

Т.Н. Лашенцова<sup>1,3</sup>, Л.Э. Карл<sup>2,3</sup>, А.М. Маренный<sup>2</sup>

## РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО РАДОНООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

<sup>1</sup>Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва.<sup>2</sup> Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, Москва<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов, Москва

Контактное лицо: Лидия Эдуардовна Карл: lidiakarl@yandex.ru

### РЕФЕРАТ

Современные радиозоологические исследования по оценке влияния естественной радиации на организм человека показали, что на данный момент развития общества основной вклад в облучение населения вносят природные источники ионизирующего излучения, при этом из них от 50 до 90 % дозовой нагрузки обусловлены газом радон-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) и дочерними продуктами его распада (ДПР).

В данной работе представлены результаты радиационно-гигиенического мониторинга потенциально радоноопасной территории города Балей Забайкальского края. Измерение объемной активности радона ( $\text{OAR}_n$ ) проводили в помещениях жилых и общественных зданий интегральным методом с помощью трековых экспозиметров РЭИ-4. По показателю эквивалентной равновесной объемной активности радона ( $\text{ЭРОAR}_n$ ) проводили радиационно-гигиеническую оценку помещений и расчет потенциальных дозовых нагрузок на население, проживающее на этой территории.

Исследования показали, что  $\text{OAR}_n$  в помещениях жилых и общественных зданий зависит от геологической характеристики территории, от конструкции и проекта зданий и сооружений, от используемых строительных материалов. Установили, что основным критерием для оценки потенциальной радоноопасности территорий является величина  $\text{OAR}_n$  в помещениях на первых этажах зданий. Территорию города Балей по степени потенциальной радоноопасности можно поделить условно на 3 типа: 1 тип – территория, расположенная на геологическом разломе; 2 тип – южная часть территории города, представленная осадочными горными породами; 3 тип – северная часть территории города, представленная горными породами габброидной группы основного состава с низким содержанием природных радионуклидов. Типы зданий и сооружений и вид строительных материалов влияют на дозовую нагрузку, но не определяют её.

**Ключевые слова:** радон-222, объемная активность, ЭРОА, потенциальная радоноопасность территорий, категорирование территорий, жилые и общественные здания, объекты ядерного наследия

**Для цитирования:** Лашенцова Т.Н., Карл Л.Э., Маренный А.М. Радиационно-гигиенический мониторинг на потенциально радоноопасных территориях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С. 42–50.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-42-50

### Введение

Защита населения от негативного воздействия ионизирующих излучений является важной экологической задачей. Эпидемиологические исследования, проводимые в ряде стран мира по радиационному обследованию территорий, при нормальной эксплуатации радиационно-опасных объектов, показали, что радиационный фон территорий формируется в основном за счет природных источников ионизирующего излучения и остаточного содержания техногенных радионуклидов после испытания ядерного оружия и крупных ядерных аварий. Наибольший вклад в облучение населения вносят природные источники ионизирующего излучения, основным из которых является газ радон ( $^{222}\text{Rn}$ ) [1].

На территориях проживания населения  $^{222}\text{Rn}$  может попадать в помещения несколькими путями: из геологических разломов, из грунта под зданием, из строительных материалов, а также с подземными водами, которые могут использоваться для систем водоснабжения населения [2, 3].

$^{222}\text{Rn}$  – природный радиоактивный газ, который образуется при распаде ядер атомов природных радионуклидов  $^{235,238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , входящих в структуру минералов, составляющих горные породы. Минеральная составляющая различается в зависимости от происхождения горных пород. Ввиду химической инертности газ  $^{222}\text{Rn}$  покидает кристаллическую решетку и мигрирует из почвы, распространяется и попадает в подземную воду, приземный слой атмосферного воздуха, замкнутые пространства, где накапливается, так как он тяжелее воздуха, и далее он может поступать в здания [4].

В России более 50 лет ведется активное обследование территорий субъектов РФ на содержание  $^{222}\text{Rn}$  в помещениях общественных и жилых зданий разными организациями, такие работы проводятся и в структуре ФМБА России, в том числе на базе НТЦ РХБГ и ФМБЦ им. А.И. Бурназяна [5 – 8]. Эти исследования позволили выявить территории, которые характеризуются повышенным

содержанием  $^{222}\text{Rn}$ , и соответственно, являются потенциально радоноопасными для проживания населения. На территории РФ такие территории расположены на Алтае, в Забайкалье, на Северном Кавказе, в Северо-Западном регионе и других регионах.

Важной и актуальной задачей на потенциально радоноопасных территориях является выявление всех факторов, влияющих на содержание  $^{222}\text{Rn}$  в помещениях жилых и общественных зданий, которые позволят оценить уровень облучения населения при принятии решений для защиты населения.

Целью данной работы является проведение радиационно-гигиенического мониторинга на потенциально радоноопасной территории.

В качестве объекта исследования выбрали территорию города Балей Забайкальского края, где и проводился локальный мониторинг. Детальное обследование помещений, находящихся в жилых и общественных зданиях позволили по показателю эквивалентной равновесной объемной активности радона ( $\text{ЭРОAR}_n$ ) дать радиационно-гигиеническую оценку помещений и оценить потенциальных дозовых нагрузок на население, проживающее на этой территории. Полученные данные позволили предложить критерии оценки потенциальной радоноопасности территорий, которые можно использовать и на других территориях.

### Материал и методы

Для измерения объемной активности радона ( $\text{OAR}_n$ ) в помещениях жилых и общественных зданий использовали интегральный метод. Принцип метода заключается в регистрации альфа-частиц, которые образуются при распаде ядер  $^{222}\text{Rn}$  и его ДПР, с помощью твердотельных трековых детекторов [9].

Отбор проб воздуха проводили с помощью пассивных пробоотборных камер (экспозиметры) с трековыми детекторами типа LR-115-2. Детекторы помещают в пробо-

отборные камеры. После выдержки в помещении в течение определенного времени, которое зависит от предполагаемой нагрузки, их извлекают, проводят химическую обработку травлением, затем подсчитывают количество зарегистрированных следов (треков) альфа-частиц электроискровым методом с помощью электро-искрового счетчика треков АИСТ-4 из комплекта аппаратуры ТРЕК-РЭИ-1М [10, 11].

В качестве критерия оценки использовали среднегодовую эквивалентную равновесную объемную активность радона ( $ЭРОА_{Rn}$ ), значение которой не должно превышать  $200 \text{ Бк/м}^3$  в эксплуатируемых жилых помещениях согласно п. 5.3.3. НРБ-99/2009 [12].

Среднегодовое значение  $ЭРОА_{Rn}$  рассчитывали по измеренной  $ОА_{Rn}$  в холодное и теплое время года, согласно требованиям МУ 2.6.1. 037-2015 [13]. Для перехода от измеренных значений  $ОА_{Rn}$  к  $ЭРОА_{Rn}$  использовали значение коэффициента равновесия, равное 0,5.

Расчет индивидуальной среднегодовой эффективной дозы внутреннего облучения (СЭГД) для населения проводили по методике МУ 2.4.1.1088-02 [14].

### Результаты

В качестве объекта исследования выбрали территорию города Балей Забайкальского края. Балей – небольшой город, большинство зданий старых лет постройки, с малой этажностью, которые строились во время интенсивной техногенной деятельности на этой территории.

Город Балей расположен у южного подножия Борщовочного хребта, на правом берегу реки Унды, в 350 км к юго-востоку от города Читы. В настоящее время в городе проживает около 11 тыс. человек. С 1853 г. в черте города велась золотодобыча из россыпей. В 1929 г. в окрестностях села Новотроицкое открыто Балейское месторождение золота. В 1948 г. начата разработка Тасеевского золоторудного месторождения. В пределах Балейского рудного района находятся три горных предприятия, в том числе рудник «Балей», рудник «Тасеево», Ундинский прииск, участки Явленка, Каменка, Казаковский, Алия, Средний Голготай, две золотоизвлекательные фабрики, ГРЭ и др. вспомогательные производства. Балейское и Тасеевское месторождения обрабатывались подземными горными выработками и карьерами. Отработка россыпных месторождений велась 7 крупнолитражными драгами. В 1995 г. рудная добыча золота прекращена. На этой же территории также проводилась добыча тория из монацитовых песков. В результате эксплуатации месторождений образовались отвалы вскрышных пород, карьеры, хвостохранилища, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду [15]. Исторически накопилась большая масса флотационных золотосодержащих рудных хвостов (илов), с высоким содержанием тория-232, которые складировались в два хвостохранилища в черте города на берегу реки Унда [17]. Все отвалы имеют повышенное содержание природных радионуклидов [16, 17].

Была разработана программа мониторинга на данной территории. Схему и организацию выборочного обследования формировали в соответствии с [18]. Объем выборки для обследуемых помещений в жилых квартирах и односемейных жилых домах определяли из расчета не менее 1 % от их общего числа в населенном пункте. При этом учитывали этажность здания, тип межэтажных перекрытий (деревянные, кирпичные, шлакоблочные и др.), а также наличие подвалов под зданием и другие характеристики, которые заносили в паспорта измерений, далее все данные заносили в базу данных и формировали запросы для анализа данных [10, 11].

Обследование помещений проводили в зданиях в режиме их штатной эксплуатации в два периода времени

года: в теплый летний период и в отопительный период. В помещениях экспозиметры размещались на высоте 1 – 2 м от пола, вдали от окон, отопительных и иных приборов [10, 11].

Всего провели обследование 251 здания, из них 14 – детские сады и школы, 5 – медицинские учреждения, 37 – иные учреждения, 195 – жилые дома, в которых обследовали 1348 помещений: 767 – в отопительный, 581 – в теплый периоды. По результатам обследования получили данные по удельной  $ОА_{Rn}$  в помещениях общественных и жилых зданий.

### Результаты измерений

По данным  $ОА_{Rn}$  была рассчитали  $ЭРОА_{Rn}$ , как основной нормируемый показатель. Проведена соответствующая статистическая обработка полученных значений  $ЭРОА_{Rn}$ , рассчитаны параметры распределения, которые приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что в помещениях жилых и общественных зданий на территории г. Балей для  $ЭРОА_{Rn}$  при нормативном значении  $200 \text{ Бк/м}^3$ :

- все значения СГ и медианы не превышают норматив;
- значения СА превышают норматив на 1-ых этажах как в теплый, так и в отопительный периоды;
- максимальное значение на 1-ом этаже выше норматива в ~10 раз;
- наибольшие значения СА, СГ, медианы – на 1-ом этаже;
- количество превышений норматива на 1-ых этажах равно 255 шт, что составляет ~ 65 % от общего числа превышений на всех этажах (392 шт.);
- процент превышений норматива на всех этажах – 29 %, из них: на 1-ых этажах – 34 %, на 2-ых этажах – 25 %, на 3-их этажах – 19%, на 4-ых этажах – нет;
- границы доверительного интервала в отопительном и теплом периоде пересекаются, следовательно, различие значений  $ЭРОА_{Rn}$  между периодами статистически не значимо.

Анализ табл. 1 показывает, что основное превышение  $ЭРОА_{Rn}$  имеет место в помещениях, расположенных на 1-ых этажах зданий. Чтобы установить факторы, которые влияют на повышенные значения  $ЭРОА_{Rn}$  в этих помещениях, провели дальнейшее исследование.

Превышения  $ЭРОА_{Rn}$  на первых этажах могут быть связаны с геологическими особенностями территории, поэтому провели исследование по выявлению зависимости  $ЭРОА_{Rn}$  от геологической характеристики территории.

### Характеристика территории по степени потенциально радоноопасности в зависимости от геологических особенностей территории

Скорость эксгаляции радона с поверхности земной коры определяется геологическим строением территории, зависит от содержания природных радионуклидов в горных породах, от дисперсности горных пород, определяется тектоническими разломами земной коры и/или геодинамически активными зонами на территории.

Прежде всего, выход радона на территории зависит от содержания природных радионуклидов в горных породах, которые входят в структуру минералов слагающих почв. Рассмотрим содержание природных радионуклидов в разных типах горных пород. В табл. 2 представлено массовое содержание урана, тория в разных типах горных пород [19].

Из табл. 2 видно, что содержание урана-238 в изверженных горных породах, таких как граниты, гранодиориты, колеблется от 2,2 до  $6,1 \times 10^{-6}$  г/т. Габбро содержит  $0,8 \times 10^{-6}$  г/т, базальты –  $0,1 - 1 \times 10^{-6}$  г/т. Метаморфические горные

Таблица 1

Параметры распределения среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности  $^{222}\text{Rn}$  в помещениях жилых и общественных зданий на территории г. Балей, n=1348, шт  
Distribution parameters of the average annual equivalent equilibrium volumetric activity (EEVA) of  $^{222}\text{Rn}$  in the premises of residential and public buildings on the territory of Baley, n = 1348

Этаж	Сезон	Параметры распределения значений ЭРОА <sub>Rn</sub>								
		N	СА	СГ	СО	Медиана и границы ее доверительного интервала*	Мин.	Макс.	Превышение 200 Бк/м <sup>3</sup>	
Ед. измерения		шт	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	—	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	%	шт
1	ТП	364	213	131	279	123 (94 – 151)	9	2087	32	116
	ОП	393	243	135	298	121 (92 – 150)	6	1868	35	139
	Всего	757	228	133	289	122 (101 – 143)	6	2087	34	255
2	ТП	190	155	105	161	111 (89 – 134)	13	1102	25	48
	ОП	273	169	104	198	91 (68 – 114)	10	1130	25	69
	Всего	463	163	104	184	98 (81 – 115)	10	1130	25	117
3	ТП	23	74	62	43	70 (52 – 88)	21	199	0	0
	ОП	83	131	101	95	98 (78 – 118)	19	439	24	20
	Всего	106	119	91	89	86 (69 – 103)	19	439	19	20
4	ТП	4	30	30	4	30 (26 – 34)	30	34	0	0
	ОП	18	51	49	11	52 (47 – 57)	15	69	0	0
	Всего	22	47	45	13	48 (43 – 53)	15	69	0	0
Итого	ТП	581	187	117	243	114 (94 – 134)	9	2087	28	164
	ОП	767	200	116	250	99 (81 – 117)	6	1868	30	228
	Всего	1348	194	117	247	108 (95 – 121)	6	2087	29	392

Примечание: ТП – теплый период; ОП – отопительный период; СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение.

\* – при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница

породы, такие как гранулиты, содержат  $4,9 \times 10^{-6}$  г/т урана-238, и  $21 \times 10^{-6}$  г/т тория-232. Гнейсы содержат  $2 \times 10^{-6}$  г/т урана-238 и от 5 до  $27 \times 10^{-6}$  г/т тория-232. Содержание урана-238 и тория-232 в осадочных горных породах колеблется в широких пределах от  $1 - 2 \times 10^{-6}$  г/т в торфе и известняках до  $1250 \times 10^{-6}$  г/т в глинистых сланцах.

В аллювиальных отложениях концентрируются минералы, устойчивые к физическому и химическому выветриванию, такие как монацит, фергусонит, эвксенит, колумбит, циркон, сфен, апатит и т.д. Удельное содержание тория-232 в таком минерале, как монацит, может достигать 9000 Бк/кг [12]. Поэтому такие аллювиальные отложения являются потенциально радоноопасными. На территориях, имеющих в составе горных пород такие минералы, как браннерит, гадолинит, клеветит, монацит, торит, эвксенит и др., удельное содержание тория-232 может колебаться от 700 до 9000 Бк/кг.

Территории, расположенные на основных и ультраосновных магматических горных породах, имеющих в своем составе минералы плагиоклаз, пироксен и другие, содержат незначительное количество природных радионуклидов уран-238 и торий-232, которые колеблются в интервалах от 6 до 12 Бк/кг. Потоки радона на таких территориях невелики, определяются содержанием радия-226 и

тория-232, и как правило имеют средние значения, которые существенно не отличаются от региональных значений.

Территории, расположенные на горных породах, таких как граниты, глины, сланцы, песчаники, содержащие минералы уранинит, алланит, циркон, карнолит, казолит, браннерит, гадолинит, клеветит, монацит, торит, эвксенит, могут содержать высокую концентрацию урана-238, тория-232 и радия-226, соответственно потоки радона на таких территориях повышенные.

На эманирование радона из почвы влияет дисперсность горных пород, которая достаточно сильно различается. Высокую скорость эманации радона имеют территории, сложенные легкопроницаемым гравийно-песчаным материалом, ледниковыми отложениями, гранитоидами.

Возникновение эманационных аномалий также тесно связано с тектоническими разломами земной коры и/или геодинамически активными зонами. Потоки радона на такой территории существенно зависят от типа разломов различного происхождения, высокие концентрации радона над тектоническими разломами связаны высокой проницаемостью в результате роста крупных трещин, что приводит к увеличению выделения радона с поверхности. Поэтому территории с разрывными нарушениями земной коры являются потенциально радоноопасными за счет высокой скорости эманирования.

Таблица 2

Содержание урана и тория в горных породах (по P. Vesterbacka, 2005), г/т  
Content of uranium and thorium in rocks (after P. Vesterbacka, 2005), gpt

Горные породы	$^{238}\text{U}$ , $10^{-6}$ г/т	$^{232}\text{Th}$ , $10^{-6}$ г/т
Изверженные	Граниты, Гранодиориты, Риолиты	2,2 – 6,1
	Габбро	0,8
	Базальты	0,1 – 1
Метаморфические	Гранулиты	4,9
	Гнейсы	2,0
	Сланцы	2,5
Осадочные	Глинистые сланцы	3 – 1250
	Бокситы	11,4
	Фосфориты	50 – 300
	Торф	1 – 12
	Известняки	2

Поэтому, исходя из геологического строения, любую территорию условно можно поделить, с точки зрения потенциальной радоноопасности, на 3 части:

- Тип 1 – есть геологический разлом, скорость эксхалляции радона-222 зависит от типа разлома, имеет повышенные потоки радона;
- Тип 2 – территории, расположенные на песчано-галечных и глинистых отложениях, с повышенным содержанием природных радионуклидов урана-238 и тория-232, сопровождается повышенными потоками радона;
- Тип 3 – территории, расположенные на магматических горных породах основного состава, характеризуются низким содержанием природных радионуклидов в минеральной составляющей, фоновыми потоками радона, соответствующими региональным значениям.

**Характеристика территории г. Балеи по степени потенциально радоноопасности в зависимости от геологических особенностей**

Проведена характеристика территории г. Балеи по степени потенциально радоноопасности в зависимости от предложенного типа территории. Изучено геологическое строение территории г. Балеи, для этого использовали каталог геологических карт Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского [20].

Геологическое строение территории г. Балеи характеризуется наличием горных пород разного происхождения – осадочных и магматических. Осадочные горные породы представлены аллювиальными отложениями неоплейстоценовой эпохи в виде песчано-галечного материала и глинами. Магматические представлены интрузивными горными породами основного состава из группы габброидов раннего протерозоя. Территорию города разделяет разрывное нарушение земной коры по направлению с северо-запада на юго-восток. Геологическую структуру территории определяют отложения с минералом монацитом, содержащим в составе природный радионуклид торий-232. Южная часть г. Балеи представлена аллювиальными песчано-галечными и глинистыми отложениями в результате действия реки Унда, где происходит аккумуляция обломочного мате-

риала с монацитом. Поэтому на этой территории главным источником поступления радона являются намывные отложения, с повышенным содержанием тория-232. Кроме того, на территории г. Балеи есть разрывное нарушение земной коры.

Поэтому с точки зрения потенциальной радоноопасности территория г. Балеи, исходя из геологического строения, существенно различается, но соответствует тому условному делению территории на 3 части, которое предложено авторами в этой статье.

На рис. 1 показана геологическая характеристика территории г. Балеи [Рутштейн И.Г., 2000], где показана линия прохождения геологического разлома 1, территория 2 с аллювиальными отложениями в районе реки Унда, и территория 3, представленная магматическими горными породами основного состава из группы габброидов раннего протерозоя.

На карте на рис.1 нанесены точки отбора проб в помещениях и зоны деления территории. Все эти характеристики позволили разделить территорию на три части, которые были нанесены на карту:

- территория 1, относится к типу 1, где есть геологический разлом, с повышенным выделением <sup>222</sup>Rn;
- территория 2, относится к типу 2, расположена на аллювиальных песчано-галечных и глинистых отложениях, с повышенным содержанием природных радионуклидов (южная часть), сопровождаются повышенными потоками <sup>222</sup>Rn;
- территория 3, относится к типу 3, расположена на горных породах габброидной группы основного состава с фоновым содержанием природных радионуклидов (северная часть).

Проведена статистическая обработка данных значений ЭРОА<sub>Rn</sub> в зависимости от типа территории. Параметры распределения ЭРОА<sub>Rn</sub> на первых этажах зданий в зависимости от типа территории представлены в табл.3.

Из табл. 3 видно, что для ЭРОА<sub>Rn</sub> в помещениях на первых этажах:

- значения медианы и ее доверительных интервалов, СГ на территориях всех типов не превышают норматив 200 Бк/м<sup>3</sup>;
- значение СА превышает норматив 200 Бк/м<sup>3</sup> на территории 2-го типа;

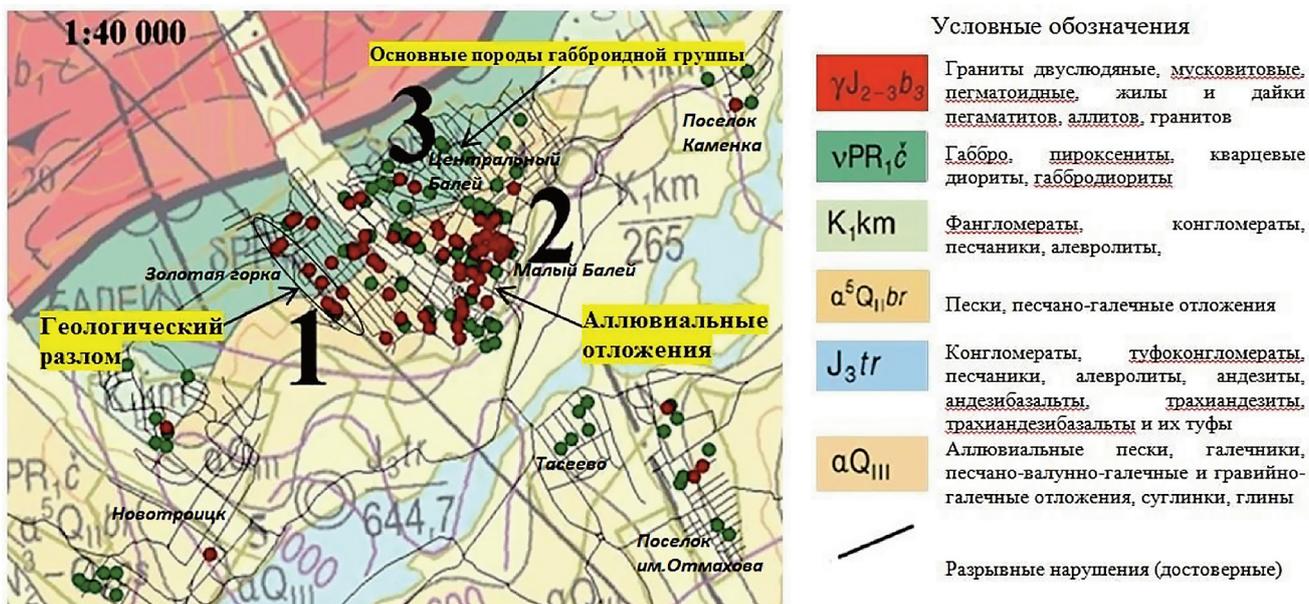


Рис.1. Геологическая карта г. Балеи (Рутштейн И.Г., 2000)  
Fig. 1. Geological map of Baley (Rutshtein I.G., 2000)

Таблица 3

Параметры распределения значений ЭРОА<sub>Rn</sub> на первых этажах зданий в зависимости от типа территории  
Parameters of distribution of EEVA<sub>Rn</sub> values on the first floors of buildings depending on the type of territory

Тип территории	Параметры распределения значений ЭРОА <sub>Rn</sub>								
	N	СА	СГ	СО	Медиана и границы ее доверительного интервала*	Мин.	Макс.	Превышения 200 Бк/м <sup>3</sup>	
Ед. измерения	шт	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	–	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	%	шт
1 Тип	122	167	125	135	122 (98 – 145)	9	690	29	35
2 Тип	514	267	150	332	135 (106 – 164)	6	2087	39	201
3 Тип	38	73	61	49	71 (56 – 86)	15	270	3	1

Примечание: СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение.

\*– при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница

- меньшее значение медианы и СА расположены на территории 3-го типа;
- максимальные значения на территориях всех типов превышают норматив 200 Бк/м<sup>3</sup>, превышения на территориях 1-го и 2-го типа составляют 29 и 39 % соответственно, а на территории 3-го типа – 3 %;
- максимальные значения на территории 1-го типа превышают норматив в 3,5 раза, на территории 2-го типа – в 10 раз, на территории 3-го типа – 1,4 раза.

#### Зависимость содержания радона на первых этажах от строительных материалов

В табл. 4 представили значения ЭРОА<sub>Rn</sub> в помещениях на первых этажах во всей выборке в зависимости от строительных материалов, которые представлены деревянными, кирпичными и шлакоблочными зданиями.

Значения ЭРОА<sub>Rn</sub> в деревянных, кирпичных и шлакоблочных зданиях распределяются следующим образом:

- значения медианы и ее доверительных интервалов, СА, СГ в деревянных, кирпичных зданиях на всех этажах не превышает норматив 200 Бк/м<sup>3</sup>;
- значение СА, медианы и ее доверительных интервалов на первых и вторых этажах в шлакоблочных зданиях превышают норматив 200 Бк/м<sup>3</sup>;
- превышение норматива на 1-ых этажах деревянных, шлакоблочных, кирпичных зданий составляет 24, 59, 26 % соответственно;
- превышения нормативного показателя на 2-ых этажах деревянных зданий нет, на вторых и третьих этажах шлакоблочных зданий превышение составляет 52 и 14 % соответственно, а кирпичных зданий – 12 и 20 % соответственно;
- максимальное значение ЭРОА<sub>Rn</sub> составляет 2087 Бк/м<sup>3</sup>, было выявлено в помещении на первом этаже шлако-

блочного здания и превышает норматив в 10 раз; максимальное значение ЭРОА<sub>Rn</sub> на втором этаже шлакоблочного здания превышает норматив в 5,6 раза; на третьем этаже – в 1,5 раза;

- максимальное значение ЭРОА<sub>Rn</sub> на первом этаже деревянного здания превышает норматив в 8 раз;
- максимальное значение ЭРОА<sub>Rn</sub> на первом этаже кирпичного здания превышает норматив в 4,9 раза, на втором этаже – в 3,3 раза, на третьем этаже – в 2,2 раза.

В результате анализа табл. 4 показано, что превышение нормативного показателя в шлакоблочных зданиях существенно как на 1-ых, так и на 2-ых этажах, возможно это объясняется тем, что для строительства этих зданий использовался материал с высоким содержанием природных радионуклидов, вероятно из отвалов в районе расположения добывающих предприятий.

#### Оценка средней годовой эффективной дозы (СЭГД) облучения населения за счет радона

Радиационная безопасность населения по требованиям ОСПОРБ-99/2010 оценивали по величине СЭГД облучения от всех основных природных источников излучения, которая составляет:

- менее 5 мЗв/год – приемлемый уровень облучения населения от природных источников излучения;
- свыше 5 до 10 мЗв/год – облучение населения является повышенным;
- более 10 мЗв/год – облучение населения является высоким.

Проведен расчет средних годовых эффективных доз облучения по методике [14] в помещениях на первых этажах зданий в зависимости от типа территории, строительного материала и постройки (табл. 5).

Таблица 4

Параметры распределения значений ЭРОА<sub>Rn</sub> в зависимости от строительного материала  
Parameters of distribution of EEVA<sub>Rn</sub> values depending on the building material

Материал здания	Этаж	Параметры распределения значений ЭРОА <sub>Rn</sub>								
		N	СА	СГ	СО	Медиана и границы ее доверительного интервала*	Мин.	Макс.	Превышение 200 Бк/м <sup>3</sup>	
Ед. измерения		шт	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	–	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	Бк/м <sup>3</sup>	%	шт
Дерево	1	270	181	113	237	104 (76 – 132)	1	1606	24	65
	2	15	73	67	32	66 (50 – 82)	33	132	0	0
Шлакоблок	1	190	407	254	413	260 (201 – 318)	6	2087	59	113
	2	157	277	179	255	204 (164 – 244)	10	1130	52	81
	3	14	112	84	80	115 (72 – 157)	21	298	14	2
Кирпич	1	294	158	102	163	87 (68 – 105)	9	981	26	76
	2	287	106	79	90	76 (66 – 86)	13	653	12	36
	3	92	120	92	91	85 (66 – 103)	19	439	20	18
	4	22	47	45	13	48 (43 – 53)	15	69	0	0

Примечание: СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение.

\*– при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница

Таблица 5

Годовые эффективные дозы облучения на первых этажах зданий для всех типов территорий и строительного материала  
Annual effective radiation doses on the first floors of buildings for all types of territories and building materials

Тип территории	Материал здания	N*	Превышения 200 Бк/м <sup>3</sup> в помещениях** на 1 этажах	Превышение 200 Бк/м <sup>3</sup> в зданиях на 1 этажах***		Медиана и границы ее доверительного интервала**** от:	
				Есть	Нет	Среднегодовых значений ЭРОА <sub>Rn</sub>	Годовой эффективной дозы облучения
Ед. измерения		шт	шт (%)	шт (%)		Бк/м <sup>3</sup>	мЗв/год
1	Дерево	63	26 (41)	20 (54)	17 (46)	199 (155 – 240)	13 (10 – 15)
	Шлакоблок	13	2 (15)	2 (50)	2 (50)	92 (41 – 142)	6 (3 – 9)
	Кирпич	44	7 (16)	5 (63)	3 (37)	118 (70 – 166)	8 (5 – 11)
2	Дерево	156	33(21)	19 (33)	38 (67)	119 (61 – 177)	8 (4 – 11)
	Шлакоблок	173	109 (63)	18 (82)	4 (18)	372 (267 – 477)	24 (17 – 30)
	Кирпич	185	59 (32)	15 (56)	12 (44)	149 (90 – 208)	10 (6 – 13)
3	Дерево	31	2 (6)	2 (11)	16(89)	84 (56 – 112)	5 (4 – 7)
	Кирпич	7	0(0)	0 (0)	2	63	4

**Примечание:** \* количество проведенных измерений ЭРОА<sub>Rn</sub> в помещениях зданий;  
 \*\* количество помещений с превышением на 1-ых этажах;  
 \*\*\* количество зданий с превышением 200 Бк/м<sup>3</sup> на 1-ых этажах;  
 \*\*\*\* – при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница.

Анализ табл. 5 показывает:

- на первых этажах деревянных зданий ЭРОА<sub>Rn</sub> превышает нормативный показатель 200 Бк/м<sup>3</sup> на территории 1 в 26 помещениях (41 % от общего числа помещений), на территории 2 – в 33 помещениях (21 % от общего числа помещений), на территории 3 – в 2 помещениях (6 % от общего числа помещений на первых этажах деревянных зданий, расположенных на территории 3);
- на первых этажах шлакоблочных зданий ЭРОА<sub>Rn</sub> превышает нормативный показатель 200 Бк/м<sup>3</sup> на территории 1 в 2 помещениях (15 % от общего числа помещений на 1 этаже шлакоблочных зданий), на территории 2 – в 109 помещениях (63 % от общего числа помещений на 1 этаже шлакоблочных зданий, расположенных на территории 2);
- на первых этажах кирпичных зданий ЭРОА<sub>Rn</sub> превышает нормативный показатель 200 Бк/м<sup>3</sup> на территории 1 в 7 помещениях (16 % от общего числа помещений), на территории 2 – в 59 помещениях (32 % от общего числа помещений), на территории 3 – в 0 помещениях;
- на территории 1 превышения норматива на первых этажах есть в 20 деревянных зданиях (54 % от общего числа деревянных зданий), в 2 шлакоблочных зданиях (50 % от общего числа шлакоблочных зданий), в 5 кирпичных зданиях (63 % от общего числа кирпичных зданий);
- на территории 2 превышения норматива на первых этажах есть в 19 деревянных зданиях (33 % от общего числа деревянных зданий), в 18 шлакоблочных зданиях (82 % от общего числа шлакоблочных зданий), в 15 кирпичных зданиях (56 % от общего числа кирпичных зданий);
- на территории 3 превышения норматива на первых этажах есть в 2 деревянных зданиях (11 % от общего числа деревянных зданий, расположенных на территории 3);
- медиана среднегодового значения ЭРОА<sub>Rn</sub> превышает норматив 200 Бк/м<sup>3</sup> на первых этажах в шлакоблочных зданиях и составляет 372 Бк/м<sup>3</sup>;

- наименьшее значение медианы среднегодового значения ЭРОА<sub>Rn</sub> в кирпичных зданиях, расположенных на территории 3, и составляет 63 Бк/м<sup>3</sup>;
  - значение медианы СЭГД облучения превышает ограничение 5 мЗв/год во всех зданиях на территориях 1 и 2;
  - меньшее значение медианы СЭГД облучения в кирпичных зданиях и составляет 4 мЗв/год.
- Далее, исходя из рассчитанных величин дозовых нагрузок, было проведено категорирование обследованных зданий по степени радоноопасности и разработано мероприятия по улучшению радиационно-экологической ситуации в регионе.

**Категорирование зданий по величине годовой эффективной дозы облучения населения от <sup>222</sup>Rn**

В данной работе было предложено категорировать здания по уровню потенциальной радоноопасности, исходя из уровней дозовых нагрузок от радона для населения в помещениях на первых этажах.

Все мероприятия по снижению дозовых нагрузок представлены в табл. 6.

В зданиях с годовой эффективной дозой до 5 мЗв/год мероприятия по снижению объёмной активности радона не требуются. Рекомендуется мониторинг содержания радона в этих зданиях. Облучение считается приемлемым.

В зданиях с годовой эффективной дозой от 5 до 10 мЗв/год рекомендуются мероприятия по снижению объёмной активности радона. Необходим обязательный мониторинг содержания радона в этих зданиях. Облучение населения считается повышенным.

В зданиях с годовой эффективной дозой свыше 10 мЗв/год необходимы срочные мероприятия по снижению объёмной активности радона в помещениях или переселение жильцов и снос здания. Облучение населения в этих зданиях считается высоким.

Таблица 6

**Категорирование зданий по потенциальной радоноопасности по величине годовой эффективной дозы, создаваемой радоном, на первых этажах помещений**  
**Categorization of buildings by potential radon hazard by the value of the annual effective dose generated by radon on the first floors of the premises**

Категория зданий	Материал здания	N	Значения годовой эффективной дозы облучения			Необходимые мероприятия
			Медиана	Мин	Макс	
Ед. измерения		шт	мЗв/год			
1 (менее 5 мЗв/год)	Дерево	26	4	1,7	4,9	Мероприятия не требуются
	Шлакоблок	2	4	3,8	4,5	
	Кирпич	12	3	1,7	4,9	
	Всего	40	4	1,7	4,9	
2 (от 5 до 10 мЗв/год)	Дерево	46	7	5,0	9,9	Рекомендуются мероприятия по снижению объёмной активности радона. Необходим обязательный мониторинг содержания радона в этих зданиях и выявление всех источников поступления радона в здания
	Шлакоблок	3	5	5,2	6,3	
	Кирпич	12	6	5,2	9,7	
	Всего	61	7	5,0	9,9	
3 (более 10 мЗв/год)	Дерево	43	17	10,9	93,7	Необходимы срочные мероприятия по снижению объёмной активности радона в помещениях или переселение жильцов и снос здания
	Шлакоблок	20	24	10,8	55,9	
	Кирпич	15	14	10,1	32,7	
	Всего	78	17	10,1	93,7	

Из табл. 6 следует:

- для 40 зданий (26 деревянных, 2 шлакоблочных, 12 кирпичных) не требуются мероприятия по снижению содержания радона в зданиях; облучение населения в этих зданиях считается приемлемым;
- для 61 здания (46 деревянных, 3 шлакоблочных, 12 кирпичных) рекомендуются мероприятия по снижению объёмной активности радона; необходим обязательный мониторинг содержания радона в этих зданиях и выявление всех источников поступления радона в здания;
- для 78 зданий (43 деревянных, 20 шлакоблочных, 15 кирпичных) необходимы срочные мероприятия по снижению объёмной активности радона в помещениях или переселение жильцов и снос здания.

### Обсуждение

Предложено характеризовать территории по степени потенциальной радоноопасности в зависимости от геологических особенностей территории и содержания природных радионуклидов в почве по типам, которые можно условно поделить условно на 3 типа:

Тип 1 – где есть геологический разлом;

Тип 2 – территория, представленная горными породами с повышенным содержанием природных радионуклидов;

Тип 3 – территория, представленная горными породами с низким содержанием природных радионуклидов.

Территорию г. Балей можно поделить условно на 3 части по степени потенциальной радоноопасности: 1 тип – геологический разлом; 2 тип – южная часть территории города, представленная осадочными горными породами; 3 тип – северная часть территории города, представленная горными породами габброидной группы основного состава с низким содержанием природных радионуклидов.

Такое районирование территории по степени потенциальной радоноопасности позволяет на стадии про-

ектирования понимать, где можно строить дома, где повышать требования к проекту зданий с точки зрения радоноопасности и защищенности от поступления радона, а на стадии эксплуатации понимать, где надо проводить углубленные исследования, предполагая, что в помещениях может быть повышенное содержание радона.

Главным критерием по оценке потенциальной радоноопасности территории является объёмная активность радона на первых этажах зданий, которая достоверно характеризует поток радона с поверхности почвы, независимо от источника поступления. Это основной параметр контроля, по которому можно судить о радоноопасности территории, принимать решения о санитарном состоянии здания, судить о потенциальной опасности для населения или персонала, рассчитать потенциальные дозовые нагрузки.

### Заключение

В результате работы показано, что для 61 здания облучение населения является повышенным, а для 78 зданий – высоким, что говорит о неблагоприятной радиационно-экологической ситуации в городе. Необходимо привлечение внимания администрации города с целью снижения облучения населения, проживающего на этой территории.

Исследование показало, что даже при значениях ЭРОА<sub>Rn</sub>, не превышающих норматив 200 Бк/м<sup>3</sup>, который устанавливает НРБ-99/2009, облучение населения считается повышенным и превышает ограничение 5 мЗв/год. При значениях среднегодовой ЭРОА<sub>Rn</sub> около 80 Бк/м<sup>3</sup> годовая эффективная доза облучения за счет только ДПР радона составляет 5 мЗв/год. Такая ситуация в стране обусловлена экономическими проблемами. Если в качестве приоритета использовать ограничение значения величины годовой эффективной дозы, то в этом случае очень большое количество зданий будет необходимо реабилитировать, что с экономической точки зрения совершенно неподъемная работа на данном временном этапе.

## Radiation-Hygienic Monitoring in Potentially Radon-Hazardous Territories

T.N. Lashchenova<sup>1,3</sup>, L.E. Karl<sup>1,2</sup>, A.M. Marennyy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

<sup>2</sup>State Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene FMBA, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Contact person: Lydia Eduardovna Karl: Lidiakarl@yandex.ru

### ABSTRACT

Modern radioecological studies to assess the effect of natural radiation on the human body have shown that at the moment of development of society, the main contribution to the exposure of the population is made by natural sources of ionizing radiation, while from 50 to 90 % of the dose load are caused by the gas radon-222 (<sup>222</sup>Rn) and daughter products of its decay.

This paper presents the results of radiation-hygienic monitoring of the potentially radon-hazardous territory of the city of Baley, Trans-Baikal Territory. The measurement of the volumetric activity of radon (OAR<sub>Rn</sub>) was carried out in the premises of residential and public buildings by the integral method using track exposure meters REI-4. According to the indicator of the equivalent equilibrium volumetric activity of radon (EROAR<sub>Rn</sub>), a radiation-hygienic assessment of the premises and the calculation of potential dose loads on the population living in this territory were carried out.

Studies have shown that OAR<sub>Rn</sub> in residential and public buildings depends on the geological characteristics of the territory, on the design and design of buildings and structures, and on the building materials used. It was found that the main criterion for assessing the potential radon hazard of territories is the value of OAR<sub>Rn</sub> in rooms on the 1st floors of buildings. According to the degree of potential radon hazard, the territory of the city of Baley can be conditionally divided into 3 types: 1 type – the territory located on a geological fault; Type 2 – the southern part of the city, represented by sedimentary rocks; Type 3 – the northern part of the city, represented by rocks of the basic gabbroid group with a low content of natural radionuclides. The types of buildings and structures and the type of building materials affect the dose load, but do not determine it.

**Key words:** radon-222, volumetric activity, EEVA, potential radon hazard of territories, categorization of territories, residential and public buildings, nuclear legacy objects

**For citation:** Lashchenova TN, Karl LE, Marennyy AM. Radiation-Hygienic Monitoring in Potentially Radon-Hazardous Territories. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):42-50.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-42-50

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations: Vol. 1, Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
2. Жуковский М.В. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2000.
3. Гулабянц Л.А. / Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: НО «ФЭН-НАУКА», 2013.
4. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016.
5. Стамат И.П., Кормановская Т.А., Горский Г.А. Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации. // Радиационная гигиена. 2014, Т. 7, № 1. С. 54-62.
6. Маренный А.М. Проблема облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. // Ядерная и радиационная безопасность России. 2002, Т. 2, № 5. С. 6-63.
7. Губин А. Т., Маренный А. М., Сакович В. А., Астафуров В.И., Нефедов Н.А., Пенезев А.В. Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на содержание радона в помещениях. // Медицина экстремальных ситуаций. 2012, Т. 4, № 42. С. 77-88.
8. Маренный А.М., Романов В.В., Астафуров В.И., Губин А.Т., Киселёв С.М., Нефёдов Н.А., Пенезев А.В. Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России. // Радиационная гигиена. 2015, Т. 8. № 1. С. 23-29.
9. Цапалов А.А. // Принципы радонового контроля в помещениях зданий // АНРИ, 2014. №1. С. 6-15.
10. Маренный А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом // АНРИ, 2012. № 4. С. 13-19
11. МВИ 2.6.1.003–99. «Радон. Измерение объемной активности интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях»; МИ «Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом», Свидетельство об аттестации № 40090.2И385 от 16.07.2012.
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09) утв. и введены в действие от 07.07.09 г. – Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
13. МУ 2.6.1. 037 – 2015. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности. М.: ФМБА России, 2016.
14. МУ 2.4.1.1088-02. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. М.: Минздрав России; 2002.
15. Птицын А.Б. Проблемы освоения техногенных месторождений Забайкалья. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3. С. 128-130.
16. Веневская Н.Н. К вопросу об экологической ситуации города Бaley (Забайкальский край) // Труды XX Международного симпозиума имени академика Усова М.А. студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Томск. 2016. 109-110 с.
17. Абрамов Б.Н., Эпова Е.С., Манзырев Д.В. Геоэкологические проблемы обработки рудных месторождений золота в восточном Забайкалье. География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 103-111.
18. МР 11-2/206-09. Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения. 2000; N 11-2/206-09.
19. Арбузов С.И. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие // Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск 2010.
20. Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Капринского. Каталог растров. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

### REFERENCES

1. UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations: V. 1, Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
2. Zhukovskiy MV. Radon Safety of Buildings. Ekaterinburg: UrO RAN; 2000 (in Russian).
3. Gulabyants LA. Manual for the Design of Anti-radon Protection of Residential and Public Buildings. Moscow: NO «FEN-NAUKA», 2013 (In Russian).
4. Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB Regularities of the Formation of the Radon Field in the Geological Environment. Moscow: PERO, 2016 (In Russian).
5. Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorskiy GA Russian Federation Population Radiation Protection During the Exposure From Natural Ionizing Irradiation Sources: Modern State and Directions for Development and Optimization. Radiation Hygiene. 2014;7(1): 54-62 (In Russian).
6. Marennyy AM The Problem of Public Exposure to Natural Sources of Ionizing Radiation. Nuclear and Radiation Safety of Russia.

- 2002.2(5):36-63. (In Russian).
7. Gubin A T, Marennyy AM, Sakovich VA, Astafurov VI, Nefedov NA, Penezhev AV Survey of Territories Maintained by the Federal Medical and Biological Agency of Russia for radon Content in Premises. *Meditsina Ekstremal'nykh Situatsiy*. 2012.42(4):77-88 (In Russian).
  8. Marennyy AM, Romanov VV, Astafurov VI, Gubin AT, Kiselev SM, Nefedov NA, Penezhev AV Survey for Indoor Radon in Dwellings on the Territories Supervised by FMBA of Russia. *Radiation Hygiene*. 2015,8(1):23-29. (In Russian).
  9. Tsapalov AA Principles of Radon control in the premises of buildings ANRI. Moscow Puplic 2015. 1: 6-15. (In Russian).
  10. Marennyy AM Methodological Aspects of Measurements of Average Volumetric Activity of Radon in Rooms by Integral Track Method ANRI. Moscow Puplic 2012; 4: 13-19 (In Russian).
  11. MVI 2.6.1.003-99. «Radon. Measurement of Volumetric Activity by Integral Track Method in Industrial, Residential and Public Premises»; MI «Radon. Measurement of Volumetric Activity in Indoor air by the Integral Track Method», Attestation Certificate № 40090.21385 of 16.07.2012. (In Russian).
  12. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009): Sanitarno-epidemiologicheskies Pravila i Normativy (SanPiN 2.6.1.2523-09): utv. i Vvedeny v Dejstvie ot 07.07.09 g. M.: Federalniy Centr Gigeny i Epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. 100 p. (In Russian).
  13. MU 2.6.1.037 – 2015. Determination of the Annual Average EEC Values of Radon Isotopes in Indoor air Based on the Results of Measurements of Different Durations. Moscow: FMBA; 2016. (In Russian).
  14. MU 2.4.1.1088-02. Assessment of Individual Effective Doses to the Population Due to Natural Sources of Ionizing Radiation. Moscow: Minzdrav Rossia. 2002 (In Russian).
  15. Ptitsyn AB Problems of Development of Technogenic Deposits in Trans-Baikal Region. *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2014; 3: 128-130 (In Russian).
  16. Venevskaya NN About the Environmental Situation in the Town of Balei (Trans-Baikal Region). *Proc. of 20th Int. Symp. Tomsk*, 2016. 109-110. (In Russian).
  17. Abramov BN, Epova E.S., Manzyrev D.V. Geocological problems of mining gold ore deposits in Eastern Trans-Baikal Region. *Geografy and Natural Resources*. 2019; 2: 103-111 (In Russian).
  18. MR 11-2/206-09. Random Survey of Residential Buildings to Assess Doses to the Population. 2000; N 11-2/206-09. (In Russian).
  19. Arbuзов SI *Geochemistry of Radioactive Elements: Textbook*. Tomsk. 2010. (In Russian).
  20. Kaprinsky AP. Russian Research Geological Institute Named after. Catalog of Rasters. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90291 на базе НТЦ РХБГ ФМБА России.

**Участие авторов.** Концепция и дизайн исследования – Лашенова Т.Н., Карл Л.Э.

Сбор и обработка данных – Карл Л.Э.

Написание текста – Карл Л.Э., Лашенова Т.Н.

Редактирование – Лашенова Т.Н., Маренный А.М.

**Поступила:** 18.03.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

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

**Financing.** The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90291 at the State Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene FMBA.

**Contribution.** Research concept and design – T.N. Laschenova, L.E. Karl

Data collection and processing – Karl L.E.

Text writing – Karl L.E., Laschenova T.N.

Editing – T.N. Laschenova, A.M. Marenniy.

**Article received:** 18.03.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.