

Использование портативного гамма-спектрометра для оценки уровней внешнего облучения пассажира метро

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Метрополитен (метро, подземка) является популярным видом общественного транспорта во многих крупных городах. Находясь на территории метрополитена (одна из локаций в городе), пассажир неизбежно подвергается внешнему облучению от природных (терригенных) источников ионизирующего гамма-излучения – ^{40}K , радионуклиды рядов ^{232}Th и ^{238}U , – которые присутствуют в грунте и строительных материалах. Целью настоящего исследования являлась оценка уровней внешнего облучения пассажира метро города Санкт-Петербурга (Россия). Материалы и методы: Портативный гамма-спектрометр-дозиметр, носимый в рюкзаке оператором, был использован для измерения интегральной мощности амбиентного эквивалента дозы и эффективной удельной активности природных радионуклидов по 60 выбранным маршрутам следования пассажира в метро. Мощность эффективной дозы для пассажира метро была оценена с использованием результатов выполненных измерений и опубликованного коэффициента перехода от амбиентного эквивалента дозы к эффективной дозе. Результаты исследования и обсуждение: Значения измеренной величины мощности амбиентного эквивалента дозы варьировали от 65 до 214 нЗв/ч и в среднем составили 92 нЗв/ч. Величина эффективной удельной активности природных радионуклидов находилась в диапазоне от 104 до 188 Бк/кг (средняя – 147 Бк/кг). Средняя мощность амбиентного эквивалента дозы от природных радионуклидов составила 86 нЗв/ч (разброс – от 61 до 107 нЗв/ч). Отношение мощности амбиентного эквивалента дозы от природных радионуклидов к эффективной удельной активности незначительно варьировало от 0,56 до 0,61 ((нЗв/ч)/(Бк/кг)) и в среднем равнялось 0,58 ((нЗв/ч)/(Бк/кг)). Средняя мощность эффективной дозы внешнего облучения от природных радионуклидов для взрослого пассажира Санкт-Петербургского метро консервативно оценена величиной 86 нЗв/ч. Заключение: Сопоставление результатов данной работы и литературных данных показывает, что в Санкт-Петербурге передвижение местного жителя или приезжего с помощью метро, по сравнению с передвижением пешим ходом по поверхностным городским локациям, не приводит к дополнительному внешнему облучению от природных радионуклидов, присутствующих в окружающей среде. По показателю «мощность амбиентного эквивалента дозы» метрополитен Санкт-Петербурга полностью соответствует современным санитарно-эпидемиологическим требованиям, предъявляемым к сооружениям общественного назначения.

Ключевые слова: метрополитен, метро, пассажир, амбиентный эквивалент дозы, эффективная доза, природные радионуклиды.

Введение

Метрополитен (далее – метро) как эффективный вид городского пассажирского транспорта функционирует в семи городах России: в Москве, Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Новосибирске, Казани, Екатеринбурге и Самаре. По количеству линий (5 в 2025 г.), станций (73 в 2024 г.) и перевезенных пассажиров (649 млн. человек в 2022 г.) Санкт-Петербург занимает второе место после Москвы [1, 2]. Только пять станций Санкт-Петербургского метро находятся непосредственно на поверхности земли (нулевой уровень). Остальные расположены на глубине от 8 м до 86 м [3]. Средняя глубина расположения станций составляет около 50 м (вычислено нами по данным [3]). Максимальная глубина перегонов (тоннелей) между некоторыми станциями превышает 100 м [3].

Находясь на территории метро человек неизбежно подвергается радиационному воздействию природных источников ионизирующего излучения: терригенного или земного (^{40}K , радионуклиды рядов ^{232}Th и ^{238}U) и космогенного (космическое излучение). Так как основную часть времени пассажир метро проводит на значительной глубине под землей, можно обоснованно утверждать, что мощность дозы внешнего облучения за счет космического излучения существенно ниже таковой на поверхности [4]. Вместе с тем без проведения измерений на месте сложно предсказать, в какую сторону изменится величина мощности дозы внешнего облучения пассажира метро от терригенных (природных) радионуклидов (ПРН) по сравнению с мощностью дозы в локациях на поверхности земли.

В общем случае для оценки мощности эффективной дозы внешнего облучения человека от ПРН ($E_{\text{ПРН}}$, нЗв/ч) в той или иной локации необходимо корректно измерить

Рамзаев Валерий Павлович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

соответствующую мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД_{ПРН}, нЗв/ч) и вычислить значение E_{ПРН}, используя коэффициент перехода (СС_{ПРН}, Зв/Зв) от операционной величины «амбиентный эквивалент дозы» (АЭД, Зв) к нормируемой величине «эффективная доза» (Е, Зв). Значение СС_{ПРН} незначительно варьирует в зависимости от соотношения удельных активностей ПРН в объектах окружающей среды и обратно пропорционально возрасту (в конечном счете, массе тела) человека. При типичном соотношении удельных активностей ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K = 35:35:370 в грунте численное значение СС_{ПРН} равно 0,58 для взрослых, 0,60 для подростков в возрасте 15 лет, и 0,69 для детей в возрасте 5 лет [5].

Корректное измерение МАЭД_{ПРН} в метро не является тривиальной задачей, т.к. пассажир передвигается по территории метрополитена, к которой относятся наземные вестибюли с привестибюльной территорией, подземные вестибюли с подуличными переходами, эскалаторы, средние залы и платформы станций, подходы коридоры, подземные переходы и тоннели [6]. При передвижении между станциями внутри перегонного тоннеля пассажир находится внутри вагона поезда. Между собой эти сублокации могут различаться по показателю МАЭД_{ПРН}. Так измерения, выполненные в метро города Прага (Чехия), показали, что мощность дозы гамма-излучения в воздухе на платформах выше таковой внутри вагона поезда [7].

Для оценки МАЭД_{ПРН} в случае сложной геометрии расположения источников излучения и передвижении человека в городе в наземных локациях, расположенных вне помещений, предложено использовать переносной (портативный) гамма-спектрометр [8, 9], который размещен в рюкзаке у оператора, проводящего измерения в пешеходном режиме. Такой режим позволяет одновременно измерить как общую МАЭД, так и эффективную удельную активность ПРН (А_{эфф}, Бк/кг) на всем маршруте [9]. В этом случае можно получить корректную величину МАЭД_{ПРН} для дальнейшего вычисления мощности эффективной дозы E_{ПРН} в той или иной локации. Важно и то, что при использовании портативного гамма-спектрометра и расшифровке спектрограмм можно объективно убедиться, что в момент проведения измерений отсутствовал вклад излучения от техногенных источников. В случае необходимости можно количественно определить МАЭД от техногенного источника, который присутствовал в окружающей среде в момент измерения (МАЭД_{тех}, нЗв/ч) [10]. Для вычисления МАЭД_{тех} используется формула [11]:

$$МАЭД_{тех} = МАЭД - МАЭД_{фон} - A_{эфф} \cdot КП, \quad (1)$$

где МАЭД – результаты измерения МАЭД, нЗв/ч; МАЭД_{фон} – суммарная величина собственного фона дозиметра и его отклика на космическое излучение, нЗв/ч; А_{эфф} – эффективная удельная активность ПРН, измеренная *in situ*, Бк/кг; КП – коэффициент перехода от А_{эфф} к МАЭД_{ПРН}, ((нЗв/ч)/(Бк/кг)). На практике величина КП варьирует в зависимости от метода измерений и геометрии источника и требует экспериментального определения для обследуемых локаций [9–11].

Насколько нам известно, до настоящего времени оценок мощности дозы внешнего облучения пассажира метро с использованием результатов, полученных с помощью портативного гамма-спектрометра, не проводилось.

Цель исследования – оценка мощности дозы внешнего облучения пассажира метро Санкт-Петербурга.

Задачи исследования

1. На всех линиях метро по различным маршрутам движения пассажиров измерить усредненные по маршруту значения МАЭД и А_{эфф}.
2. Вычислить усредненные по маршруту значения МАЭД_{ПРН} и КП от А_{эфф} к МАЭД_{ПРН}.
3. Валидировать полученное значение КП от А_{эфф} к МАЭД_{ПРН} в независимой серии измерений в метро.
4. Сравнить значения МАЭД_{ПРН}, полученные в данном исследовании на территории метро, с таковыми, определенными ранее тем же методом в других локациях в Санкт-Петербурге.
5. Вычислить среднее значение мощности эффективной дозы внешнего облучения для пассажира метро (E_{ПРН}).
6. Определить соответствие уровней внешнего облучения в метро требованиям санитарно-эпидемиологических правил и норм.

Материалы и методы

Для измерения МАЭД и А_{эфф} использовали портативный гамма-спектрометр-дозиметр (ГСД) МКС-АТ6101Д (фирма «АТОМТЕХ», Беларусь), который размещали в рюкзаке на спине у оператора [9, 10]. Значение МАЭД_{фон} (4 нЗв/ч) было получено при измерении спектра внутри низкофоновой стальной камеры (толщина стенок 20 см), предназначенной для измерения радиоактивности в теле человека (счетчик излучения человека). Данное фоновое значение МАЭД внутри такой камеры в большей мере применимо к измерениям под землей, по сравнению с величиной МАЭД_{фон} (8 нЗв/ч), измеренной на поверхности Финского залива [9].

Были обследованы все пять линий Санкт-Петербургского метро. Оператор перемещался по территории метро как обычный пассажир, совершающий поездку от одной станции к другой. В основной серии измерений были рассмотрены два распространенных варианта поездок: беспересадочная и с одной пересадкой на узловой станции. В первом случае в качестве станции посадки выбирали одну из станций, расположенных в центре города, а посадка происходила на одной из конечных станций данной линии. После этого оператор возвращался по встречному маршруту на станцию посадки и проводил цикл измерений в противоположном направлении, начиная с той же станции в центре города и заканчивая на другой конечной станции линии. В общей сложности по этой схеме было обследовано 20 маршрутов. В случае поездки с пересадкой станции входа и выхода на территорию метро выбирали произвольно. Были обследованы 18 маршрутов для всех действующих семи пересадочных узлов (на одном из узлов пересекаются три линии). В общей сложности во время передвижения по маршрутам оператор побывал на 44 станциях.

Измерение начинали на предвестибюльной территории или у входа в подуличный переход на станции посадки. Далее следовали: перемещение по вестибюлю, спуск по эскалатору и/или лестнице, проход по подходу коридору (при наличии) и платформе и ожидание поезда на платформе, поездка в поезде (стоя или сидя), проход по платформе конечной станции поездки, проход по подходу

коридору (при наличии), подъем по эскалатору и/или лестнице, проход по вестибюлю. Измерение завершали при выходе на предвестибюльную территорию или у выхода из подуличного перехода станции назначения; файл с полученными данными, которые по умолчанию включали в себя продолжительность измерения (Т, с), записывали в память ГСД. В случае подземной пересадки с линии на линию (станции на станцию) в общий маршрут (и, соответственно, в непрерывное измерение спектра) входило перемещение по переходу к платформе другой линии и ожидание прибытия поезда на платформе.

Для валидации значения КП, полученного в основной серии измерений, были использованы спектры, измеренные авторами во время поездок оператора в метро на маршрутах ($n = 21$), которые отличались от таковых в основной серии. При этом схема проведения измерений в серии для валидации КП была такой же, как и в основной серии.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием Excel for Windows и online платформы открытого доступа¹.

Результаты и обсуждение

В общей сложности было измерено 60 спектров. При визуальном анализе 59 спектров были идентифицированы гамма-пики только природных радионуклидов из семейств ^{238}U (^{214}Bi), ^{232}Th (^{208}Tl), и ^{40}K . Примеры приведены на рисунке (панели А–Е).

В одном случае (рис., панель F, маршрут Садовая-Шушары) наряду с пиками от ПРН был обнаружен пик с энергией 511 кэВ. При повторном измерении на том же маршруте (рис., панель F, маршрут Садовая-Шушары-повт.) данный пик отсутствовал. Следует отметить, что в диапазоне 600–2800 кэВ аномальный и фоновый спектры совпадали между собой по амплитуде и форме. Мы предполагаем, что наличие пика с энергией 511 кэВ связано с присутствием в момент первого измерения на данном маршруте некоего пациента, выписанного из клиники после проведения позитрон-эмиссионной томографии (ПЭТ) с использованием техногенных радионуклидов ^{18}F или ^{68}Ga . Известно, что в Санкт-Петербурге имеются отделения ядерной медицины, в которых проводят данные исследования [12, 13]. ^{18}F и ^{68}Ga являются короткоживущими радионуклидами: период полураспада равен 110 и 68 минут соответственно. С точки зрения радиационной безопасности населения допускается, что в этом случае выписка пациентов может быть проведена спустя уже 2 часа после процедуры [14]; при этом в организме пациента присутствует остаточная активность радионуклида.

Измеренные значения МАЭД варьировали от 65 до 214 нЗв/ч (средняя 92 нЗв/ч, $n = 60$). Для изучения соотношения между МАЭД_{ПРН} и $A_{\text{эфф}}$ из величины общей МАЭД было вычтено значение МАЭД_{фон} (4 нЗв/ч). Полученная величина обозначена как МАЭД_{корр}. Максимальные значения МАЭД

(214 нЗв/ч) и МАЭД_{корр} (210 нЗв/ч) были получены при измерении спектра в присутствии техногенного источника (пик 511 кэВ, рис.). Этот спектр был расценен как выброс; в общей статистике анализа МАЭД_{корр} и КП данный выброс не учитывался, но рассмотрен ниже отдельно.

Значения продолжительности (времени) измерения спектра, МАЭД, $A_{\text{эфф}}$ и отношения МАЭД_{корр} к $A_{\text{эфф}}$ для каждого из маршрутов в основной серии измерений даны в таблице 1. Там же, в нижней части, приведены результаты статистической обработки данных. В среднем продолжительность одной поездки составляла менее получаса (1615 с) и варьировала от 915 до 2110 с. Разброс значений МАЭД_{корр} и $A_{\text{эфф}}$ был менее, чем двукратный: от 64 до 106 нЗв/ч и от 108 до 185 Бк/кг соответственно. МАЭД_{корр} и $A_{\text{эфф}}$ статистически значимо и сильно коррелировали друг с другом: коэффициент корреляции Спирмена равен 0,988 при $p < 0,01$. Значения коэффициента перехода от $A_{\text{эфф}}$ к МАЭД_{корр} находились в очень узком диапазоне от 0,56 до 0,60 ((нЗв/ч)/(Бк/кг)); среднее и медианное значения КП совпадали друг с другом и равнялись 0,58 ((нЗв/ч)/(Бк/кг)). Данную величину можно обоснованно рассматривать в качестве КП от измеренного в метро значения $A_{\text{эфф}}$ к значению МАЭД_{ПРН}, т.к. включенные в статистический анализ спектры свидетельствовали о присутствии в окружающей среде только природных радионуклидов.

Надежность использования полученной величины КП для вычисления ожидаемых значений МАЭД_{ПРН} на основании измеренных *in situ* значений $A_{\text{эфф}}$ была проверена в валидационной серии измерений (табл. 2). Во всех измеренных спектрах ($n = 21$) присутствовали пики только ПРН. Как видно из таблицы 2, вычисленные значения МАЭД_{ПРН} отличались от измеренных значений не более чем на 4%. В среднем различия составили всего 0,2% и были статистически незначимы (критерий Уилкоксона для связанных выборок, $p > 0,05$). Таким образом, в метро значение коэффициента КП $0,58 \pm 0,01$ ((нЗв/ч)/(Бк/кг)) может быть использовано для вычисления МАЭД_{ПРН} по данным измерений $A_{\text{эфф}}$.

Экспериментальное определение устойчивой величины КП от $A_{\text{эфф}}$ к МАЭД_{ПРН} в метро позволяет оценить вклад техногенного источника в общую мощность дозы гамма-излучения для случая измерений на маршруте Садовая-Шушары с использованием данных таблицы 1 и выражения (1). Значение МАЭД_{тех} и статистическая неопределенность (2 сигма) составили 115 ± 11 нЗв/ч. Справедливость данной оценки может быть проверена, так как на том же маршруте был измерен фоновый спектр в отсутствии техногенного источника (Садовая-Шушары-повт.). Значение МАЭД_{тех} и статистическая неопределенность (2 сигма), вычисленные как разница между результатами двух измерений (в присутствии и отсутствии техногенного источника), были равны: $(214 \pm 10) - (101 \pm 5) = (113 \pm 11)$ нЗв/ч. Как видно, имеется очень хорошее согласие между двумя способами оценки МАЭД_{тех}: разница не превышает 2% и находится в рамках статистических неопределенностей измерений.

¹Social Science Statistics. Доступно по ссылке [Available from]: <https://www.socscistatistics.com> (Дата обращения: 01.07.2025 [Accessed July 01, 2025]).

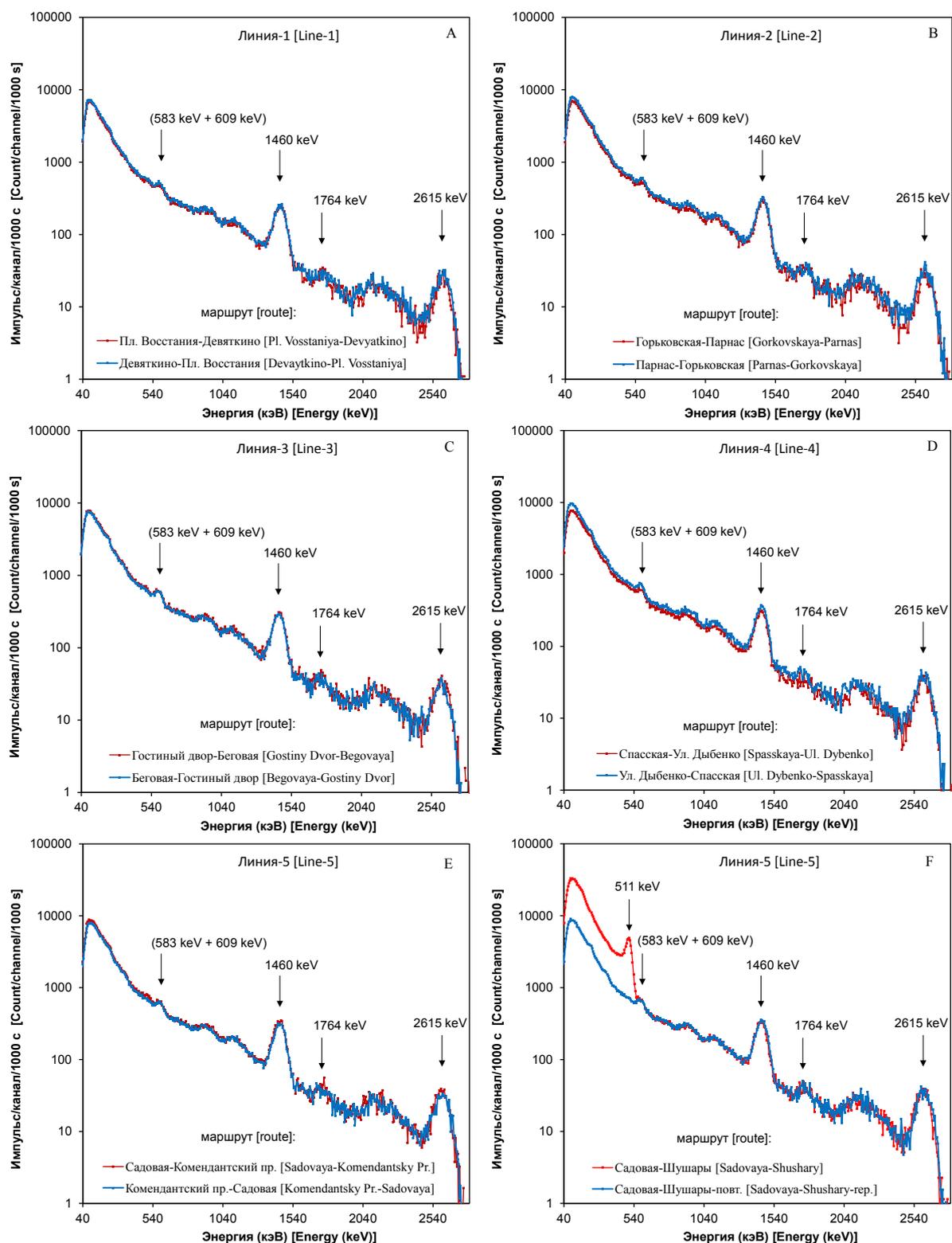


Рис. Гамма-спектры, измеренные при передвижении оператора в режиме «пассажир» по маршрутам в метро Санкт-Петербурга в 2025 г. Отмечены основные гамма-пики природных радионуклидов: 2615 кэВ от ^{208}Tl , 1764 кэВ от ^{214}Bi , 1460 кэВ от ^{40}K и суммарный пик (583 кэВ + 609 кэВ) от ^{208}Tl и ^{214}Bi . Пик с энергией 511 кэВ на панели F может быть связан с техногенными радионуклидами ^{18}F или ^{68}Ga

[Fig.] Gamma-ray spectra measured during travel of the operator in the "passenger" mode along the routes of the St. Petersburg metro in 2025. The main gamma peaks of natural radionuclides marked are: 2615 keV of ^{208}Tl , 1764 keV of ^{214}Bi , 1460 keV of ^{40}K , and the composite peak (583 keV + 609 keV) of ^{208}Tl and ^{214}Bi . The peak with the energy of 511 keV in panel F may be associated with the human-made radionuclides ^{18}F or ^{68}Ga

Radiation measurements

Таблица 1

Продолжительность поездки (время измерения гамма-спектра), общая мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД), эффективная удельная активность природных радионуклидов ($A_{эфф}$) и отношение мощности амбиентного эквивалента дозы с учетом поправки на собственный фон прибора и отклик на космическое излучение ($МАЭД_{кор}$) к $A_{эфф}$ в основной серии измерений ($n = 39$) на маршрутах в метро Санкт-Петербурга в 2025 г.

[Table 1

Travel duration (gamma spectrum measurement time), total ambient dose equivalent rate (ADER), effective activity concentration of natural radionuclides (A_{eff}), and the ratio of the ambient dose equivalent rate with correction for the intrinsic background of the instrument and its response to cosmic radiation ($ADER_{cor}$) to A_{eff} in the main series of measurements ($n = 39$) on the routes in the St. Petersburg metro in 2025]

Линии [Lines]	Маршрут [Route]		Время, с [Time, s]	МАЭД, нЗв/ч [ADER, nSv/h]	$A_{эфф}$, Бк/кг [A_{eff} , Bq/kg]	МАЭД _{кор} / $A_{эфф}$ (нЗв/ч)/(Бк/кг)) [$ADER_{cor}/A_{eff}$, (nSv/h)/(Bq/kg)]
	Станция посадки [Boarding station]	Станция назначения [Destination station]				
1	Площадь Восстания [Ploshchad Vosstaniya]	Девяткино [Devyatkinno]	1836	73,6	116	0,60
1	Девяткино [Devyatkinno]	Площадь Восстания [Ploshchad Vosstaniya]	1941	77,7	123	0,60
1	Площадь Восстания [Ploshchad Vosstaniya]	Проспект Ветеранов [Prospekt Veteranov]	1766	69,5	112	0,58
1	Проспект Ветеранов [Prospekt Veteranov]	Площадь Восстания [Ploshchad Vosstaniya]	1768	68,1	108	0,59
1	Горьковская [Gorkovskaya]	Парнас [Parnas]	1577	81,1	132	0,58
1	Парнас [Parnas]	Горьковская [Gorkovskaya]	1642	89,7	145	0,59
1	Горьковская [Gorkovskaya]	Купчино [Kupchino]	1883	78,0	123	0,60
1	Купчино [Kupchino]	Горьковская [Gorkovskaya]	1904	80,1	127	0,60
3	Гостиный двор [Gostiny Dvor]	Беговая [Begovaya]	1385	91,1	152	0,57
3	Беговая [Begovaya]	Гостиный двор [Gostiny Dvor]	1495	87,5	143	0,58
3	Гостиный двор [Gostiny Dvor]	Рыбацкое [Rybatkoye]	2101	98,0	161	0,58
3	Рыбацкое [Rybatkoye]	Гостиный двор [Gostiny Dvor]	2110	88,9	146	0,58
4	Спасская [Spasskaya]	Улица Дыбенко [Ulitsa Dybenko]	1654	91,5	148	0,59
4	Улица Дыбенко [Ulitsa Dybenko]	Спасская [Spasskaya]	1751	107	176	0,59
4	Спасская [Spasskaya]	Горный институт [Gorny Institut]	984	92,9	149	0,60
4	Горный институт [Gorny Institut]	Спасская [Spasskaya]	970	92,8	150	0,59
	Садовая [Sadovaya]	Шушары [Shushary]	1757	214	163	1,29*
5	Садовая (повт.) [Sadovaya (rep.)]	Шушары (повт.) [Shushary (rep.)]	1914	101	167	0,58
5	Шушары [Shushary]	Садовая [Sadovaya]	2043	95,4	158	0,58
5	Садовая [Sadovaya]	Комендантский проспект [Komendantsky Prospekt]	1856	99,2	162	0,59

Радиационные измерения

Окончание таблицы 1

Линии [Lines]	Маршрут [Route]		Время, с [Time, s]	МАЭД, нЗв/ч [ADER, nSv/h]	A _{эфф} , Бк/кг [A _{eff} , Bq/kg]	МАЭД _{корр} /A _{эфф} (нЗв/ч)/(Бк/кг) [ADER _{corr} /A _{eff} , (nSv/h)/(Bq/kg)]
	Станция посадки [Boarding station]	Станция назначения [Destination station]				
5	Комендантский проспект [Komendantsky Prospekt]	Садовая [Sado- vaya]	1710	94,0	153	0,59
1//2	Нарвская [Narvskaya]	Петроградская [Petrogradskaya]	1476	80,0	128	0,59
2//1	Петроградская [Petrogradskaya]	Нарвская [Narvskaya]	1561	73,9	117	0,60
1//3	Выборгская [Vyborgskaya]	Елизаровская [Elisarovskaya]	1522	75,4	122	0,58
3//1	Елизаровская [Elisarovskaya]	Выборгская [Vyborgskaya]	1784	83,4	137	0,58
1//4	Площадь Ленина [Ploshchad Lenina]	Лиговский про- спект [Ligovsky Prospekt]	1285	82,4	135	0,58
4//1	Лиговский про- спект [Ligovsky Prospekt]	Площадь Ленина [Ploshchad Lenina]	1477	95,5	160	0,58
1//5	Нарвская [Narvskaya]	Адмиралтейская [Admiralteyskaya]	1446	80,3	131	0,58
5//1	Адмиралтейская [Admiralteyskaya]	Нарвская [Narvskaya]	1582	82,0	133	0,59
2//3	Горьковская [Gorkovskaya]	Приморская [Primorskaya]	1319	98,4	169	0,56
3//2	Приморская [Primorskaya]	Горьковская [Gorkovskaya]	1457	90,9	149	0,58
2//4	Технологический институт [Tekhnologichesky Institut]	Достоевская [Dostoevskaya]	1267	110	185	0,57
4//2	Достоевская [Dostoevskaya]	Технологический институт [Tekhnologichesky Institut]	1060	92,4	151	0,58
2//5	Невский проспект [Nevsky Prospekt]	Обводный канал [Obvodny Kanal]	1234	106	176	0,58
5//2	Обводный канал [Obvodny Kanal]	Невский проспект [Nevsky Prospekt]	1445	102	168	0,58
3//4	Василеостровская [Vasileostrovskaya]	Новочеркасская [Novocherkasskaya]	1505	92,4	155	0,57
4//3	Новочеркасская [Novocherkasskaya]	Василеостровская [Vasileostrovskaya]	1665	104	173	0,58
4//5	Ладожская [Ladozhskaya]	Спортивная [Sportivnaya]	1899	87,1	141	0,59
5//4	Спортивная [Sportivnaya]	Ладожская [Ladozhskaya]	2105	91,4	152	0,57
Минимум [Minimum]			970	68,1	108	0,56
Максимум [Maximum]			2110	214	185	0,60
Медиана [Median]			1642	91,1	149	0,58
Средняя [Mean]			1619	92,3	146	0,58
С.о. [SD]			301	22,6	19	0,01

* – значение не учитывалось в статистическом анализе [the value was not included in the statistical analysis].

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation].

Продолжительность поездки (время измерения гамма-спектра), общая мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД), эффективная удельная активность природных радионуклидов ($A_{эфф}$), вычисленная и измеренная мощность амбиентного эквивалента дозы от природных радионуклидов (МАЭД_{ПРН}) и разница между вычисленной и измеренной МАЭД_{ПРН} в валидационной серии измерений (n = 21) в метро Санкт-Петербурга

Travel duration (gamma spectrum measurement time), total ambient dose equivalent rate (ADER), effective activity concentration of natural radionuclides (A_{eff}), calculated and measured ambient dose equivalent rate from natural radionuclides (ADER_{NRN}), and the difference between calculated and measured ADER_{NRN} in the validation series of measurements (n = 21) in the St. Petersburg metro]

Параметр [Parameter]	Время (с) [Time (s)]	МАЭД (нЗв/ч) [ADER (nSv/h)]	$A_{эфф}$ (Бк/кг) [A_{eff} (Bq/kg)]	МАЭД _{ПРН} (нЗв/ч) [ADER _{NRN} (nSv/h)]		Разница [Difference]	
				вычисленная [calculated]	измеренная [measured]	абсолютная (нЗв/ч) [absolute (nSv/h)]	относительная (%) [relative (%)]
Минимум [Minimum]	576	65,3	104	60,3	61,3	-3,4	-3,4
Максимум [Maximum]	1596	111	188	109	107	2,9	4,0
Медиана [Median]	1166	92,4	151	87,6	88,4	0,1	0,1
Средняя [Mean]	1115	91,0	150	86,9	87,0	0,1	0,2
С.о. [SD]	289	12,0	22	12,7	12,0	1,6	1,8

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation].

Определенное нами среднее значение МАЭД_{ПРН} в петербургском метро (86 нЗв/ч, n = 59, исключая аномальный спектр с идентифицированным пиком 511 кэВ) оказались меньше, чем те средние значения МАЭД_{ПРН}, которые были получены с помощью того же метода измерений на пешеходных частях улиц (114 нЗв/ч, n = 70), дворов (114 нЗв/ч, n = 11) площадей (141 нЗв/ч, n = 10), дорожек в парках (126 нЗв/ч, n = 27), и набережных (средняя = 146 нЗв/ч, n = 9) Санкт-Петербурга [9]. Соответственно, в Санкт-Петербурге передвижение местного жителя или приезжего с помощью метро, по сравнению с передвижением пешим ходом по поверхностным локациям, не должно приводить к дополнительному внешнему облучению от ПРН, присутствующих в окружающей среде. Это положение в целом согласуется с результатами исследования [15], посвященного измерению МАЭД на станциях метро города Минска (Беларусь). Авторы работы [15] предполагают, что «... минский метрополитен не формирует значимой дополнительной дозы внешнего облучения для его пользователей».

Среднее значение общей МАЭД, измеренной нами в метро Санкт-Петербурга (92 нЗв/ч), – ниже, чем общее усредненное значение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (120 нЗв/ч) на 33 станциях метро города Минска [15], и ниже средней величины «радиационного фона» (122 нЗв/ч) на 77 станциях метро города

Москвы [16]. Помимо особенностей самих метрополитенов, различия могут быть связаны как с использованием разных приборов для измерения (МКС-АТ6101Д в Санкт-Петербурге, МКС-АТ6130А в Минске, РАДЭКС-РД1706 в Москве), так и с условиями выполнения измерений. В нашем исследовании измерения проводили по всему маршруту следования пассажира, включая вагон поезда и эскалатор, а в работах [15, 16] – только на станциях. Как было показано на примере метро в Праге (Чехия) [7], мощность дозы гамма-излучения примерно в 2 раза ниже в вагонах (34–49 нГр/ч), чем на станциях (60–110 нГр/ч).

Метрополитен следует рассматривать как сооружение для общественного пользования. Данное сооружение в Санкт-Петербурге динамично развивается и находится в состоянии постоянного строительства; в эксплуатацию вводятся новые станции, а существующие обновляются и реконструируются. На помещения общественных зданий и сооружений, вводимых в эксплуатацию, распространяются требования главы XIII СанПиН 2.6.4115-25², согласно которым МАЭД гамма-излучения в воздухе таких помещений «не должна превышать МАЭД гамма-излучения на открытой местности более чем на 0,3 мкЗв/ч» (пункт 297). Точно такое же требование существует в отношении эксплуатируемых общественных зданий и сооружений (пункт 300 СанПиН 2.6.4115-25). Из обсуждения, приведенного выше,

²Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.6.4115-25 «Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения». Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27 марта 2025 г. № 6 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 21 апреля 2025 г., регистрационный № 81916). [Sanitary Rules and Norms SanPiN 2.6.4115-25 "Sanitary and Epidemiological Requirements in the Field of Population Radiation Safety When Handling Sources of Ionizing Radiation". Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 27.03.2025 No. 6 (registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on April 21, 2025, registration No. 81916). (In Russ.)]

видно, что МАЭД в Петербургском метро даже несколько ниже, чем МАЭД на открытой местности внутри города. Таким образом, по показателю МАЭД метрополитен Санкт-Петербурга с явным запасом соответствует современным санитарно-эпидемиологическим требованиям.

Количественно оценим среднюю мощность эффективной дозы внешнего облучения от природных радионуклидов ($E_{\text{пн}}$) для взрослого пассажира метро Санкт-Петербурга. Допускаем, что пассажир может с одинаковой вероятностью воспользоваться метро на любом из обследованных маршрутов. Продолжительность перемещения оператора по разным маршрутам различалась (табл. 1 и 2), поэтому для оценки средней $E_{\text{пн}}$ следует воспользоваться средне-взвешенной (по времени) МАЭД_{пн}. В нашем случае эта величина несущественно отличалась от средней МАЭД_{пн} и составила 85,6 нЗв/ч.

Преобразование МАЭД_{пн} в $E_{\text{пн}}$ может быть проведено в соответствии с п. 5.1 МУ 2.6.1.1088-02³ с использованием коэффициента, равного 1,0. В этом случае будет получена оценка эффективной дозы, приемлемая с точки зрения обеспечения радиационной безопасности [17], хотя и избыточно консервативная (86 нЗв/ч). Отметим, что опубликованных в литературе обоснованных значений реалистичного коэффициента преобразования МАЭД_{пн} в $E_{\text{пн}}$ применительно к условиям облучения человека в сложно устроенных сооружениях метро мы не встретили. Поэтому, в качестве первого приближения, для сравнения с консервативной оценкой мы использовали значение коэффициента преобразования МАЭД_{пн} в $E_{\text{пн}}$ для условий 2π-геометрии источника излучения из работы [5]. Для значения $CC_{\text{пн}}$ 0,58 Зв/Зв для взрослого человека [5] получаем: $85,6 \times 0,58 = 49,6$ нЗв/ч (округленно – 50 нЗв/ч). Внутри весьма объемных станций метро на платформах человек находится намного ближе к полу (один из наиболее распространенных материалов покрытия в Санкт-Петербургском метрополитене – гранит), чем к стенам и потолку этих больших сооружений. Мы допускаем, что в этом случае геометрия источника излучения будет ближе к 2π, чем к 4π. Еще раз подчеркнем, что представленная оценка $E_{\text{пн}}$ является предварительной, т.к. она сделана на основе имеющихся в настоящее время данных и коэффициентов. Для получения более точных оценок необходимо проведение измерительных и модельных работ по установлению численных значений коэффициентов связи между МАЭД_{пн} и $E_{\text{пн}}$ в городской среде, включая территорию метрополитена. Важным натурным направлением таких работ является определение спектральной характеристики и углового распределения гамма-излучения, а также вариабельности МАЭД внутри различных структурных секций метрополитена.

Средневзвешенное значение МАЭД_{тех} для 60 наших измерений спектров в метро не превысило 3 % от МАЭД_{пн} и составило около 2,3 нЗв/ч. Эта величина абсолютно безопасна для человека: при условии ежедневных поездок в метро продолжительностью 1 час в день оценка эффективной дозы облучения от техногенного источника такой мощности не достигает 1 мкЗв/год, что существенно меньше предела 10 мкЗв/год, превышение которого предполагает применение требований норм радиационной безопасности НРБ-99/2009⁴.

Встреча жителя Санкт-Петербурга или приезжего с пациентом-носителем остаточной активности какого-либо техногенного радионуклида, применяемого в медицине, является очень редким событием. В процессе выполнения наземных гамма-спектрометрических исследований в пешеходном режиме в шести районах Санкт-Петербурга [9] среди 171 измеренного спектра был обнаружен всего один аномальный спектр, на котором присутствовал пик с энергией 140 кэВ (радионуклид ^{99m}Tc, применяемый в ядерной медицине). С учетом данных настоящего обследования, вероятность такой аномалии (2 случая на 231 измерение) составляет менее 1 %.

Заключение

Использование портативного гамма-спектрометра-дозиметра, носимого в рюкзаке оператором, позволило определить интегральную МАЭД и эффективную удельную активность природных радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$) по 60 полным маршрутам следования пассажира в метро Санкт-Петербурга. Значения измеренной величины МАЭД варьировали от 65 до 214 нЗв/ч и в среднем составили 92 нЗв/ч. Средняя МАЭД от природных радионуклидов (МАЭД_{пн}) составила 86 нЗв/ч. МАЭД_{пн} и $A_{\text{эфф}}$ сильно коррелировали друг с другом (коэффициент корреляции Спирмена равен 0,988). Соотношение между МАЭД_{пн} и $A_{\text{эфф}}$ было очень устойчивым и равнялось $0,58 \pm 0,01$ ((нЗв/ч)/(Бк/кг)). Данное соотношение (коэффициент перехода от $A_{\text{эфф}}$ к МАЭД_{пн}) может быть использовано для количественной оценки вклада техногенного и природного излучения в общую МАЭД и дозу внешнего облучения человека в метро. Средняя мощность эффективной дозы внешнего облучения от терригенных радионуклидов для взрослого пассажира Санкт-Петербургского метро консервативно оценена величиной 86 нЗв/ч. Сопоставление результатов данной работы и литературных данных показывает, что в Санкт-Петербурге передвижение местного жителя или приезжего с помощью метро, по сравнению с передвижением пешим ходом по поверхностным локациям, не приведет к дополнительному внешнему облучению от природных радионуклидов, присутствующих в окружающей среде. По показателю МАЭД метрополитен Санкт-Петербурга соответствует современным санитарно-эпидемиологическим требованиям, предъявляемым к общественным сооружениям.

³Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Методические указания МУ 2.6.1.1088-02. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 04.01.2002. [Assessment of individual effective doses to the population due to natural sources of ionizing radiation. Guidelines MU 2.6.1.1088-02. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 04.01.2002. (In Russ.)]

⁴Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534. [Norms of Radiation Safety (NRB-99/2009). Sanitary Rules and Norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered by the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.)]

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Рамзаев В.П. – концептуализация, измерения, написание рукописи.

Барковский А.Н. – концептуализация, редактирование рукописи.

Благодарности

Авторы искренне признательны двум рецензентам за тщательное рецензирование рукописи и конструктивные замечания, позволившие улучшить качество рукописи.

Информация о конфликте интересов

У авторов нет конфликтов интересов, которые следует раскрывать.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

- Милорадова Ю. В каких городах России есть метро. URL: <https://mag.russpass.ru/rubric/napravlenija/goroda-rossiide-est-metro> (Дата обращения: 15.05.2025).
- Российская академия транспорта. Анализ динамики изменения основных показателей функционирования метрополитенов в городах России. URL: <https://rosacademtrans.ru/metro-0124/> (Дата обращения: 15.05.2025).
- Метро Санкт-Петербурга. URL: <https://subway-spb.ru/> (Дата обращения: 16.05.2025).
- Minato S. Cosmic ray dose rates in urban environment: case studies in Nagoya, Japan. Radiation Earth Science Laboratory: Nagoya, Japan, 2016.
- Ulanowski A., Sato T., Petoussi-Henss N., Balonov M. Relationships between protection and operational dosimetric quantities for external exposure to natural background radiation // Radiation and Environmental Biophysics. 2025. Vol. 64. P. 105–115. DOI: 10.1007/s00411-025-01109-3.
- Правила пользования Петербургским метрополитеном. URL: <https://metro.spb.ru/pravilapolzovaniapm.html/> (Дата обращения: 29.07.2025).
- Sabol J. Evaluation of radon concentrations in air and gamma dose rates in the Prague metro. Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. No. 2504. Environmental Monitoring and Hazardous Waste Site Remediation. 9 October 1995. DOI: 10.1117/12.224127.
- Cresswell A.J., Sanderson D.C.W., Harrold M. et al. Demonstration of lightweight gamma spectrometry systems in urban environments // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 124. P. 22–28. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.03.006.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Измерение эффективной удельной активности природных радионуклидов *in situ* для оценки мощности AMBIENTного эквивалента дозы в городской среде // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 132–145. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-132-145.
- Ramzaev V., Bernhardsson C., Barkovsky A. et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation // Radiation Measurements. 2017. Vol. 107. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.radmeas.2017.10.002.
- Ramzaev V., Barkovsky A., Bernhardsson C., Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors // Radiacionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 18–29. DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-18-29.
- Звонова И.А., Чипига Л.А., Балонов М.И., Сухов В.Ю. Радионуклидная диагностика в Санкт-Петербурге: текущее состояние и проблемы развития // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 32–41.
- Чипига Л.А., Козлова К.Н., Звонова И.А. и др. География и структура центров ядерной медицины на территории Российской Федерации по состоянию на 2025 год // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 121–131. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-121-131.
- Aldousari H., Abuhadi N., Izz M. et al. Assessment of external radiation dose rate after 18FDG-PET/CT examination // Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine. 2023. Vol. 54. P. 80. DOI: 10.1186/s43055-023-01031-y.
- Цвирко А.А., Лапутько М.А. Мощность AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения в Минском метрополитене. Актуальные проблемы современной медицины и фармации 2022 [электронный ресурс]: сб. материалов докл. LXXVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, Минск, 20–21 апр. 2022 г. / под ред. С.П. Рубниковича, В.А. Филонюка. – Минск: БГМУ. 2022. С. 1067. URL: <https://rep.bsmu.by/handle/BSMU/37510?show=full>. (Дата обращения: 08.07.2025).
- Михайловская Н.Н., Корзенков А.Е., Соколов В.С., Чернов Т.А. Методика организации исследовательской работы «Радиационный фон станций Московского метрополитена» // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 12. С. 1–4. DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.94.
- Романович И.К., Барковский А.Н. О новых критериях отнесения отходов к радиоактивным и об изменениях, внесенных в ОСПОРБ-99/2010 и СПОРО-2002 // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 30–35.

Поступила: 14.07.2025

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Использование портативного гамма-спектрометра для оценки уровней внешнего облучения пассажира метро // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 130–140. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-130-140

Using a portable gamma-ray spectrometer to estimate the external exposure for a subway passenger

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

The subway (metro) is a popular form of public transportation system in many large cities. While in the subway territory (one of the locations in the city), a passenger is inevitably exposed to external irradiation from natural (terrestrial) sources of ionizing gamma radiation – ^{40}K , radionuclides of the ^{232}Th and ^{238}U series, which are present in the ground and building materials. The aim of this study was to estimate the external exposure for a metro passenger in St.-Petersburg (Russia). Materials and Methods: A portable gamma spectrometer-dosimeter, carried in a backpack by the operator, was used to measure the integral ambient dose equivalent rate and the effective activity concentration of natural radionuclides along 60 selected passenger routes in the metro. The effective dose rate of external exposure of a metro passenger was estimated using results of the measurements and the published conversion coefficient from ambient dose equivalent to the effective dose. Results and Discussion: The measured values of ambient dose equivalent rate varied from 65 to 214 nSv/h and averaged 92 nSv/h. Effective activity concentration of natural radionuclides ranged from 104 to 188 Bq/kg (average = 147 Bq/kg). The average ambient dose equivalent rate from natural radionuclides was 86 nSv/h (range from 61 to 107 nSv/h). The ratio of the ambient dose equivalent rate from natural radionuclides to the effective activity concentration varied slightly from 0.56 to 0.61 ((nSv/h)/(Bq/kg)) and averaged 0.58 ((nSv/h)/(Bq/kg)). The average effective dose rate of external exposure from natural radionuclides is conservatively estimated at 86 nSv/h for an adult passenger of the St. Petersburg metro. Conclusion: Comparison of the results of this work and literature data shows that the travel of a local resident or visitor in St. Petersburg using the metro, compared to walking on foot in surface urban locations, should not lead to additional external exposure from natural radionuclides present in the environment. In terms of ambient dose equivalent rate, the St.-Petersburg metro fully complies with modern sanitary and epidemiological requirements for public facilities.

Key words: subway, metro, passenger, ambient dose equivalent, effective dose, natural radionuclides.

Authors' personal contribution

Ramzaev V.P. – conceptualization, measurements, writing the manuscript.

Barkovsky A.N. – conceptualization, editing the manuscript.

Acknowledgments

The authors are sincerely grateful to two reviewers for their careful review of the manuscript and the constructive comments that improved the quality of the manuscript.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to declare.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

- Miloradova Yu. In which cities of Russia is there a metro. Available from: <https://mag.russpass.ru/rubric/napravleniya/goroda-rossii-gde-est-metro> [Accessed May 15, 2025]. (In Russian).
- Russian Academy of Transport. Analysis of the dynamics of changes in the main indicators of the functioning of metro systems in Russian cities. Available from: <https://rosacademtrans.ru/metro-0124/> [Accessed May 16, 2025]. (In Russian).
- Saint Petersburg metro. Available on: <https://subway-spb.ru/en> [Accessed May 16, 2025].
- Minato S. Cosmic ray dose rates in urban environment: case studies in Nagoya, Japan. *Radiation Earth Science* Laboratory: Nagoya, Japan; 2016.
- Ulanowski A, Sato T, Petoussi-Hens N, Balonov M. Relationships between protection and operational dosimetric quantities for external exposure to natural background radiation. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2025;64: 105–115. DOI: 10.1007/s00411-025-01109-3.
- Rules for Using the St. Petersburg Metro. Available on: <https://metro.spb.ru/pravilapolzovaniapm.html/> [Accessed July 29, 2025]. (In Russian).
- Sabol J. Evaluation of radon concentrations in air and gamma dose rates in the Prague metro. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*. No. 2504. Environmental Monitoring and Hazardous Waste Site Remediation. (9 October 1995). DOI: 10.1117/12.224127.
- Cresswell AJ, Sanderson DCW, Harrold M, Kirley B, Mitchell C, Weir A. Demonstration of lightweight gamma spectrometry systems in urban environments. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;124: 22–28. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.03.006.
- Ramzaev VP, Barkovsky AN. Measurement of effective activity concentration of natural radionuclides *in situ* for assessment of ambient dose equivalent rate in urban environments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(2): 132–145. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-132-145.
- Ramzaev V, Bernhardsson C, Barkovsky A, Romanovich I, Jarneborn J, Mattsson S, et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $\text{H}^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation. *Radiation Measurements*. 2017;107: 14–22. DOI: 10.1016/j.radmeas.2017.10.002.
- Ramzaev V, Barkovsky A, Bernhardsson C, Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray

Valery P. Ramzaev

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: 8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

- spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 18–29. DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-18-29.
12. Zvonova IA, Chipiga LA, Balonov MI, Sukhov VJ. Radionuclide diagnostics in St. Petersburg: current status and development challenges. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 32–41. (In Russian).
 13. Chipiga LA, Kozlova KN, Zvonova IA, Vodovatov AV, Bibliin AM, Stanzhevsky AA. The geography and structure of nuclear medicine centres in the Russian Federation in 2025. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(2): 121–131. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-121-131.
 14. Aldousari H, Abuhadi N, Izz M, Alshammari T, Ali Z, Aldaas R, et al. Assessment of external radiation dose rate after 18FDG-PET/CT examination. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2023;54: 80. DOI: 10.1186/s43055-023-01031-y.
 15. Tsvirko AA, Laputko MA. Ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the Minsk metro. Actual Problems of Modern Medicine and Pharmacy 2022 [electronic resource]: Collection of Materials of Reports. LXXVI Int. Scientific and Practical. Conf. of Students and Young Scientists, Minsk, April 20–21, 2022. Edited by Rubnikov SP, Filonyuk VA. Minsk: BSMU. 2022. P. 1067. Available from: <https://rep.bsmu.by/handle/BSMU/37510?show=full>. [Accessed July 08, 2025]. (In Russian).
 16. Mikhailovskaya NN, Korzenkov AYu, Sokolov VS, Chernov TA. Methodology of organizing research work "Radiation background of Moscow metro stations". *Mezhdunarodnyy Nauchno-issledovatel'skiy Zhurnal = International Research Journal*. 2022;(12): 1–4. (In Russian). DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.94.
 17. Romanovich IK, Barkovsky AN. On a new criteria of the referring waste to radioactive categories and on the amendments introduced in BSRRSP-99/2010 and SRRWT-2002. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 30–35. (In Russian).

Received: July 14, 2025

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru)

Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Centre, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Using a portable gamma-ray spectrometer to estimate the external exposure for a subway passenger. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No 3. P. 130–140. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-130-140