиях и последующим измерением ОАР в пробах с помощью РРА в стационарных условиях.

Для повторного измерения ППР в точках, где наблюдалось превышение регламентированной величины $80 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, проводился отбор проб радона непосредственно в камеру РРА в полевых условиях и измерение на месте отбора проб.

Экспрессные измерения ЭРОА проведены с применением радиометра радона и торона RAMON–01М. Принцип работы радиометра заключается в отборе аэрозолей ДПР на аэрозольные фильтры АФА–РСП–20 и измерение активности альфа-излучателей полупроводниковым кремниевым детектором альфа-частиц, работающим на автоматическом альфа-спектрометрическом методе измерения.

Измерения ЭРОА проведены в помещениях группы «В» – административные, образовательные и общественные здания по методике «Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности» [10].

Данные об эквивалентной равновесной объёмной активности (ЭРОА) радона в исследуемом помещении явились отправной точкой для оценки эффективной дозовой нагрузки и радиационного риска от облучения радоном.

Расчет дозовых нагрузок проведен по методическим рекомендациям МР 2.6.1.0088–14, п. 7.4 «Форма федерального статистического наблюдения № 4–ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона» [11].

Расчет показателей радиационного риска для радона и его ДПР выполнен по Методическим рекомендациям МР 2.6.1.0145–19 «Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации» [12].

Результаты

В ходе проведения измерений ППР получены следующие результаты: минимальное значение $70,5 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; среднее $385,5 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; максимальное $1541 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Распределение значений по ППР представлено на рис. 1.

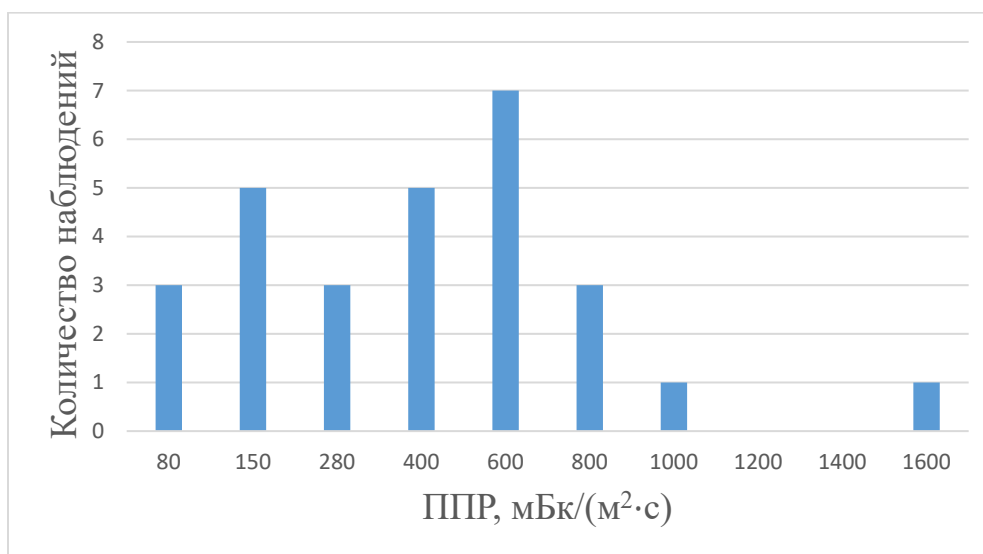


Рис. 1. Распределение ППР радона по количеству наблюдений.

Измерения проводились в трех районах г. Новосибирска. В Ленинском районе 18 измерений, среднее 506,58 мБк/(м²·с), в Первомайском 147,6 мБк/(м²·с), в Октябрьском 220,6 мБк/(м²·с). Значительно большее количество измерений в Ленинском районе объясняется выбором этого района как наиболее потенциального для исследования исходя из карты радиационной обстановки и радоноопасности г. Новосибирска.

Измерения ЭРОА радона проведены в 27 помещениях в Ленинском, Первомайском, Октябрьском районах г. Новосибирска и п. Краснообск. Ранжирование территорий приведено исходя из данных карты «Радиационной обстановки и радоноопасности г. Новосибирска». Помещения разделены на 3 группы в соответствии с действующими максимально допустимыми нормами ЭРОА радона [13].

Рассчитаны значения пожизненного риска смерти от рака легкого, вызванного облучением радоном и его ДПР в течение одного календарного года для рабочих помещений с максимальной измеренной ЭРОА и средней по всем помещениям. Для помещения с измеренной ЭРОА 400 Бк/м³ значение риска составляет $1 \cdot 10^{-3}$. Среднее значение риска составляет $2,2 \times 10^{-4}$, что в 1,84 раза больше среднего значения риска по России в 2023 году ($1,2 \times 10^{-4}$) [1] (табл. 1).

Таблица 1

Среднегодовые значения ЭРОА радона и эффективной дозовой нагрузки* в административных, образовательных и общественных зданиях г. Новосибирска

Потенциально радоноопасные зоны				Остальные территории	
Здания постройки до 2000 года		Здания постройки после 2000 года		Здания постройки до 2000 года	
ЭРОА _{ср.год} , Бк/м ³	Доза, мЗв/год	ЭРОА _{ср.год} , Бк/м ³	Доза, мЗв/год	ЭРОА _{ср.год} , Бк/м ³	Доза, мЗв/год
115	1,80	33	0,51	25	0,25
55	0,86	64	1	65	1
60	0,94	225	3,51	35	0,53
21	0,33	16	0,25	25	0,25
73	1,14	20	0,31	142	2,18
400	6,24	18	0,28	121	1,86
370	5,78	114	1,78	27	0,41
63	0,98	61	0,94	26	0,4
57	0,89	53	0,81	58	0,89

*Годовая индивидуальная эффективная дозовая нагрузка рассчитана на 8-ми часовой рабочий день.

Обсуждение

Измерения плотности потока радона показали стабильно высокие значения, свидетельствующие о радоноопасности территорий. Однако, с точки зрения ин-

женерно-строительных изысканий или мониторинга, применение ППР для оценки радоноопасности территорий остается не самым практичным решением, так как на эманацию радона из грунтов влияет большое количество факторов, в результате чего экспрессные измерения ППР могут не обладать необходимой точностью. Для решения данной проблемы, по мнению авторов, необходимо актуализировать и развивать карты радиационной обстановки и радоноопасности, подобные карте «Березовгеологии», созданные более 30-ти лет назад. С помощью данных карт возможно производить ранжирование территорий по радоноопасности, и сразу определять необходимые мероприятия по защите зданий от радона.

Необходимо отметить и факт отсутствия обнаружения изотопа радона ^{220}Rn , иногда именуемого «тороном». Данный факт еще раз подтверждает обсуждаемую в научных кругах проблему контроля и измерений радона в России. Нормирование радона в ЭРОА не отвечает рекомендациям Международного комитета по радиационной защите (МКРЗ) [14] и Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). [15] Нормирование ЭРОА призвано учитывать оба изотопа радона, но на практике вклад «торона» крайне мал или вовсе отсутствует. Кроме того, максимально допустимая ЭРОА в 200 Бк/м^3 при пересчете в объёмную активность (ОА) радона составляет 400 Бк/м^3 и превышает международные рекомендации (300 Бк/м^3). Переход к нормированию ОА радона и снижение максимально допустимых значений поможет гармонизации с международной практикой и расширению списка применяемых средств измерений, таких как интегральные трековые детекторы.

Заключение

В результате измерений установлено, что 14,8% помещений не соответствуют установленным в НРБ–99/2009 требованиям максимально допустимой ЭРОА радона. В потенциально радоноопасных зонах превышения нормативных значений отмечены как в зданиях, построенных до 2000 года, так и зданиях, введенных в эксплуатацию позднее. Максимальное значение ЭРОА радона и индивидуальная эффективная годовая дозовая нагрузка составили 400 Бк/м^3 и $6,24 \text{ мЗв/год}$ (только в результате облучения радоном, без учета медицинского, техногенного и природного (за исключением радона) облучения). Среднее значение ЭРОА радона составляет $86,7 \text{ Бк/м}^3$. Средняя эффективная годовая дозовая нагрузка от облучения радоном для потенциально радоноопасных территорий составляет $1,57 \text{ мЗв/год}$, что на 12% больше значения по региону [8].

Благодарности

Авторами выражается благодарность генеральному директору ООО ЛСРМ А.А. Трохану за предоставление программного обеспечения NuclideMaster и GammaLab.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – 2024. – 364 с.

2. "IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Man-made Mineral Fibres and Radon," Lyon, France, Volume 43. – 1987.
3. "International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans." Vol 78. Ionizing radiation. Part 2: Some internally deposited radionuclides. Lyons: IARC. – 2001.
4. Булдаков Л.А., Калистратова В.С. Радиоактивное излучение и здоровье. – М.: Информ Атом. – 2003. – 165 с.
5. Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Определение индивидуальной экспозиции по объемной активности радона при смешанном производственно-бытовом облучении. // АНРИ. – 2016. – № 3. – С 35-41.
6. 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. – № 1 (116). – С 3-29.
7. Злобина А.Н., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Фархутдинов И.М., Ванг Нанпинг. Радиоэкологическая опасность для населения в районах распространения высокорadioактивных гранитов. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 3 (330). – С 111-125.
8. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Новосибирской области в 2023 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – 2023. – 277 с.
9. Методика экспрессного измерения плотности потока ^{222}Rn с поверхности земли с помощью радиометра радона типа РРА. ЦМИИ ГП ВНИИФТРИ. – 1998. – 21 с.
10. Методические указания. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности, МУ 2.6.1.037–2015. Государственная система санитарно-эпидемиологического нормирования Российской Федерации, М., – 2015.
11. Форма федерального статистического наблюдения № 4–ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088–14. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2014. – 38 с.
12. Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации: Методические рекомендации МР 2.6.1.0145–19. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – 2019. – 14 с.
13. СанПиН 2.6.1.2523–09. "Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009". М.; Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиены, сертификации и экспертизы Минздрава России. – 2009. – 114 с.
14. ICRP Publication 126. Radiological Protection against Radon Exposure. Ann. ICRP, vol. 43, no. 3, 2014. Труды МКРЗ. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126. 2014. МКРЗ. – М.: изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России». – 2015. – 88 с.
15. IAEA Safety Standards Series no. GSR, part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. Sources: International Basic Safety Standards. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR, part 3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. МАГАТЭ, Вена, 2015.

© Н. А. Барило, Е. А. Удальцов, 2025