

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ



УДК 625.712.35:543.52

Р.А. НАЗИРОВ, С.Л. КРАФТ, П.Ю. ВЕДЕ, И.А. ЖДАНОВ,  
Е.М. СЕРГУНИЧЕВА

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ НА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ ПОДЗЕМНЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Рассмотрено влияние строительства подземных пешеходных переходов вблизи геологических разломов на мощность гамма-излучения внутри них. Натурные обследования производились в Красноярске, в результате которых определена мощность гамма-излучения внутри и снаружи подземных сооружений. Выполнена статистическая обработка полученных значений, доказывающая наличие закономерной разницы между показателями снаружи и внутри переходов. Проведены расчеты мощностей дозы в центре сооружения по трем методам. Значения мощности дозы, полученные при расчетах, имеют незначительное отклонение. Сравнение расчетных значений мощностей дозы со значениями, полученными при обследовании, показало, что мощность дозы гамма-излучения формируется за счет железобетонной конструкции перехода.

**Ключевые слова:** подземный пешеходный переход, гамма-излучение, радон, железобетон, мощность дозы.

DOI 10.32683/0536-1052-2020-744-12-86-97

**Введение.** В настоящее время активно развивается улично-дорожная сеть крупных городов, строится большое количество подземных пешеходных переходов (ППП). Наблюдается тенденция организации в подземных сооружениях и ППП торговых точек, ресторанов, других общественных помещений, в которых организуются рабочие места для персонала. В городах и местах со сложной по радиоэкологическому фактору обстановкой строительство новых подземных пешеходных переходов на уже застроенной территории может быть организовано в зонах с повышенной естественной радиоактивностью грунта и грунтового воздуха в связи с отсутствием радиоэкологических ограничений для них. Вопрос радиоэкологической безопасности таких сооружений становится актуальным, однако практически неизученным. Нет исследований и на предмет влияния расположения подземных

© Назиров Р.А., Крафт С.Л., Веде П.Ю., Жданов И.А., Сергуничева Е.М.,  
2020

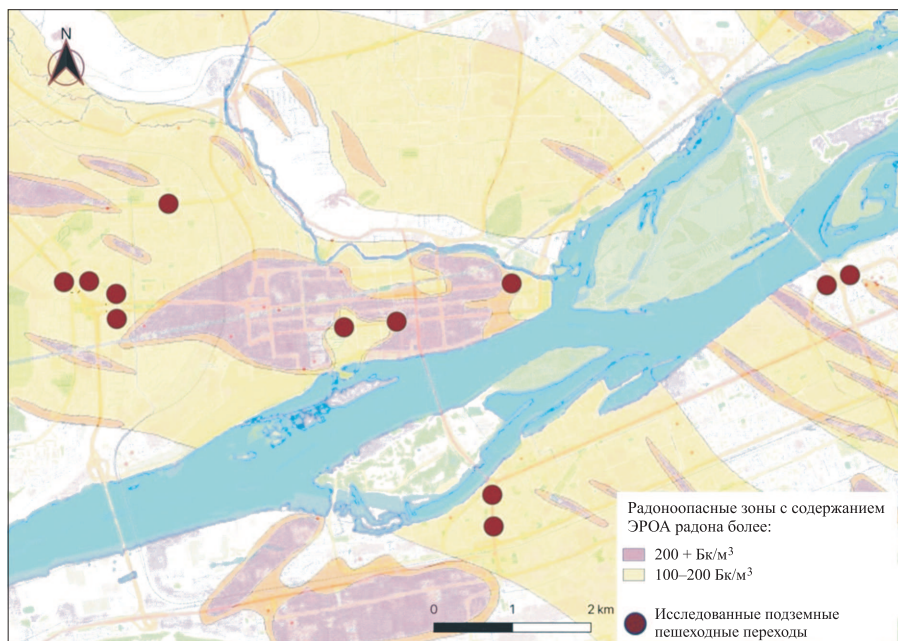


Рис. 1. Карта-схема расположения подземных пешеходных переходов на подложке радоноопасных зон, определенных в [1]

пешеходных сооружений вблизи радоноопасных зон на мощность гамма-излучения в ППП.

Цель исследования заключается в установлении связи между мощностью дозы гамма-излучения внутри ППП и на открытой местности, влияния места строительства и в расчете дозы облучения персонала, работающего в подземных пешеходных переходах.

Экспериментальные исследования осуществлялись в двенадцати подземных пешеходных переходах Красноярска. Измерения проводились дозиметром ДКС-АТ1123 внутри ППП пять раз, снаружи четыре (рис. 1).

Оценены количественные характеристики статистических показателей измеренных значений мощности дозы внутри и рядом с ППП.

На рис. 2 видно, что некоторые значения мощности дозы выходят за границы доверительных интервалов, поэтому из дальнейших расчетов они были исключены.

Доверительные интервалы для генеральных асимметрии ( $a$ ) и эксцесса ( $e$ ) рассчитывали соответственно по формулам:

$$\tilde{a} - \sqrt{\frac{D_a}{q}} \leq a \leq \tilde{a} + \sqrt{\frac{D_a}{q}}, \quad (1)$$

$$\tilde{e} - \sqrt{\frac{D_e}{q}} \leq e \leq \tilde{e} + \sqrt{\frac{D_e}{q}}. \quad (2)$$

В этих формулах дисперсии асимметрии  $D_a$  и эксцесса  $D_e$ :

$$D_a = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}, \quad (3)$$

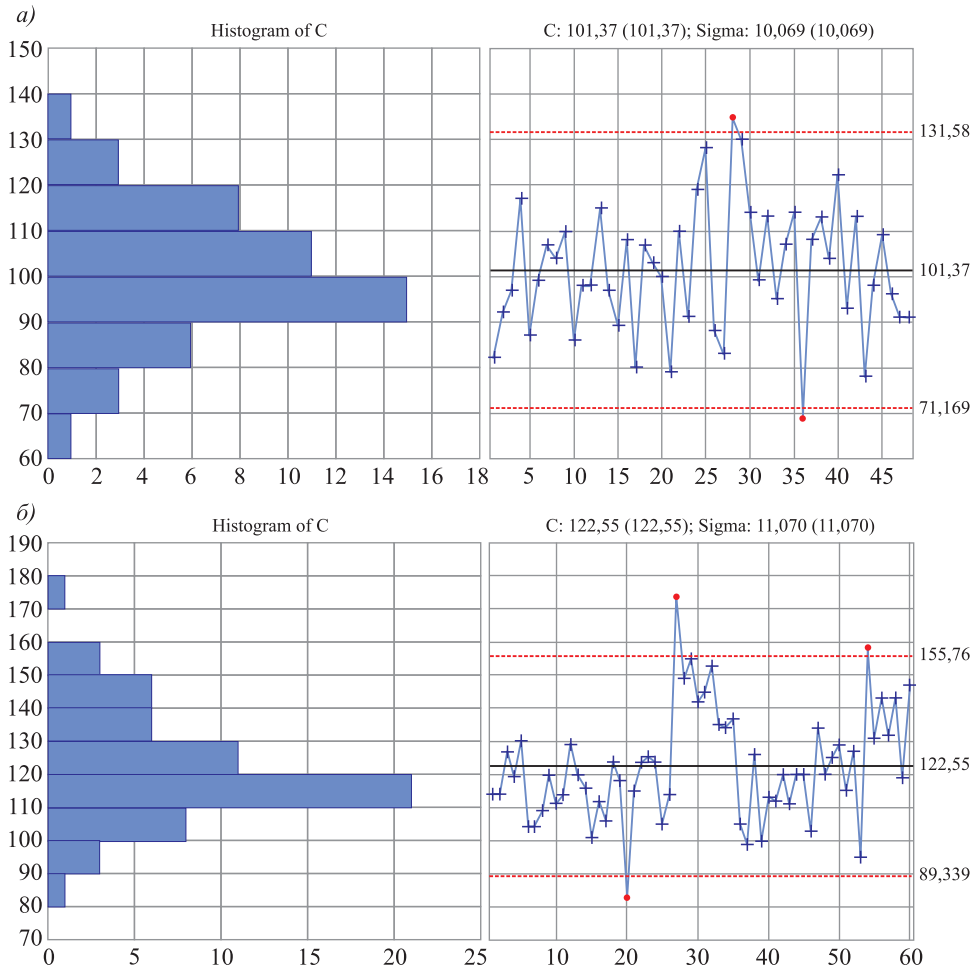


Рис. 2. Гистограммы распределений, средние значения и диапазон доверительных интервалов ( $\pm 3\sigma$ ) мощности дозы на окружающей местности рядом (а) и внутри (б) подземных пешеходных переходов

$$D_e = \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+3)(n+5)(n+1)^2}, \quad (4)$$

где  $n$  – объем выборки.

Для оценки равенства (неравенства) математических ожиданий  $\tilde{m}$  в генеральных совокупностях необходимо рассчитать средние значения и дисперсии снаружи  $\tilde{m}_{ext}$ ,  $\tilde{D}_{ext}$  и внутри  $\tilde{m}_{int}$ ,  $\tilde{D}_{int}$  в выборках измеренных значений мощности дозы (МД). Здесь нижние индексы «int» и «ext» относятся соответственно к значениям статистических показателей МД, измеренных «внутри» и «снаружи» ППП.

Для проверки генеральных дисперсий используется  $F$ -критерий Фишера. Если отношение выборочных дисперсий лежит в пределах

$$F_{\frac{q}{2}}(f_{ext}, f_{int}) \leq \frac{\tilde{D}_{ext}}{\tilde{D}_{int}} \leq F_{1-\frac{q}{2}}(f_{ext}, f_{int}), \quad (5)$$

принимается гипотеза о равенстве дисперсий  $\tilde{D}_{ext} = \tilde{D}_{int}$ .

Для сравнения математических ожиданий проверяется выполнение неравенства

$$-\tau \leq \tilde{m}_{ext} - \tilde{m}_{int} \leq \tau. \quad (6)$$

Предельные значения  $\tau$  находят по формулам:

$$\tau = \frac{\vartheta_{ext} t_{1-\frac{q}{2}}(f_{ext}) + \vartheta_{int} t_{1-\frac{q}{2}}(f_{int})}{\sqrt{\vartheta_{ext} + \vartheta_{int}}}, \quad (7)$$

$$\vartheta_{ext} = \frac{\tilde{D}_{ext}}{n_{ext}}; \quad \vartheta_{int} = \frac{\tilde{D}_{int}}{n_{int}}. \quad (8)$$

Определение соответствия эмпирических распределений, измеренных значений МД нормальному закону проводили путем сравнения рассчитанных по формулам экспериментальных значений с табличными критериями согласия Колмогорова ( $\lambda_{0,95}$ ) и Пирсона ( $\chi^2_{0,95}$ ):

$$\lambda = D\sqrt{n}, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^k \frac{(n_i + np_i)^2}{np_i} \leq \chi^2_p(k-3), \quad (10)$$

где  $p$  – доверительная вероятность.

Все статистические расчеты выполнены в программах Excel и С.П. Иглина [2, 3]. Сравнительный результат стандартной статистической обработки достоверных измерений представлен в табл. 1 и на рис. 3.

Все точечные параметры эмпирических распределений находятся в пределах доверительных интервалов с вероятностью  $p = 0,95$  для нормального распределения. При равенстве дисперсий генеральные математические ожидания отличаются значимо. Мощность дозы внутри выше, чем на открытой местности рядом с ППП. Отношение МД внутри помещений к МД на открытой местности находится в пределах от 1,1 до 1,3. Полученные результаты не противоречат данным, опубликованным в работе [4], по мощности поглощенной дозы на открытой местности (0,1 нЗв/ч) и отношениям МД внутри и снаружи каменных строений (1,0–1,4).

Корреляционной связи между двумя выборками измеренных значений гамма-излучения не наблюдается. Таким образом, можно с достаточной степенью достоверности утверждать, что гамма-фон внутри подземных пешеходных переходов формируется в основном за счет геометрии ППП, радиоактивности материалов, из которых изготовлены строительные конструкции, и внутренней облицовки стен, полов и перекрытий.

**Сопоставление результатов измерений с теоретическими расчетами.** Расчет мощности дозы гамма-излучения в закрытом помещении  $\dot{D}$  можно рассчитать по формуле [5], нГр/ч

$$\dot{D} = \sum_i \omega_i K_i(d) (\dot{D}_{max})_i, \quad (11)$$

где  $K_i$  – поправочный коэффициент на толщину ограждения ( $d_i$ );

Таблица 1. Статистические показатели измеренных значений мощности дозы

Показатели распределения	Снаружи	Внутри
Среднее	99,5 < 101 < 105	117 < 122 < 126
Стандартная ошибка	1,90	1,9
Медиана	99,5	120
Мода	107	120
Стандартное отклонение	12,9	14,3
Дисперсия выборки	114 < 166 < 263	146 < 205 < 309
Эксцесс	-3,408 < -0,534 < 2,094	-3,01 < -0,459 < 2,089
Асимметричность	-1,411 < 0,126 < 1,652	-0,984 < 0,406 < 1,795
Интервал	52	60
Минимум	78	95
Максимум	130	155
Количество	46	57
Наибольшее значение	130	155
Критерий Колмогорова, $\lambda_{0,95}$	0,562 < $\lambda_{0,95} = 1,358$	0,824 < $\chi_{0,95}^2 = 1,358$
Критерий Пирсона, $\chi_{0,95}^2$	3,76 < $\lambda_{0,95} = 5,99$	3,445 < $\chi_{0,95}^2 = 7,815$
Наименьшее значение	78	95
Проверка равенства дисперсий	0,566 ≤ 0,806 ≤ 1,738	
Проверка равенства математических ожиданий	-20,4 < -5,39	
Коэффициент корреляции	-1,00 ≤ -0,350 ≤ 0,304	

$\omega$  – относительный телесный угол, под которым видно  $i$ -е ограждение или проем высотой  $2a$  и шириной  $2b$  из центра помещения

$$\omega_i = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{ab}{c\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}, \quad (12)$$

где  $c$  – расстояние от центра помещения до центра данного ограждения или проема.

$$\dot{D}_{\max} = 1,07 C_{\text{eff}}. \quad (13)$$

В формуле (13)  $C_{\text{eff}}$  – удельная эффективная активность естественных радионуклидов, которая рассчитывается по формуле

$$C_{\text{eff}} = C_{\text{Ra}} + 1,31 C_{\text{Th}} + 0,09 C_{\text{K}}, \quad (14)$$

где  $C_{\text{Ra}}$ ,  $C_{\text{Th}}$ ,  $C_{\text{K}}$  – удельные активности радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  соответственно, Бк/кг.

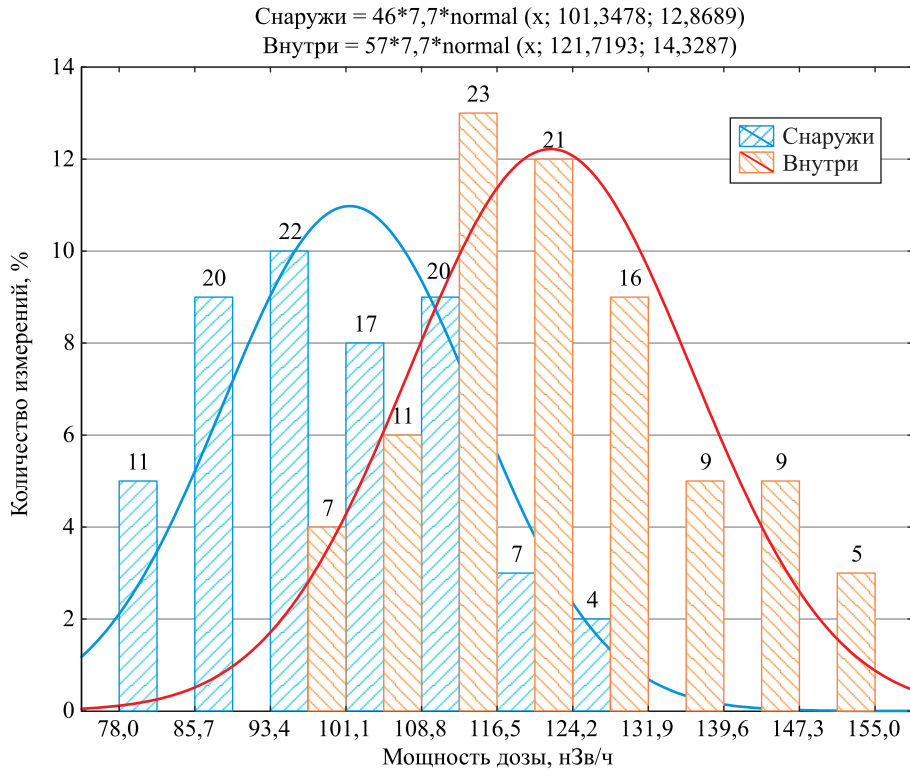


Рис. 3. Гистограммы эмпирических данных и функции нормального распределения

Авторы работы [6] для расчета мощности дозы в центре помещения  $\dot{D}$  [ $\mu R/h$ ] приводят формулу

$$\dot{D} = 8K \left[ \int_0^{b/2} dy \int_0^{a/2} \frac{dx}{x^2 + y^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} + \int_0^{a/2} dx \int_0^{h/2} \frac{dz}{x^2 + z^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + \int_0^{h/2} dy \int_0^{b/2} \frac{dy}{x^2 + z^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right]. \quad (15)$$

В этой формуле приняты обозначения:

$$K = 2,44 \cdot 10^{-5} \rho C_{eff}, \quad (16)$$

где  $d$  – толщина материала;

$\rho$  – его плотность,  $кг/м^3$ ;

$C_{eff}$  – то же, что и в формуле (14).

Численный коэффициент  $2,44 \cdot 10^{-5}$  соответствует мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на расстоянии 1 м от точечного источника  $^{226}Ra$  активностью 1 Бк. В дальнейших расчетах значение МД, полученное по формуле (15) во внесистемных единицах  $\mu R h^{-1}$ , конвертировалось в Международную систему единиц  $nГр \cdot ч^{-1}$ .

Другой метод определения мощности дозы в помещениях основывается на расчете МД по формуле [7–12]

$$\dot{D} = \sum_i q_i C_i, \quad (17)$$

где  $q_i$  – коэффициент преобразования концентрации отдельного радионуклида в материале  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , выраженный в Бк/кг в величины мощности дозы Гр/с от всех вышеперечисленных радионуклидов.

Коэффициент  $q_i$  зависит от размеров и формы помещения, толщины ограждения, его плотности. В работе [12] приведен обзор коэффициентов. В табл. 2 представлены величины коэффициентов пересчета  $q_i$  по опубликованным данным и дополненные значениями, полученными авторами [12].

Из табл. 2 видно, что величины конверсионных коэффициентов  $q$  имеют значительную вариабельность. Поэтому сравнение расчетов МД по формулам (11), (15) и (17) проводили для предлагаемого МАГАТЭ в качестве эталона помещения размерами  $7 \times 12 \times 2,8$  м без дверных и оконных проемов со стенами из тяжелого бетона плотностью  $500 \text{ кг/м}^2$  со значениями коэффициентов  $q_i$ , представленных в табл. 3 [19].

Таблица 2. Сравнение коэффициентов преобразования из разных источников

Размер помещения, м	Толщина ограждения, м	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Коэффициент преобразования $q$ , $\text{нГр} \cdot \text{ч}^{-1}/\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$			Источник
			$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	
5×4×2,8	0,2	2350	0,07	0,79	0,89	[7]
			0,07	0,79	0,96	[8]
			0,081	0,954	1,208	[10]
			0,1	1,2	1,29	[11]
			0,072	0,7	0,92	[13]
5,6×3,1×2,5	0,14	2320	0,063	0,56	0,77	[7]
			0,062	0,62	0,8	[12]
9×5×2,5	0,2	700	0,0085	0,096	0,117	[8]
			0,0092	0,095	0,123	[12]
6×4×3			0,054	0,62	0,89	[9]
			0,043	0,44	0,57	[12]
4×5×2,8	0,2	2350	0,0806	0,922	1,096	[13]
4×5×2,8	0,2	2350	0,07	0,757	0,912	[14]
3,6×3,6×3	0,1	1730	0,0588	0,726	0,955	[15]
4×5×2,8	0,5		0,079	1,08	1,24	[16]
4×5×2,8	0,2	2350	0,08	0,92	1,1	[17]
4×5×2,8	0,2	2350	Для стен			
			0,0355	0,364	0,436	[18]
			Для пола и потолка			
			0,0366	0,393	0,474	[18]

Таблица 3. Значения коэффициентов  $q_i$  (нГр · ч<sup>-1</sup>/Бк · кг<sup>-1</sup>) при плотности бетона 500 кг/м<sup>2</sup>

Размеры ограждения, м	Расстояние до точки детектирования, м	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
12,0×2,8	3,5	96	110	8,1
7,0×2,8	6,0	33	38	2,7
12,0×7,0	1,4	350	420	30

Результаты расчета представлены на рис. 4.

Отношение коэффициентов уравнений регрессий на рис. 4 позволяет констатировать, что расчетные значения, полученные по формулам (11) и (15), соответственно меньше на 14,2 % и больше на 9,2 % значений МД, рассчитанных по формуле (17), для разумных значений удельной эффективности активности строительных материалов  $C_{eff}$ . Следует заметить, что полученные отклонения не являются критичными для подобного рода расчетов.

В связи с отсутствием значений конверсионных коэффициентов  $q$  для геометрий исследованных нами пешеходных переходов в формуле (17), сопоставимость практически измеренной МД внутри ППП оценивали с теоретическими расчетами по формулам (11) и (15), при значениях толщины конструкций 0,25 м и плотности бетона 2350 кг/м<sup>3</sup>. Принятая толщина стен 0,25 м является средним значением толщин типовых сборных железобетонных конструкций для подземных пешеходных переходов серии N3.507-1. Значение величины удельной эффективной активности тяжелого бетона  $C_{eff} = 95,5$  Бк/кг взято из работы [20]. Результаты измеренных и расчетных значений МД представлены в табл. 4.

Полученное значение МД по формуле (17) для принятой в расчетах  $C_{eff}$  и значениях коэффициентов  $q$ , указанных в табл. 3, оказалось равным  $\dot{D} = 86,8$  нГр/ч. Таким образом, наилучшую сходимость с натурными измерениями дают расчеты по формуле (15).

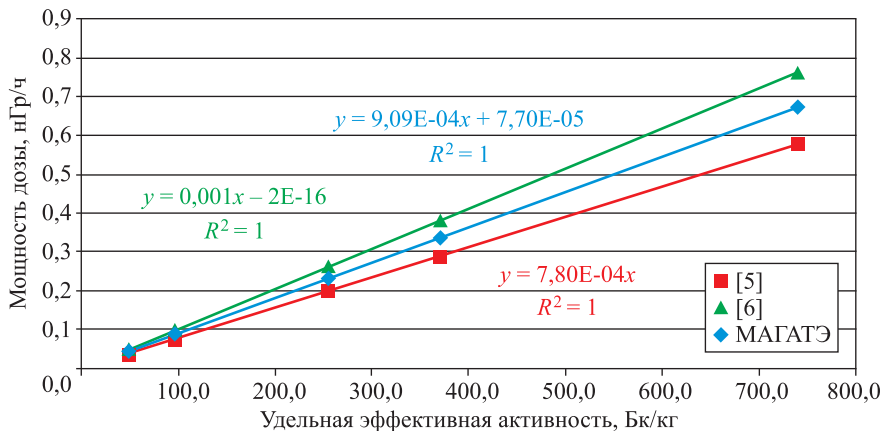


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов по формулам (11), (15) и (17)



Таблица 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных мощностей дозы для исследованных подземных пешеходных переходов, нГр/ч

Геометрические параметры ППП, м			Расчетная мощность дозы по формуле		Измеренная мощность дозы
длина	ширина	высота	(11)	(15)	
27,0	4,0	2,3	99,3	130,4	124
32,0	3,8	2,4	99,3	129,6	140
30,0	12,6	2,3	99,3	173,1	141

В международном стандарте для облучения населения установлен предел эффективной дозы, равный 1 мЗв в год<sup>1</sup>.

Проводить расчет накопленной дозы для пешеходов нецелесообразно, поскольку время пребывания в переходе слишком мало. Исключением являются работники торговых точек. В них работники пребывают по 8 ч, шесть дней в неделю. В год насчитывается до 2500 ч. За это время пребывания в подземном сооружении человек получает эффективную дозу, равную

$$0,140 \text{ нГр/ч} \cdot 0,7 \text{ Зв/Гр} \cdot 2500 \text{ ч/г.} = 0,245 \text{ нЗв/г.}$$

Полученное значение не превышает установленный предел.

**Выводы.** 1. Корреляция между мощностью дозы в подземных пешеходных переходах и их расположением относительно зон с высокой радоноопасностью в данном случае не обнаружена.

2. Расчеты мощностей доз по международным и федеральному стандартам дают похожие результаты.

3. На мощность дозы в центре подземного пешеходного перехода наибольшее влияние оказывают плотность и толщина бетона в пределах от 5 до 30 см (при толщине более 30 см значение мощности дозы стремится к максимуму).

4. Качественное поведение зависимостей доза – параметры существенно не меняется от одного радионуклида к другому для всех изученных вариантов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чечетки В.А., Акимова А.В., Кургуз С.А. Карта радоноопасности территории г. Красноярск // Молодежь и наука. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.
2. Иглин С.П. Математические расчеты на базе MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 640 с.
3. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 289 с.
4. Стамат И.П., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Королева Н.А. Анализ сведений о дозах внешнего терригенного облучения населения Российской Федерации в коммунальных условиях // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 33–46.
5. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 120 с.

<sup>1</sup> Нормы безопасности МАГАТЭ. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. № GSR Part 3. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 2015.

6. *Стават И.П., Стават Д.И.* К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 1. С. 47.
7. *Koblinger L.* Calculation of exposure rates from gamma sources in walls of dwelling rooms // Health Phys. 1978. No. 34. P. 459–463.
8. *Stranden E.* Radioactivity of building materials and the gamma radiation in dwellings // Phys. Med. Biol. 1979. No. 24. P. 921–930.
9. *Ackers J.G., Bosnjakovic B.F.M. and Strackee L.* Limitation of radioactivity concentrations in building materials based on a practical calculation model // Radiat. Prot. Dosim. 1983. No. 7. P. 413–416.
10. *Ahmad N. and Hussein A.J.A. Aslam.* Radiation doses in Jordanian dwellings due to natural radioactivity in construction materials and soil // J. Environ. Radioactivity. 1998. No. 41. P. 127–136.
11. *Mirza N.M., Ali B., Mirza S.M., Tufail M. and Ahmad N.* A shape and mesh adaptive computational methodology for gamma-ray dose from volumetric sources // Radiat. Prot. Dosim. 1991. No. 38(4). P. 307–314.
12. *Marcelo Francis Ma'duar and Goro Hiromoto.* Evaluation of indoor gamma radiation dose in dwellings. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Av. Prof. Lineu Prestes, 2242–Cidade Universitária, 05508-000 Sao Paulo, SP, Brazil // Radiat. Prot. Dosim. 2004. Vol. 111, No. 2. P. 221–228.
13. *Mustonen R.* Methods for evaluation of radiation from building materials // Radiat. Prot. Dosim. 1984. No. 7(1–4). P. 235.
14. *Manić V., Manić G., Nikezić D., & Krstić D.* Calculation of dose rate conversion factors for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in concrete structures of various dimensions, with application to Niš, Serbia // Radiat. Prot. Dosim. 2012. Vol. 152. P. 361–368.
15. *Ademola J.A., Farai I.P.* Annual effective dose due to natural radionuclides in building blocks in eight cities of southwestern Nigeria // Radiat. Prot. Dosim. 2005. No. 114(4). P. 524.
16. *Orabi M.* Modeling the indoor gamma-radiation dose: A review of refinements and application // Eur. Phys. J. Plus. 2019. Vol. 134. P. 290.
17. *Brigido Osvaldo, Montalvan Adelmo, Rosa Ramon, Hernandez Albert.* Radionuclide content in some building materials and gamma dose rate in dwellings in Cuba // International congress of the International Radiation Protection Association: Strengthening radiation protection worldwide. Buenos Aires (Argentina), 2008. 7 p.
18. *Goran Manić, Vesna Manić, Dragoslav Nikezić, Dragana Krstić.* The dose of gamma radiation from building materials and soil Nukleonika. 2015. No. 60(4). P. 951–958.
19. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015.
20. *Назирова Р.А.* Развитие научных основ и методов получения строительных материалов с заданными радиационно-экологическими свойствами: Дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2003. 500 с.

**Назирова Рашит Анварович**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: nazirovra@gmail.com  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
**Крафт Светлана Леопольдовна**, канд. геол.-минерал. наук, доц.;  
E-mail: kraft\_rogacheva@mail.ru  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
**Веде Петр Юрьевич**, асп.; E-mail: vede@live.ru  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
**Жданов Иван Андреевич**, студ.; E-mail: Zhdanov\_vanya@list.ru  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

**Сергуничева Елена Михайловна**, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: emsergunicheva@sfu-kras.ru

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 09.11.2020

**Nazirov Rashit Anvarovich**, DSc, Professor; E-mail: nazirovra@gmail.com

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Kraft Svetlana Leopol'dovna**, PhD, Ass. Professor; E-mail: kraft\_rogacheva@mail.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Vede Petr Yur'yevich**, Post-graduate Student; E-mail: vede@live.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Zhdanov Ivan Andreyevich**, Student; E-mail: Zhdanov\_vanya@list.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Sergunicheva Yelena Mikhaylovna**, PhD, Ass. Professor;

E-mail: emsergunicheva@sfu-kras.ru

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## **DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL FAULTS ON THE RADIOECOLOGICAL SITUATION OF UNDERGROUND PEDESTRIAN CROSSINGS**

The influence of the construction of underground pedestrian crossings (UPC) near geological faults on the power of gamma radiation inside the UPC is considered. A survey of the existing underground pedestrian crossings of the city of Krasnoyarsk was carried out, the power of gamma radiation inside and outside underground structures was determined. Statistical processing of the obtained values was carried out, proving the presence of a regular difference between the indicators outside and inside the transitions. The calculations of the dose rates in the center of the structure were carried out using three methods. Dose rate values obtained from calculations have a slight deviation. Comparison of the calculated values of the dose rates with the values obtained during the survey showed that the dose rate of gamma radiation is formed due to the reinforced concrete structure of the crossing.

**Key words:** underground pedestrian crossing, gamma radiation, radon, reinforced concrete, dose rate.

### REFERENCES

1. *Chechetki V.A., Akimova A.V., Kurguz S.A.* Karta radonopasnosti territorii g. Krasnoyarska [Radon hazard map of the territory of Krasnoyarsk]. Molodezh i nauka [Youth and Science]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2012. (in Russian)
2. *Iglin S.P.* Matematicheskiye raschety na baze MATLAB [Mathematical calculations based on MATLAB]. St. Petersburg, 2005. 640 p. (in Russian)
3. *Pustyl'nik E.I.* Statisticheskiye metody analiza i obrabotki nablyudeniy [Statistical methods of analysis and processing of observations]. Moscow, 1968. 289 p. (in Russian)
4. *Stamat I.P., Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Koroleva N.A.* Analiz svedeniy o dozakh vneshnego terrigenного oblucheniya naseleniya Rossiyskoy Federatsii v kommunal'nykh usloviyakh [Analysis of data on doses of external terrigenous irradiation of the population of the Russian Federation in communal conditions]. Radiatsionnaya gigiyena [Radiation hygiene]. 2015. Vol. 8, No. 3. Pp. 33–46. (in Russian)

5. *Krisyuk E.M.* Radiatsionnyy fon pomeshcheniy [Radiation background of premises]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 120 p. (in Russian)
6. *Stamat I.P., Stamat D.I.* K obosnovaniyu normativov po sodержaniyu prirodnykh radionuklidov v oblitsovochnykh izdeliyakh i materialakh [To substantiate standards for the content of natural radionuclides in facing products and materials]. Radiatsionnaya gigiyena [Radiation hygiene]. 2009. Vol. 2, No. 1. P. 47. (in Russian)
7. *Koblinger L.* Calculation of exposure rates from gamma sources in walls of dwelling rooms. Health Phys. 1978. No. 34. Pp. 459–463.
8. *Stranden E.* Radioactivity of building materials and the gamma radiation in dwellings. Phys. Med. Biol. 1979. No. 24. Pp. 921–930.
9. *Ackers J.G., Bosnjakovic B.F.M. and Strackee L.* Limitation of radioactivity concentrations in building materials based on a practical calculation model. Radiat. Prot. Dosim. 1983. No. 7. Pp. 413–416.
10. *Ahmad N. and Hussein A.J.A.* Aslam. Radiation doses in Jordanian dwellings due to natural radioactivity in construction materials and soil. J. Environ. Radioactivity. 1998. No. 41. Pp. 127–136.
11. *Mirza N.M., Ali B., Mirza S.M., Tufail M. and Ahmad N.* A shape and mesh adaptative computational methodology for gamma-ray dose from volumetric sources. Radiat. Prot. Dosim. 1991. No. 38(4). Pp. 307–314.
12. *Marcelo Francis Ma'duar and Goro Hiromoto.* Evaluation of indoor gamma radiation dose in dwellings. Instituto de Pesquisas Energe'ticas e Nucleares, Av. Prof. Lineu Prestes, 2242–Cidade Universita'ria, 05508-000 Sao Paulo, SP, Brazil. Radiat. Prot. Dosim. 2004. Vol. 111, No. 2. Pp. 221–228.
13. *Mustonen R.* Methods for evaluation of radiation from building materials. Radiat. Prot. Dosim. 1984. No. 7(1–4). P. 235.
14. *Manić V., Manić G., Nikezić D. & Krstić D.* Calculation of dose rate conversion factors for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in concrete structures of various dimensions, with application to Niš, Serbia. Radiat. Prot. Dosim. 2012. Vol. 152. Pp. 361–368.
15. *Ademola J.A., Farai I.P.* Annual effective dose due to natural radionuclides in building blocks in eight cities of southwestern Nigeria. Radiat. Prot. Dosim. 2005. No. 114(4). P. 524.
16. *Orabi M.* Modeling the indoor gamma-radiation dose: A review of refinements and application. Eur. Phys. J. Plus. 2019. Vol. 134. P. 290.
17. *Brigido Osvaldo, Montalvan Adelmo, Rosa Ramon, Hernandez Albert.* Radionuclide content in some building materials and gamma dose rate in dwellings in Cuba. International congress of the International Radiation Protection Association: Strengthening radiation protection worldwide. Buenos Aires (Argentina), 2008. 7 p.
18. *Goran Manić, Vesna Manić, Dragoslav Nikezić, Dragana Krstić.* The dose of gamma radiation from building materials and soil Nukleonika. 2015. No. 60(4). Pp. 951–958.
19. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015.
20. *Nazirov R.A.* Razvitiye nauchnykh osnov i metodov polucheniya stroitel'nykh materialov s zadannymi radiatsionno-ekologicheskimi svoystvami: Dis. doktora tekhn. nauk [Development of scientific foundations and methods for obtaining building materials with specified radiation and environmental properties: Doctor's thesis]. Tomsk, 2003. 500 p. (in Russian)