

## ОЦЕНКА ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПРИРОДНЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ, В ОБРАЗЦАХ ПОРОД РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ (*Азад Кашмир, Пакистан*)

**М. Рафик<sup>1</sup>, А.Р. Хан<sup>1</sup>, А. Джаббар<sup>2</sup>, С.Ю. Рахман<sup>3</sup>,  
С.Д.А. Казми<sup>1</sup>, Т. Назир<sup>4</sup>, В. Аршед<sup>2</sup>, Матиулла<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Department of Physics University of Azad Jammu & Kashmir, Muzaffarbad, 13100, Azad Kashmir, Pakistan

<sup>2</sup> Health Physics Division, Pakistan Institute of Nuclear Science & Engineering (PINSTECH), Nilore, Islamabad 45650, Pakistan

<sup>3</sup> Department of Medical Physics, Nuclear Medicine, Oncology and Radiotherapy Institute (NORI), Islamabad, Pakistan

<sup>4</sup> Department of Physics, Gomal University, Dera Ismail Khan, Pakistan

<sup>5</sup> Directorate of Systems & Services, PINSTECH, P.O. Nilore, Islamabad, Pakistan

В штате Азад Кашмир широко распространены породы трех типов: осадочные, метаморфические и магматические. Эти породы вмещают крупные месторождения графита, мрамора, известняка, кварцита, гранита, долерита и песчаника, которые используются в строительстве жилых домов в штате Азад Кашмир и других штатах Пакистана. Поэтому весьма желательно иметь данные о наличии естественной радиоактивности этих материалов для оценки связанной с ними радиационной опасности. В связи с этим из различных геологических формаций в округе Музаффарабад (штат Азад Кашмир, Пакистан) отобрали 30 образцов пород. После соответствующей подготовки образцов по ним была измерена удельная радиоактивность изотопов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , при этом применялся коаксиальный высокочистый германиевый детектор  $P$ -типа. Установлено, что максимальные значения мощности дозы облучения для осадочных, метаморфических и магматических пород составляют соответственно  $83.16 \pm 1.08$ ,  $135.87 \pm 1.18$  и  $115.98 \pm 1$  нГр/ч. Активность излучения в радиовом эквиваленте ( $Ra_{eq}$ ) варьирует от  $23.76 \pm 1.15$  для образца долерита (магматическая порода) до  $293.69 \pm 2.60$  Бк/кг для мрамора (метаморфическая порода). Значения  $Ra_{eq}$  для всех образцов пород оказались ниже предельного значения, указанного в отчете Организации экономического сотрудничества и развития [ОЭСД, 1979], — 370 Бк/кг, эквивалентного дозе  $\gamma$ -излучения 1.5 мЗв/г. Значения внешнего ( $H_{ex}$ ) и внутреннего индекса опасности ( $H_{in}$ ) меньше единицы. Средняя наружная и внутренняя годовая эффективная эквивалентная доза имеет величину 0.073 и 0.290 мЗв/г соответственно. Среднее значение (по образцам всех типов пород) годовой эффективной эквивалентной дозы составляет 0.36 мЗв/г.

*Естественная радиоактивность, земные радионуклиды, годовая эффективная эквивалентная доза, радоновая доза, активность излучения в радиовом эквиваленте.*

## EVALUATION OF RADIATION DOSE DUE TO NATURALLY OCCURRING RADIONUCLIDES IN ROCK SAMPLES OF DIFFERENT ORIGINS COLLECTED FROM AZAD KASHMIR (*Pakistan*)

**M. Rafique, A.R. Khan, A. Jabbar, S.U. Rahman, S.J.A. Kazmi, T. Nasir, W. Arshed, and Matiullah**

The state of Azad Kashmir is rich in three types of rocks, namely, sedimentary, metamorphic, and igneous rocks. These rocks contain extensive deposits of graphite, marble, limestone, quartzite, granite, dolerite, and sandstone, which are widely used for the construction of dwellings in Azad Kashmir and Pakistan. Therefore, knowledge about the presence of natural radioactivity in these materials is desirable to assess the radiological hazards associated with it. In this context, 30 rock samples were collected from different geologic formations of the Muzaffarabad Division, Azad Kashmir. After processing the samples, the specific activities of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  in them were measured using a  $P$ -type coaxial high-purity germanium detector. The observed highest dose rate values for sedimentary, metamorphic, and igneous rocks have been found to be  $83.16 \pm 1.08$ ,  $135.87 \pm 1.18$ , and  $115.98 \pm 1$  nGy  $\cdot$  h $^{-1}$ , respectively. The radium equivalent activity ( $Ra_{eq}$ ) varied from  $23.76 \pm 1.15$  for dolerite sample (igneous rock) to  $293.69 \pm 2.60$  Bq $\cdot$ kg $^{-1}$  for marble (metamorphic rock). The  $Ra_{eq}$  values of all rock samples are lower than the limit mentioned in the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD, 1979) report (370 Bq $\cdot$ kg $^{-1}$ , equivalent to  $\gamma$ -dose of 1.5 mSv  $\cdot$  y $^{-1}$ ). The values of external ( $H_{ex}$ ) and internal ( $H_{in}$ ) hazard indices are less than unity. The mean outdoor and indoor annual effective dose equivalents are 0.073 mSv  $\cdot$  y $^{-1}$  and 0.29 mSv  $\cdot$  y $^{-1}$ , respectively. The mean (over all types of rock samples) annual effective dose equivalent is reported as 0.36 mSv  $\cdot$  y $^{-1}$ .

*Natural radioactivity, terrestrial radionuclides, annual effective dose equivalent, radon doses, radium equivalent activity*

## ВВЕДЕНИЕ

Естественная радиация всегда присутствовала в окружающей человека среде со времени его расселения на поверхности Земли. Существуют три основных источника естественной радиации. Считается, что наиболее древним из них является космическая радиация, возникшая с рождением вселенной (около 13—14 млрд л.н.). Второй источник радиации — это первичные радионуклиды, появившиеся при рождении планеты Земля (около 4.5 млрд л.н.) и имеющие достаточно большой период полураспада, обуславливающий возможность их обнаружения совместно с дочерними элементами. Третьим источником радиации являются космогенные радионуклиды, образующиеся при взаимодействии космической радиации и атмосферных частиц [Sember, 2009]. Что касается угрозы здоровью человека, которую создает естественный радиоактивный фон от трех этих источников излучения, то наибольшую опасность представляют первичные радионуклиды. Первичное космическое излучение воздействует на человека за пределами действия магнитного поля Земли ([http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic\\_ray](http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray)). На поверхности Земли его вклад в угрозу для здоровья человека пренебрежимо мал. С другой стороны, значительная часть космогенных радионуклидов, вследствие их относительной малочисленности, не представляет никакой угрозы. Радиоактивность окружающей среды зависит от геологических факторов, главным образом горных пород и почв, распространенных на данной территории. Уровень естественной радиоактивности варьирует в широких пределах [Tzortzis, Tsertos, 2004]. В строительных материалах всегда присутствуют следовые количества радионуклидов, таких как радий-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ), торий-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) и калий-40 ( $^{40}\text{K}$ ), поэтому они являются главным источником радиации [Nageswara, 1989]. Большинство элементов, присутствующих в земной коре, содержат в следовых количествах изотопы  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$ , поэтому любой материал может являться потенциальным источником излучения радона и, следовательно, любой строительный материал, извлеченный из земной коры, потенциально может быть радиоактивным. Однако степень угрозы здоровью, создаваемой этими строительными материалами, может варьировать в зависимости от концентрации в них изотопов  $^{238}\text{U}$  и  $^{226}\text{Ra}$  [Al-Jarallah et al., 2001]. Считается, что изотоп  $^{226}\text{Ra}$  и продукты его распада вносят наибольший вклад в дозу облучения, получаемую человеком от естественных источников радиоактивного излучения. Сам по себе изотоп  $^{226}\text{Ra}$  является источником  $\alpha$ -излучения, поэтому непосредственно он не вносит вклад в  $\gamma$ -излучение окружающей среды, однако оказывает косвенное влияние на него (через продукты распада, создающие  $\gamma$ -излучение). Изотоп  $^{226}\text{Ra}$  присутствует во всех типах пород и почв в переменных количествах. Концентрации изотопа  $^{226}\text{Ra}$  в магматических породах несколько превышают его концентрации в песчаниках и известняках [Eisenbud, Gesell, 1997]. Концентрации изотопа  $^{226}\text{Ra}$  в магматических породах несколько превышают его концентрации в песчаниках и известняках [Eisenbud, Gesell, 1997]. Граниты определенных разновидностей составляют часть богатых ураном коренных пород и используются в качестве строительных материалов [Bertrand et al., 1994; Durrani, Ilic, 1997]. Гранит — это вид магматической породы, состоящей преимущественно из кварца, щелочей и полевых шпатов. Декоративные разновидности горных пород (граниты, долериты и мрамор) содержат повышенные концентрации изотопов  $^{238}\text{U}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в сравнении с другими строительными материалами и, как полагают, являются источником воздушной радиоактивности и внешней радиации, генерируемой цепочками распада урана, содержащегося в различных сооружениях [Bertrand et al., 1994; Durrani, Ilic, 1997; Al-Jarallah et al., 2001; Bilal et al., 2012].

С другой стороны, концентрации  $^{232}\text{Th}$  в обычных породах варьируют от 1.6 до 20 г/т при среднем содержании в земной коре 10.7 г/т. Хотя среднее содержание  $^{232}\text{Th}$  в коре и почвах превышает среднее содержание урана, однако величина их удельной радиоактивности свидетельствует о приблизительно равном их вкладе в радиоактивность среды.

Калий природного происхождения имеет три изотопа, из которых единственным нестабильным изотопом является  $^{40}\text{K}$ . В смеси изотопов природного калия его содержание достигает 0.0118 %. Величина  $K_{\text{nat}}$  в породах разных типов варьирует от 0.3 до 4.5 %. Концентрация изотопа  $^{40}\text{K}$  в некоторых видах базальтов и песка ниже, чем в гранитах и других базальтах [Eisenbud, Gesell, 1997].

Имея в виду важность данной темы, многие ученые проводили исследования естественной радиоактивности строительных материалов [UNSCEAR, 1993; Hizem et al., 2005; Farai, Ademola, 2005; Jabbar et al., 2010a,b; Rafique et al., 2011, 2013a,b; Rahman et al., 2011, 2013; Baloch et al., 2012; Rahman, Rafique, 2012; Qureshi et al., 2013; Rafique, 2013].

В штате Азад Кашмир распространены осадочные, метаморфические и магматические породы, часто используемые в качестве строительных материалов. Штат Азад Кашмир располагает значительными запасами гранитов, долеритов и мраморов экспортного качества, которые применяются для внутреннего оформления интерьеров, облицовки стен, изготовления мозаики для мощения дорог, столешниц для кухонных столов и т.д. Этот каменный материал добывается из земной коры.

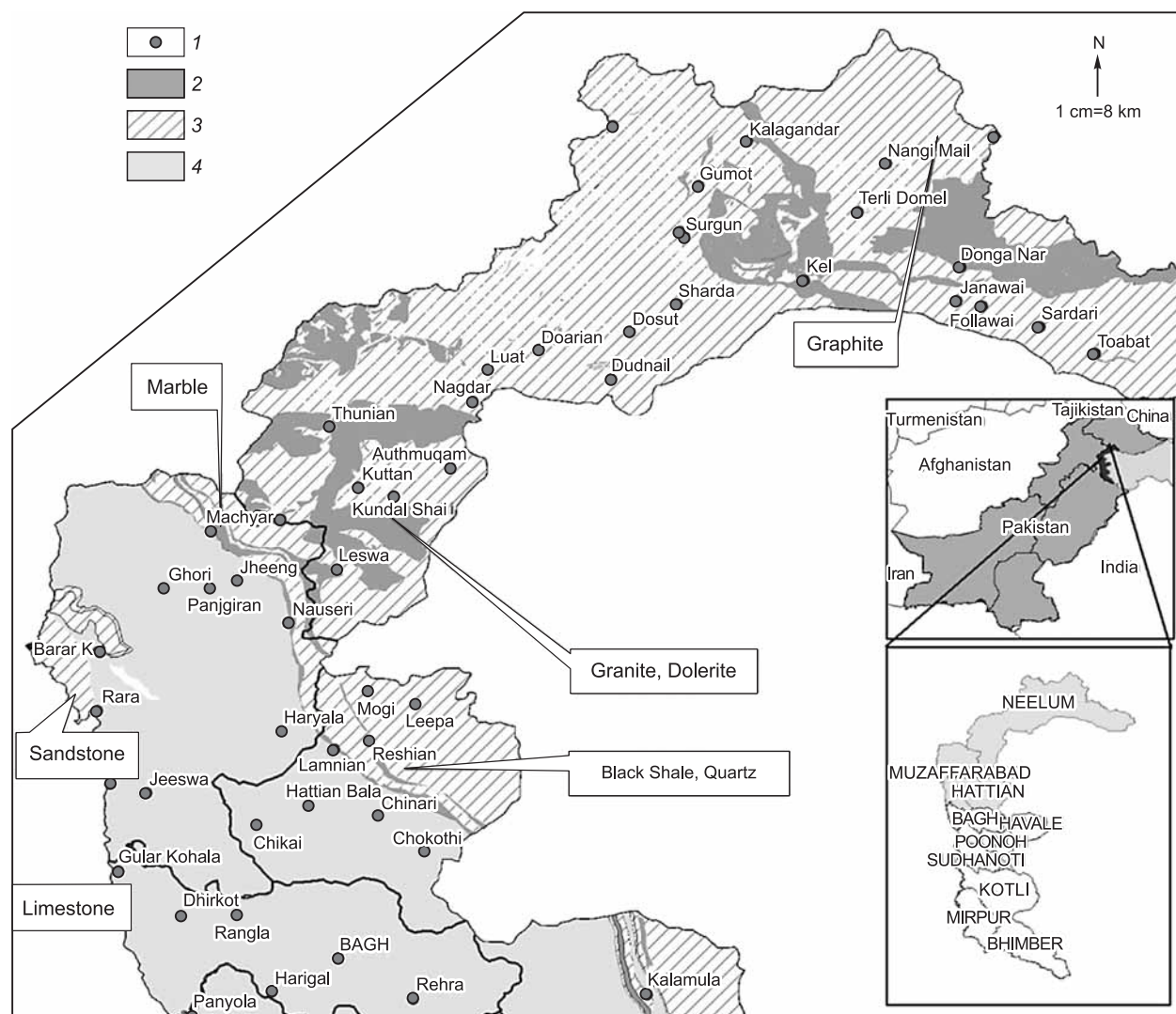
Основными задачами данного исследования являются: определение объемной активности природных генерирующих гамма-излучение радионуклидов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$  в осадочных, метаморфических

ких и магматических породах; расчет соответствующих индексов радиационной опасности, таких как мощность поглощенной дозы излучения, годовая эффективная доза излучения, индекс опасности и индекс представительного уровня.

### КОЛЛЕКЦИЯ ОБРАЗЦОВ

Для радиометрического анализа было отобрано 30 образцов пород различного происхождения. Эти образцы представляют осадочные, метаморфические и магматические породы исследуемого района. Их распределение на изученной площади показано на рис. 1. Полное описание образцов, а также места их отбора (табл. 1) приведено ниже.

**Графит** с химической точки зрения представляет собой форму углерода, который кристаллизуется в гексагональной системе. Обычно он встречается в виде рассланцованных листоватых, зернистых и уплотненных агрегатов. Он имеет твердость от 1 до 2, удельную плотность от 2.0 до 2.3, а цвет варьирует от черного до темного стально-серого. В долине Шоунтар около г. Кель открыты скарные месторождения графита и месторождения грубокристаллического графита в метаморфических породах. Месторождения аморфного графита располагаются в той же долине около участков Терли Домел и Багнували Сери. Кристаллический графит (с содержанием графитистого вещества более 90 %) широко используется при производстве огнеупорных тиглей, смазочных материалов, атомных реакторов, электродов, красок, а также в производстве облицовочных материалов.



**Рис. 1. Геологическая карта, показывающая распределение пород разных типов на площади исследования.**

1 — местоположение, 2—4 — породы: 2 — магматические, 3 — метаморфические, 4 — осадочные.

Таблица 1. Описание образцов, использованных для гамма-спектроскопического анализа

| № п/п | № образца | Семейство             | Местоположение            |
|-------|-----------|-----------------------|---------------------------|
| 1     | ID-1      | Долерит               | Трахан Баик, Джугиан Нала |
| 2     | ID-2      | »                     | »                         |
| 3     | ID-3      | »                     | Башнай Ниилум             |
| 4     | ID-4      | Зеленый долерит       | Хаиргам                   |
| 5     | IG-1      | Гранит                | Сарсангр Гали             |
| 6     | IG-3      | Серый гранит          | Керан                     |
| 7     | IG-4      | Гранитогнейс          | »                         |
| 8     | IG-5      | »                     | »                         |
| 9     | SED       | Сланец                | Таобат                    |
| 10    | SLS-1     | Известняк             | хр. Кохала                |
| 11    | SLS-2     | »                     | »                         |
| 12    | SLS-3     | »                     | »                         |
| 13    | SS-4      | Песчаник              | Чехла                     |
| 14    | SS-6      | »                     | Тори Ловер Чаттер         |
| 15    | SS-5      | »                     | Рарра Музаффарабад        |
| 16    | SRS-1     | Красный сланец        | хр. Кохала                |
| 17    | SRS-2     | »                     | »                         |
| 18    | MDS-1     | Черный сланец         | Гайл (Джелум Вэлли)       |
| 19    | MS-1      | Аспидный сланец       | Амбор                     |
| 20    | MBS-2     | Черный сланец         | Джабра (Джелум Вэлли)     |
| 21    | MG-1      | Графит                | Шоунтар Гали              |
| 22    | MG-2      | »                     | »                         |
| 23    | MM-2      | Мрамор                | Чогали                    |
| 24    | MM-3      | »                     | »                         |
| 25    | MM-4      | »                     | г. Кель                   |
| 26    | MMA-1     | »                     | Таобут                    |
| 27    | MMM-2     | »                     | Сэйм                      |
| 28    | MQM-1     | Кварц-слюда           | Чамм                      |
| 29    | MC-1      | Известковистый сланец | г. Кель                   |
| 30    | MQV-1     | Кварц                 | Чамм                      |

Примечание. Тип породы: 1—8 — магматическая; 9 — осадочная, метаморфическая, 10—22 — осадочная; 23—30 — метаморфическая.

использовать при производстве динасового огнеупора и наждачной бумаги, в различных металлургических операциях, в качестве флюсовой присадки к извести или глинозему. Чистые разновидности кварцитов применяют при производстве стекла.

**Гранит и долерит.** Северо-восточная часть Кашмира богата значительными запасами гранитов и ассоциирующих с ними пород, например, долеритов. Гранитные породы встречаются в поясе длиной до 100 км и покрывают площадь около 1500 км<sup>2</sup>. Породы имеют разнообразную структуру и серый цвет. На данной площади широко распространены серые разновидности гранита. В пределах этого гранитного террейна спорадически встречаются серии долеритовых даек и силлов черного и зеленого цвета. Дайки и силлы обычно имеют мощность от 10 до 50 м, выходят на поверхность в виде единичных тел или скоплений даек в местах, где в приповерхностных горизонтах скапливаются крупные массы магматических пород.

**Месторождения мрамора.** С коммерческой точки зрения любая известковистая и/или доломитовая порода, поддающаяся полированию и пригодная для использования в качестве декоративного и строительного материала, называется мрамором. Ее твердость варьирует от 3.5 до 4.0, а удельный вес равняется 2.9. Эта порода имеет множество привлекательных цветов и оттенков, например, зеленый, бордовый, различные оттенки серого, черного и белого. Известные и эксплуатирующиеся в настоящее время месторождения мрамора сосредоточены в поясе, протягивающемся на 17 км от пос. Нозери до пос. Мачара, и залегают в метаморфических породах округа Музаффарабад. К месторождениям мрамора в округе Музаффарабад проложены мощные щебнем дороги длиной от 30 до 50 км, на которых последние 10—15 км представлены грунтовыми необсыпными дорогами на участках Музаффарабад—Джугиан, Музаффарабад—Лесва—Байпас и Музаффарабад—Атмугам. Мрамор применяется в качестве декоративного камня для облицовки экстерьера и интерьера зданий, а также для изготовления колонн, арок, парапетов, ступеней, подоконников, стен, надгробий, мавзолеев, скульптур и мелких украшений, например, крышек столов, подставок для книг, цоколей ламп и т. д.

**Известняк (основной материал цемента)** по составу является карбонатом кальция (CaCO<sub>3</sub>), имеет твердость 3 и удельный вес 2.71. В его составе могут присутствовать небольшие количества магния, железа и марганца. Цвет породы — белый, серый или черный. Крупные месторождения крупнозернистого серовато-черного известняка встречаются около населенных пунктов Ядгар-Батманг и Кохала. Известняк можно использовать в качестве сырья для производства портланд-цемента, также его применяют в производстве белил для окрашивания стен и в качестве заполнителя бетона в строительной отрасли.

**Месторождения кварцитов.** По химическому составу это оксид кремния, который при слабом метаморфизме преобразуется в кварцит. Кварцит — очень твердая порода с твердостью 7 и удельной плотностью 2.7. Порода бесцветная, если не содержит примесей, но обычно имеет различные оттенки серого цвета. Жилы кварцита залегают в метаморфических и магматических породах вблизи пос. Решан-Хамн в округе Хатгьян. Кварцит можно



**Песчаники** выходят на поверхность в муррийской свите наряду с пластами буровато-красных глин и сланцев с перемежающимися пачками бурых, серых песчаников и известняков. Песчаники используются при строительстве домов, а также как декоративный и строительный камень.

## ОБРАБОТКА ОБРАЗЦОВ

Метод подготовки образцов состоит из нескольких шагов, которые выполняются для получения требуемых характеристик. На первом шаге уменьшают размер зерен образца породы с целью получения однородного размера пор для обеспечения максимального и постоянного уровня радиации образца, поступающей в детектор. По этой причине все образцы дробят до порошкообразного состояния. Затем их высушивают на солнце и нагревают в печи с выдержкой от 4 до 6 ч при постоянной температуре 110 °С. Процедура нагревания образцов в термической печи выполняется с целью удаления влаги из них. При такой обработке плотность и вес образца становятся постоянными.

После выполнения термической обработки образцы пропускают через сито с размером ячеек 1 мм. 30 навесок гомогенизированных образцов весом по 200 г помещают в пластиковые контейнеры [Khan et al., 2002], после чего последние герметически закрывают на 28 сут для установления минимального долгосрочного равновесия между продуктами распада изотопов  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Срок, равный семикратному периоду распада  $^{222}\text{Rn}$  ( $t_{1/2} = 3.82$  сут), обычно считают достаточным для достижения равновесия [Sember, 1996]. После выдержки в 28 сут эти образцы используют для проведения гамма-спектроскопического анализа.

**Гамма-спектрометрический анализ.** Радиометрический анализ термически обработанных образцов проводили с помощью гамма-спектрометрической системы [Gilmore, Hemingway, 2008]. Измерительная система состояла из высокочистого германиевого (HPGe) коаксиального детектора (производство Canberra Industries Inc., США) и МСА, управляемого ПК. Охлаждение осуществляется жидким азотом, активный объем равен 180 см<sup>3</sup>, система оснащена бериллиевым торцевым окном. Относительная эффективность HPGe детектора составляет 30 % по отношению к NaI(Tl) детектору, а энергетическая разрешающая способность составляет 2.0 кэВ (ПШПМИ) для интенсивности гамма-излучения 1332 кэВ от  $^{60}\text{Co}$  источника излучения.

С целью снижения фоновых эффектов детектор экранирован трубкой шириной 15 см, имеющей внутренние прокладки из меди толщиной 3 мм и олова толщиной 4 мм. Внутренний размер экранированной полости составляет 15 × 15 см<sup>2</sup> [Heusser et al., 1989; Westmeier et al., 1992].

Калибровка системы выполнялась с помощью стандарта soil-326 МАГАТЭ, а надежность эффективности счета подтверждена с использованием стандарта soil-375. Подсчет излучения производился в течение  $6.5 \times 10^4$  с, а спектральный анализ выполнялся на специализированном ПО GENIE-2k, полученном из г. Канберра, США.

Для радионуклидов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  величина минимально обнаруживаемой активности (MDA) определялась с использованием следующего уравнения.

$$\text{MDA} = \frac{4.66\sqrt{\text{Continuum Counts} + \text{Back Ground Peak Counts}}}{\text{Live time(s)} \times \text{Efficiency} \times \text{Yield} \times \text{Sample Mass (kg)}}, \quad (1)$$

где MDA измеряется в Бк/кг, а 4.66 — статистический коэффициент охвата. Рассчитанная величина MDA для радионуклидов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  составляет 2.25, 3.60, 1.35 и 6.70 Бк·кг<sup>-1</sup> соответственно.

Концентрация удельной радиоактивности (энергия, излучаемая единицей массы) для  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  рассчитывалась по соотношению [Fredj et al., 2005]

$$A_s = \frac{(C_s - C_B)}{t \times E_\gamma \times P_\gamma},$$

где  $C_s$  — чистое число пиков для образца;  $C_B$  — фон детектора,  $E_\gamma$  и  $P_\gamma$  — эффективность детектирования и вероятность эмиссии  $\gamma$ -луча,  $t$  — время облучения детектора образцом, т.е. время счета.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как было отмечено выше, для радиометрического анализа были отобраны 30 образцов осадочных, метаморфических и магматических пород. Результаты гамма-спектрометрического анализа приведены в табл. 2, из которой видно, что объемная активность изотопа  $^{226}\text{Ra}$  варьирует от  $4.63 \pm 0.19$  Бк/кг для обр. ID-2 до  $108.54 \pm 0.65$  Бк/кг для обр. IG-4. Обр. ID-2 относится к магматическим породам семейства долеритов с участка Трахан Баик. Обнажения подобных пород также встречаются на участке

Таблица 2. Уровни радиоактивности  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$  в образцах пород различного генезиса, отобранных в округе Музаффарабад, штат Азад Кашмир (Бк/кг)

| № п/п | № образца        | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{137}\text{Cs}$ | $^{40}\text{K}$ |
|-------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1     | ID-1             | 5.9 ± 0.20        | 8.96 ± 0.49       | ≤ 0.62*           | 121.13 ± 3.78   |
| 2     | ID-2             | 4.63 ± 0.19       | 6.59 ± 0.47       | ≤ 0.62            | 126.01 ± 3.78   |
| 3     | ID-3             | 5.31 ± 0.20       | 9.04 ± 0.52       | ≤ 0.62            | 130.19 ± 3.98   |
| 4     | ID-4             | 7.33 ± 0.19       | 7.39 ± 0.44       | ≤ 0.62            | 95.14 ± 3.37    |
| 5     | IG-1             | 92.71 ± 0.52      | 29.19 ± 0.64      | ≤ 0.62            | 1117.24 ± 6.56  |
| 6     | IG-3             | 40.39 ± 0.36      | 91.55 ± 0.94      | ≤ 0.62            | 1007.80 ± 6.31  |
| 7     | IG-4             | 108.54 ± 0.65     | 24.79 ± 0.77      | ≤ 0.62            | 1135.55 ± 7.96  |
| 8     | IG-5             | 15.14 ± 0.27      | 8.94 ± 0.54       | ≤ 0.62            | 53.44 ± 3.85    |
| 9     | SED              | 35.52 ± 0.50      | 55.60 ± 1.18      | ≤ 0.62            | 437.61 ± 7.78   |
| 10    | SLS-1            | 18.06 ± 0.28      | 28.73 ± 0.65      | ≤ 0.62            | 224.14 ± 4.31   |
| 11    | SLS-2            | 25.38 ± 0.31      | 32.38 ± 0.68      | ≤ 0.62            | 251.31 ± 4.51   |
| 12    | SLS-3            | 23.19 ± 0.29      | 31.66 ± 0.68      | ≤ 0.62            | 236.71 ± 4.46   |
| 13    | SS-4             | 45.19 ± 0.40      | 68.89 ± 0.90      | ≤ 0.62            | 449.22 ± 5.28   |
| 14    | SS-6             | 40.68 ± 0.44      | 64.45 ± 1.00      | ≤ 0.62            | 609.93 ± 6.61   |
| 15    | SS-5             | 41.40 ± 0.38      | 65.49 ± 0.86      | ≤ 0.62            | 439.48 ± 5.09   |
| 16    | SRS-1            | 20.83 ± 0.35      | 33.98 ± 0.84      | ≤ 0.62            | 246.03 ± 5.58   |
| 17    | SRS-2            | 32.05 ± 0.35      | 54.97 ± 0.84      | ≤ 0.62            | 537.50 ± 5.58   |
| 18    | MDS-1            | 68.20 ± 0.51      | 35.94 ± 0.80      | ≤ 0.62            | 381.33 ± 7.01   |
| 19    | MS-1             | 37.28 ± 0.39      | 65.01 ± 0.92      | ≤ 0.62            | 879.78 ± 6.74   |
| 20    | MBS-2            | 7.52 ± 0.24       | 31.74 ± 0.72      | ≤ 0.62            | 428.66 ± 5.35   |
| 21    | MG-1             | 12.67 ± 0.23      | 2.53 ± 0.41       | ≤ 0.62            | 56.17 ± 3.31    |
| 22    | MG-2             | 100.26 ± 0.55     | 24.13 ± 0.64      | ≤ 0.62            | 925.30 ± 6.35   |
| 23    | MM-2             | 22.48 ± 0.30      | 2.22 ± 0.47       | ≤ 0.62            | 15.67 ± 3.64    |
| 24    | MM-3             | 5.35 ± 0.20       | ≤ 1.80            | ≤ 0.62            | 9.55 ± 3.50     |
| 25    | MM-4             | 95.17 ± 0.55      | 9.72 ± 0.55       | ≤ 0.62            | 655.73 ± 5.77   |
| 26    | MMA-1            | 54.14 ± 0.45      | 110.73 ± 1.12     | ≤ 0.62            | 1054.65 ± 7.15  |
| 27    | MMM-2            | 40.55 ± 0.41      | 64.03 ± 0.95      | ≤ 0.62            | 812.16 ± 6.78   |
| 28    | MQM-1            | 39.55 ± 0.41      | 49.51 ± 0.86      | ≤ 0.62            | 770.74 ± 6.63   |
| 29    | MC-1             | 21.95 ± 0.29      | 28.12 ± 0.64      | ≤ 0.62            | 201.60 ± 4.19   |
| 30    | MQV-1            | 52.35 ± 0.41      | 72.40 ± 0.87      | ≤ 0.62            | 558.94 ± 5.30   |
|       | Среднее значение | 37.32 ± 0.38      | 38.57 ± 0.74      | ≤ 0.62            | 465.62 ± 5.35   |

\* Минимально обнаруживаемая активность.

Джуган Нала в долине р. Ниилум (см. табл. 1). Максимальная концентрация  $^{226}\text{Ra}$  обнаружена в обр. IG-4, который также является представителем магматических пород семейства гранитогнейсов.

С другой стороны, объемная радиоактивность радионуклида  $^{232}\text{Th}$  варьирует от ≤ 1.80 Бк/кг (MDA) для обр. MM-3 до 110.73 ± 1.12 Бк/кг для обр. MMA-1. Минимальное значение объемной радиоактивности изотопа  $^{232}\text{Th}$  установлено для образца метаморфических пород (MM-3) семейства мраморов. Он отобран с участка Чогали (долина р. Ниилум), тогда как максимальное значение объемной радиоактивности  $^{232}\text{Th}$  установлено по другому образцу метаморфических пород (MMA-1), взятому с участка Таобут (долина р. Ниилум).

Схожим образом величина объемной радиоактивности  $^{40}\text{K}$  варьирует от 9.55 ± 3.50 Бк/кг для обр. MM-3 до 1135.55 ± 7.96 Бк/кг для обр. IG-4. Минимальное значение активности  $^{40}\text{K}$  установлено для образца метаморфической породы семейства мраморов (MM-3), а максимальная объемная радиоактивность зафиксирована для обр. IG-4. Этот образец является представителем магматических пород семейства гранитогнейсов и был отобран с участка Керан. Объемная радиоактивность изотопа  $^{137}\text{Cs}$  для всех образцов оставалась ниже нижнего предела обнаружения системы (≤ 0.62 Бк/кг).

Средние значения объемной радиоактивности изотопов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  составляют 37.32 ± 0.38, 38.57 ± 0.74 и 465.62 ± 5.35 Бк/кг соответственно. Значения объемной радиоактивности  $^{137}\text{Cs}$  всех исследованных образцов пород оказались ниже предела обнаружения.

Таблица 3.

**Формулы для оценки индексов опасности по массовой концентрации радиоактивности образцов пород различного генезиса**

| Индекс опасности, формула   | Примечание, характеристика   | Литературный источник                      |
|---|--|--|
| Активность в радиовом эквиваленте ( $Ra_{eq}$ ),<br>$Ra_{eq} = A_{Ra} + (1.43 \cdot A_{Th}) + (0.077 \cdot A_K)$              | Для ограничения уровня дозы внешнего облучения ( $D$ ) 1.5 мГр/г должен быть соблюден следующий критерий — $Ra_{eq} \leq 370$ Бк/кг  | [Beretka, Matthew, 1985]                   |
| Индекс опасности внешнего облучения ( $H_{ex}$ ),<br>$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810}$    | $H_{ex} \leq 1$ , $Ra_{eq} \leq 370$ Бк/кг<br>$D \leq 1.5$ мГр/ч   | »  |
| Индекс опасности внутреннего облучения ( $H_{in}$ ),<br>$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810}$ | Значение индекса должно быть меньше единицы для того, чтобы опасность радиоактивного облучения считалась пренебрежимо малой,<br>$Ra_{eq} \leq 370$ Бк/кг,<br>$D \leq 1.5$ мГр/ч  | [Beretka, Matthew, 1985]                   |
| Индекс гамма-излучения ( $I_\gamma$ ),<br>$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000}$             | Для материала по валу<br>$I_\gamma \leq 0.5 \Rightarrow D \leq 0.3$ мЗв/г,<br>$I_\gamma \leq 1.0 \Rightarrow D \leq 1.0$ мЗв/г<br>Для материалов ограниченного применения (кровельные материалы и т.д.)<br>$I_\gamma \leq 2 \Rightarrow D \leq 0.3$ мЗв/г,<br>$I_\gamma \leq 6 \Rightarrow D \leq 1.0$ мЗв/г | [EC, 1999; Righi, Bruzzi, 2006]            |
| Индекс альфа-излучения ( $I_\alpha$ ),<br>$I_\alpha = \frac{A_{Ra}}{200}$   | Уровень изъятия 100 Бк/кг<br>Рекомендованное значение верхнего предела 200 Бк/кг   | [Xinwei et al., 2006; Righi, Bruzzi, 2006] |

Примечание.  $A_K$ ,  $A_{Ra}$  и  $A_{Th}$  представляют объемные активности  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  (Бк/кг) соответственно.

Таблица 4. Математические выражения для мощности дозы облучения, годовой эффективной дозы, наружной и внутренней годовой эффективной дозы облучения

| Индекс опасности, формула   | Примечание, характеристика  | Литературный источник                  |
|---|---|--|
| Абсорбированная воздухом мощность дозы гамма-излучения (нГр/ч),<br>$D = (0.0417 \times A_K) + (0.462 \times A_{Ra}) + (0.604 \times A_{Th})$<br>Годовая эффективная доза (мЗв/г), $E = Q \times T \times O \times D \times 10^{-6}$<br>Для работающих в помещениях годовая эффективная эквивалентная доза $E_{in} = 0,7 \times 8760 \times 0,8 \times D \times 10^{-6}$<br>Для работающих вне помещений годовая эффективная эквивалентная доза $E_{out} = 0,7 \times 8760 \times 0,2 \times D \times 10^{-6}$ | Предполагается, что все продукты распада $^{226}\text{Ra}$ и $^{232}\text{Th}$ находятся в радиоактивном равновесии с материнскими изотопами<br>$t$ — количество часов в году (8760 ч), $\dot{D}$ — мощность дозы излучения (нГр/ч) и $O$ — коэффициент занятости при работе вне помещений (0.2) и в помещениях (0.8) | [UNSCEAR, 2000]<br><br>[UNSCEAR, 1988] |

Заметно повышенный уровень радиоактивности изотопа  $^{226}\text{Ra}$ , установленный для обр. IG-4 (гранитогайсы), может быть связан с его природным минералогическим составом. С минералогической точки зрения гранитогайсы образовались главным образом благодаря взаимному прорастанию кварца, плагиоклаза, калиевого полевого шпата, биотита, мусковита, серицита и хлорита.

**Оценка степени радиационной опасности.** Поскольку концентрация радионуклидов в различных материалах в разных регионах мира варьирует, естественная радиоактивность, обусловленная радионуклидами  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ , определяется в терминах активности излучения в радиовом эквиваленте ( $^{226}\text{Ra}$ ). Радиационная опасность, связанная с образцами пород разных типов, была рассчитана с использованием измеренных значений концентрации удельной радиоактивности  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ . Все формулы, применяемые для расчетов радиационной опасности, приведены в табл. 3, 4.

Активность внешнего и внутреннего облучения в радиовом эквиваленте, индексы опасности гамма- и альфа-излучения для образцов пород разного генезиса рассчитаны с использованием математических моделей, представленных уравнениями. Измеренные значения вышеупомянутых параметров приведены в табл. 3, 4. Из табл. 5 видно, что значения активности  $^{226}\text{Ra}_{eq}$ , измеренные по образцам различных пород, варьируют от  $20.61 \pm 1.07$  Бк/кг для обр. МГ-1 до  $293.69 \pm 2.60$  Бк/кг для обр. ММА-1. Среднее значение активности  $^{226}\text{Ra}_{eq}$  по всем образцам составляет  $126.30 \pm 1.79$  Бк/кг. Величина опасности внешнего облучения варьирует от  $5.57 \cdot 10^{-2}$  до  $79.31 \cdot 10^{-2}$ . Минимальное значение  $H_{ex}$  установлено для

Таблица 5. Активность в радиовом эквиваленте, индексы опасности внешнего, внутреннего облучения, индексы опасности гамма- и альфа-облучения для образцов пород различного генезиса

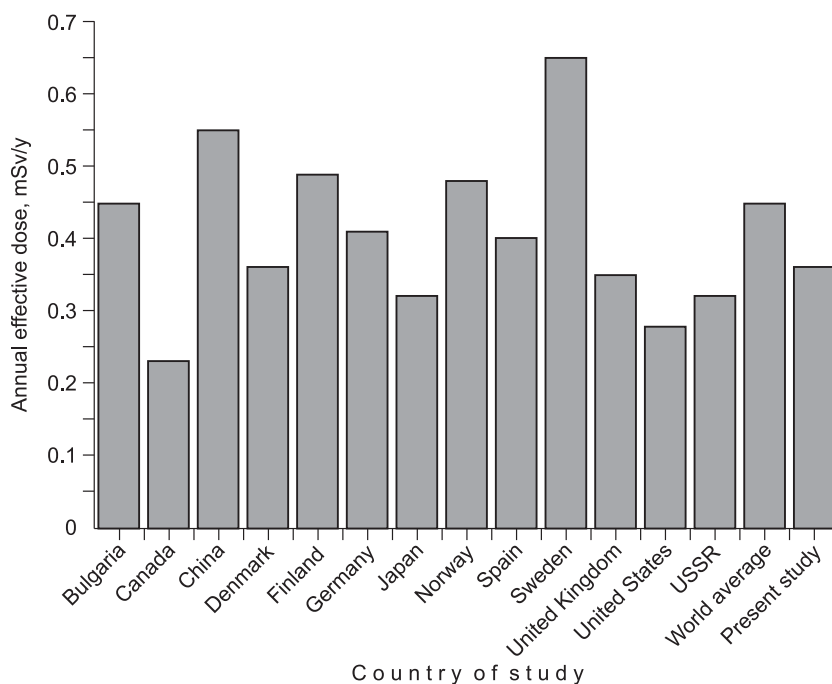
| № п/п            | № образца | Активность в радиовом эквиваленте, Бк/кг | Опасность внешнего облучения, $\times 10^{-2}$ | Опасность внутреннего облучения, $\times 10^{-2}$ | Индекс гамма-облучения, $\times 10^{-2}$ | Индекс опасности альфа-облучения, $\times 10^{-2}$ |
|------------------|-----------|--|--|---|--|--|
| 1                | ID-1      | 28.04 ± 1.19                             | 7.57 ± 0.3                                     | 9.17 ± 0.38                                       | 10.48 ± 0.44                             | 2.95 ± 0.1   |
| 2                | ID-2      | 23.76 ± 1.15                             | 6.42 ± 0.3                                     | 7.67 ± 0.36                                       | 9.04 ± 0.42                              | 2.32 ± 0.1   |
| 3                | ID-3      | 28.26 ± 1.25                             | 7.63 ± 0.3                                     | 9.07 ± 0.39                                       | 10.63 ± 0.46                             | 2.66 ± 0.1   |
| 4                | ID-4      | 25.22 ± 1.08                             | 6.81 ± 0.3                                     | 8.79 ± 0.34                                       | 9.31 ± 0.4                               | 3.67 ± 0.1   |
| 5                | IG-1      | 220.48 ± 1.94                            | 59.55 ± 0.5                                    | 84.61 ± 0.66                                      | 82.74 ± 0.71                             | 46.36 ± 0.26                                       |
| 6                | IG-3      | 248.91 ± 2.19                            | 67.22 ± 0.6                                    | 78.13 ± 0.69                                      | 92.83 ± 0.8                              | 20.2 ± 0.18  |
| 7                | IG-4      | 231.43 ± 2.36                            | 62.51 ± 0.6                                    | 91.85 ± 0.81                                      | 86.43 ± 0.87                             | 54.27 ± 0.33                                       |
| 8                | IG-5      | 32.04 ± 1.34                             | 8.65 ± 0.4                                     | 12.75 ± 0.43                                      | 11.3 ± 0.49                              | 7.57 ± 0.14  |
| 9                | SED       | 148.72 ± 2.79                            | 40.17 ± 0.8                                    | 49.76 ± 0.89                                      | 54.23 ± 1.02                             | 17.76 ± 0.25                                       |
| 10               | SLS-1     | 76.40 ± 1.54                             | 20.63 ± 0.4                                    | 25.51 ± 0.49                                      | 27.86 ± 0.56                             | 9.03 ± 0.14  |
| 11               | SLS-2     | 91.03 ± 1.63                             | 24.59 ± 0.4                                    | 31.44 ± 0.52                                      | 33.03 ± 0.59                             | 12.69 ± 0.16                                       |
| 12               | SLS-3     | 86.69 ± 1.61                             | 23.41 ± 0.4                                    | 29.68 ± 0.51                                      | 31.45 ± 0.59                             | 11.6 ± 0.15  |
| 13               | SS-4      | 178.29 ± 2.09                            | 48.15 ± 0.6                                    | 60.36 ± 0.67                                      | 64.48 ± 0.76                             | 22.6 ± 0.2   |
| 14               | SS-6      | 179.81 ± 2.38                            | 48.56 ± 0.6                                    | 59.55 ± 0.76                                      | 66.12 ± 0.87                             | 20.34 ± 0.22                                       |
| 15               | SS-5      | 168.89 ± 2.00                            | 45.61 ± 0.5                                    | 56.80 ± 0.64                                      | 61.19 ± 0.73                             | 20.7 ± 0.19  |
| 16               | SRS-1     | 88.37 ± 1.98                             | 23.86 ± 0.5                                    | 29.49 ± 0.63                                      | 32.13 ± 0.72                             | 10.42 ± 0.18                                       |
| 17               | SRS-2     | 152.04 ± 1.98                            | 41.06 ± 0.5                                    | 49.72 ± 0.63                                      | 56.09 ± 0.72                             | 16.03 ± 0.18                                       |
| 18               | MDS-1     | 148.95 ± 2.19                            | 40.24 ± 0.6                                    | 58.67 ± 0.73                                      | 53.41 ± 0.8                              | 34.1 ± 0.26  |
| 19               | MS-1      | 197.99 ± 2.22                            | 53.47 ± 0.6                                    | 63.54 ± 0.71                                      | 74.26 ± 0.81                             | 18.64 ± 0.2  |
| 20               | MBS-2     | 85.92 ± 1.68                             | 23.20 ± 0.5                                    | 25.23 ± 0.52                                      | 32.67 ± 0.62                             | 3.76 ± 0.12  |
| 21               | MG-1      | 20.61 ± 1.07                             | 5.57 ± 0.3                                     | 8.99 ± 0.35                                       | 7.36 ± 0.39                              | 6.34 ± 0.12  |
| 22               | MG-2      | 206.01 ± 1.95                            | 55.65 ± 0.5                                    | 82.75 ± 0.68                                      | 76.33 ± 0.72                             | 50.13 ± 0.28                                       |
| 23               | MM-2      | 26.86 ± 1.25                             | 7.26 ± 0.3                                     | 13.33 ± 0.42                                      | 9.13 ± 0.46                              | 11.24 ± 0.15                                       |
| 24               | MM-3      | Не опр.                                  | Не опр.  | Не опр.   | Не опр.                                  | Не опр.  |
| 25               | MM-4      | 159.56 ± 1.78                            | 43.11 ± 0.5                                    | 68.83 ± 0.63                                      | 58.44 ± 0.65                             | 47.59 ± 0.28                                       |
| 26               | MMA-1     | 293.69 ± 2.60                            | 79.31 ± 0.7                                    | 93.94 ± 0.82                                      | 108.57 ± 0.95                            | 27.07 ± 0.23                                       |
| 27               | MMM-2     | 194.65 ± 2.29                            | 52.57 ± 0.6                                    | 63.53 ± 0.73                                      | 72.6 ± 0.84                              | 20.28 ± 0.21                                       |
| 28               | MQM-1     | 169.70 ± 2.15                            | 45.83 ± 0.6                                    | 56.52 ± 0.69                                      | 63.63 ± 0.79                             | 19.78 ± 0.21                                       |
| 29               | MC-1      | 77.68 ± 1.53                             | 20.98 ± 0.4                                    | 26.91 ± 0.49                                      | 28.1 ± 0.56                              | 10.98 ± 0.15                                       |
| 30               | MQV-1     | 198.92 ± 2.06                            | 53.72 ± 0.6                                    | 67.87 ± 0.67                                      | 72.28 ± 0.75                             | 26.18 ± 0.21                                       |
| Среднее значение |           | 126.30 ± 1.79                            | 34.11 ± 0.5                                    | 44.15 ± 0.59                                      | 46.54 ± 0.67                             | 18.66 ± 0.18                                       |

обр. MG-1, а максимальное — для обр. MMA-1. Величина опасности внутреннего облучения также была рассчитана и варьирует от  $7.76 \cdot 10^{-2}$  до  $93.94 \cdot 10^{-2}$ . Минимальное значение  $H_{in}$  определено для обр. ID-2, а максимальное — для обр. MMA-1. Поскольку измеренные значения  $H_{ex}$  и  $H_{in}$  меньше единицы, проанализированные материалы безопасны для использования в строительстве жилых и производственных помещений. Также была рассчитана величина индексов опасности гамма- и альфа-излучения. Величина гамма-индекса для образцов различных пород варьирует от  $7.36 \cdot 10^{-2}$  до  $108.57 \cdot 10^{-2}$ . Минимальное значение  $I_\gamma$  установлено для обр. MG-1, а максимальное — для обр. MMA-1.

Величины объемной активности, полученные для  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ , были использованы для расчетов мощности дозы излучения, годовой эффективной дозы излучения, годовой наружной и внутренней эффективной дозы излучения (табл. 6). Наиболее важным параметром, относящимся к естественной радиоактивности строительных материалов, является доза радиации, которую получают люди, живущие внутри или снаружи жилых строений, что является прямой задачей здравоохранения.

Оцененные значения мощности дозы облучения варьируют от 9.72 до 135.87 нГр/ч. Минимальное значение мощности дозы облучения установлено для обр. MG-1, а максимальное значение — для обр. MMA-1. Среднее значение мощности дозы облучения составляет 59.09 нГр/ч. Установлено, что величина годовой эффективной эквивалентной дозы ( $E$ ) варьирует от  $5.96 \cdot 10^{-2}$  до  $83.32 \cdot 10^{-2}$  мЗв/г. Ми-





**Рис. 2. Сравнение полученного в данном исследовании среднего значения годовой эффективной наземной дозы гамма-излучения с данными, приведенными для других стран.**

нимальное и максимальное значения  $E$  установлены для образцов MG-1 и MMA-1. Измеренное среднее значение  $E$  составляет 36.23 мЗв/г.

Из табл. 6 видно, что значения годовой эффективной дозы согласуются с соответствующими среднемировыми значениями, приведенными в документе [UNSCEAR, 2000]. По суммарным результатам данного исследования можно сделать вывод о том, что строительные материалы, используемые для строительства зданий на территории столичного штата Музаффарабад, не представляют радиационной опасности.

Аналогичным образом установлено, что значения наружной ( $E_{out}$ ) и внутренней годовой эффективной дозы облучения ( $E_{in}$ ) варьируют (от 1.19 до 16.66)  $\cdot 10^{-2}$  мЗв/г и (от 4.77 до 66.65)  $\cdot 10^{-2}$  мЗв/г соответственно. Минимальные значения  $E_{out}$  и  $E_{in}$  установлены по одному и тому же обр. MG-1. Максимальные значения  $E_{out}$  и  $E_{in}$  определены по обр. MMA-1. Средние значения  $E_{out}$  и  $E_{in}$  составляют 7.25 и 28.99 мЗв/г соответственно.

Сравнение полученных в этом исследовании результатов с имеющимися оценками доз гамма-излучения для других стран мира показывает, что (см. рис. 2) значения мощности дозы гамма-излучения из настоящей работы превышают соответствующие значения, приведенные для Японии (0.32 мЗв/г), России (0.32 мЗв/г), Соединенных Штатов Америки (0.28 мЗв/г), Великобритании (0.35 мЗв/г) и Канады (0.23 мЗв/г), и меньше значений, указанных для Болгарии (0.45 мЗв/г), Китая (0.55 мЗв/г), Финляндии (0.49 мЗв/г), Германии (0.41 мЗв/г), Норвегии (0.49 мЗв/г), Испании (0.4 мЗв/г) и Швеции (0.65 мЗв/г).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования естественной радиоактивности и результирующей мощности гамма-излучения пород различных типов в исследовательской установке был применен германиевый детектор высокой степени чистоты (HPGe). В данной работе при помощи HPGe детектора на предмет гамма-радиоактивности были изучены образцы осадочных, метаморфических и магматических пород. Средняя мощность поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе составила  $59.09 \pm 0.84$  нГр/ч. Рассчитанное значение годовой эффективной дозы гамма-излучения для всех исследованных типов пород составило  $0.36 \pm \pm 0.0051$  мЗв/г. Это значение значительно ниже среднемирового взвешенного по населению значения, равного 0.45 мЗв/г. Результаты показывают, что значения  $H_{ex}$  для всех образцов пород ниже предельного значения 1. Это означает, что величина дозы излучения ниже допустимого уровня в 1 мЗв/г, рекомендованного [International..., 1993]. Полученные значения параметров радиационной опасности не превышают среднемировых и рекомендованных значений, поэтому не могут свидетельствовать о дополни-

Таблица 6. Мощность дозы облучения, годовая эффективная доза облучения, наружная и внутренняя годовая эффективная доза облучения, генерируемого образцами пород различного генезиса

| № п/п            | № образца | Мощность дозы облучения, нГр/ч | Годовая эффективная эквивалентная доза, мЗв/г × 10 <sup>-2</sup> | Наружная средняя годовая эффективная доза, мЗв/г × 10 <sup>-2</sup> | Внутренняя средняя годовая эффективная доза, мЗв/г × 10 <sup>-2</sup> |
|------------------|-----------|--------------------------------|--|---|---|
| 1                | ID-1      | 13.19 ± 0.55                   | 8.09 ± 0.33  | 1.62 ± 0.07   | 6.47 ± 0.27   |
| 2                | ID-2      | 11.37 ± 0.53                   | 6.97 ± 0.32  | 1.39 ± 0.06   | 5.58 ± 0.26   |
| 3                | ID-3      | 13.34 ± 0.57                   | 8.18 ± 0.35  | 1.64 ± 0.07   | 6.55 ± 0.28   |
| 4                | ID-4      | 11.82 ± 0.49                   | 7.25 ± 0.3   | 1.45 ± 0.06   | 5.8 ± 0.24  |
| 5                | IG-1      | 107.05 ± 0.9                   | 65.64 ± 0.55   | 13.13 ± 0.11  | 52.52 ± 0.44  |
| 6                | IG-3      | 115.98 ± 1                     | 71.12 ± 0.61   | 14.22 ± 0.12  | 56.9 ± 0.49   |
| 7                | IG-4      | 112.47 ± 1.1                   | 68.97 ± 0.67   | 13.79 ± 0.13  | 55.17 ± 0.54  |
| 8                | SED-1     | 14.62 ± 0.61                   | 8.97 ± 0.37  | 1.79 ± 0.07   | 7.17 ± 0.3  |
| 9                | SED-2     | 68.24 ± 1.27                   | 41.85 ± 0.78   | 8.37 ± 0.16   | 33.48 ± 0.62  |
| 10               | SLS-1     | 35.04 ± 0.7                    | 21.49 ± 0.43   | 4.3 ± 0.09  | 17.19 ± 0.34  |
| 11               | SLS-2     | 41.76 ± 0.74                   | 25.61 ± 0.45   | 5.12 ± 0.09   | 20.49 ± 0.36  |
| 12               | SLS-3     | 39.71 ± 0.73                   | 24.35 ± 0.45   | 4.87 ± 0.09   | 19.48 ± 0.36  |
| 13               | SS-4      | 81.22 ± 0.95                   | 49.8 ± 0.58  | 9.96 ± 0.12   | 39.84 ± 0.47  |
| 14               | SS-6      | 83.16 ± 1.08                   | 50.99 ± 0.66   | 10.2 ± 0.13   | 40.79 ± 0.53  |
| 15               | SS-5      | 77.01 ± 0.91                   | 47.22 ± 0.56   | 9.44 ± 0.11   | 37.78 ± 0.45  |
| 16               | SRS-1     | 40.41 ± 0.9                    | 24.78 ± 0.55   | 4.96 ± 0.11   | 19.82 ± 0.44  |
| 17               | SRS-2     | 70.42 ± 0.9                    | 43.18 ± 0.55   | 8.64 ± 0.11   | 34.55 ± 0.44  |
| 18               | MDS-1     | 69.12 ± 1.01                   | 42.38 ± 0.62   | 8.48 ± 0.12   | 33.91 ± 0.5   |
| 19               | MS-1      | 93.18 ± 1.02                   | 57.14 ± 0.62   | 11.43 ± 0.12  | 45.71 ± 0.5   |
| 20               | MBS-2     | 40.52 ± 0.77                   | 24.85 ± 0.47   | 4.97 ± 0.09   | 19.88 ± 0.38  |
| 21               | MG-1      | 9.72 ± 0.49                    | 5.96 ± 0.3   | 1.19 ± 0.06   | 4.77 ± 0.24   |
| 22               | MG-2      | 99.48 ± 0.91                   | 61 ± 0.56  | 12.2 ± 0.11   | 48.8 ± 0.44   |
| 23               | MM-2      | 12.38 ± 0.57                   | 7.59 ± 0.35  | 1.52 ± 0.07   | 6.07 ± 0.28   |
| 24               | MM-3      | Не опр.                        | Не опр.  | Не опр.   | Не опр.   |
| 25               | MM-4      | 77.18 ± 0.83                   | 47.33 ± 0.51   | 9.47 ± 0.1  | 37.86 ± 0.41  |
| 26               | MMA-1     | 135.87 ± 1.18                  | 83.32 ± 0.73   | 16.66 ± 0.15  | 66.65 ± 0.58  |
| 27               | MMM-2     | 91.28 ± 1.05                   | 55.97 ± 0.64   | 11.19 ± 0.13  | 44.78 ± 0.51  |
| 28               | MQM-1     | 80.32 ± 0.99                   | 49.25 ± 0.6  | 9.85 ± 0.12   | 39.4 ± 0.48   |
| 29               | MC-1      | 35.53 ± 0.7                    | 21.79 ± 0.43   | 4.36 ± 0.09   | 17.43 ± 0.34  |
| 30               | MQV-1     | 91.22 ± 0.94                   | 55.94 ± 0.57   | 11.19 ± 0.11  | 44.75 ± 0.46  |
| Среднее значение |           | 59.09 ± 0.84                   | 36.23 ± 0.51   | 7.25 ± 0.10   | 28.99 ± 0.41  |

тельной радиационной опасности для здоровья жителей штата Азад Кашмир. Таким образом, можно сделать вывод о том, что установленный низкий уровень естественной радиоактивности пород района Азад Кашмир позволяет использовать их в строительных целях.

Авторы благодарны анонимным рецензентам за полезные комментарии. Один из авторов (Абдул Раззак Хан) выражает свою признательность Комиссии по высшему образованию Пакистана за предоставление грантов в дополнение к Национальной программе предоставления стипендий и грантов PhD 5000. Мы также признательны господину Мумтазу Хассану Ратеру, старшему геологу АК MIDC (Музаф-фарабад) за руководство инструментальным анализом и сотрудничество в написании геологического раздела статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Al-Jarallah M.I., Abu-Jarad F., Fazal-ur-Rehman.** Determination of radon exhalation rates from tiles using active and passive techniques // *Radiation Measurements*, 2001, v. 34, p. 491—495.
- Baloch M.A., Qureshi A.A., Waheed A., Ali M., Ali N., Tufail M., Qayyum H., Batool S., Akram M., Iftikhar P., Manzoor S., Khan H.A.** A study on natural radioactivity in Khewra salt mines, Pakistan // *J. Radiat. Res.*, 2012, v. 53, p. 411—421.

- Beretka J., Mathew P.J.** Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products // *Health Physics*, 1985, v. 48, № 1, p. 87—95.
- Bertrand B.A., David V., Becker K., Stanley J.G., Bennett G.P., Ken K., Henry R., Edward B., Silberstein., Edward W.** Radon update: facts concerning environmental radon levels, mitigation strategies, dosimetry effects and guides // *J. Nucl. Med.*, 1994, v. 35, № 2, p. 368—385.
- Bilal S., Rahman S., Rafique M., Rahman S.** Monitoring of  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  concentrations at the work places of Muzaffarabad, Azad Kashmir // *Int. J. Phys. Sci.*, 2012, v. 7, № 41, p. 5577—5584.
- Cember H.** Introduction to health physics, third ed. The McGraw-Hill Inc., 1996, 733 p.
- Cember H.** Introduction to health physics, fourth ed. The McGraw-Hill Education, 2009, 843 p.
- Durrani S.A., Ilic R.** Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment. Singapore, World Scientific, 1997.
- Eisenbud M., Gesell T.** Environmental radioactivity, from natural, industrial and military sources, 4th Ed. 1997, 656 p.
- EC (European Commission)** radiation protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection. 1999, 16 p.
- Farai I.P., Ademola J.A.** Radium equivalent activity concentrations in concrete building blocks in eight cities in Southwestern Nigeria // *J. Environ. Radioact.*, 2005, v. 79, p. 119—125.
- Fredj A.B., Hizem N., Chelbi M., Ghedira L.** Quantitative analysis of gamma-ray emitters radioisotopes in commercialised bottled water in Tunisia // *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2005, v. 117, № 4, p. 419—424.
- Gilmore G., Hemingway J.D.** Practical gamma-ray spectrometry. 2nd ed. Wiley, UK, 2008, 128 p.
- Hizem N., Fredj B.A., Ghedira L.** Determination of natural radioactivity in building materials used in Tunisian dwellings by gamma ray spectrometry // *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2005, v. 114, № 4, p. 533—537.
- Heusser G., Klapdor H.V., Pteпки A., Schneider J., Mansour N., Strecker H.** Construction of a low level Ge detector. *Appl. Radiat. Isot.*, 1989, v. 40, 393 p.
- International Commission on radiological protection.** Protection against radon-222 at home and at work, ICRP Publication 65 // *Ann. ICRP*, 1993, v. 23, № 2, p. 1—45.
- Jabbar A., Arshed W., Bhatti A.S., Ahmad S.S., Akhtar P., Rehman S.U., Anjum M.I.** Measurement of soil radioactivity levels and radiation hazard assessment in southern Rechna interfluvial region, Pakistan // *Environ. Monit. Assess.*, 2010a, v. 169, p. 429—438.
- Jabbar A., Arshed W., Bhatti A.S., Ahmad S.S., Rehman S.U., Dilband M.** Measurement of soil radioactivity levels and radiation hazard assessment in mid Rechna interfluvial region, Pakistan // *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2010b, v. 283, p. 371—378.
- Khan K., Aslam M., Orfi S.D., Khan H.M.** Norm and associated radiation hazards in bricks fabricated in various localities of the North-West Frontier Province (Pakistan) // *J. Environ. Radioact.*, 2002, v. 58, № 1, p. 59—66.
- Nageswara R.M.V.** Natural radioactivity levels in some environmental materials from Rajasthan // *Bull. Radiation Protection*, 1989, v. 12, p. 36—41.
- OECD.** Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by a group of experts of the OECD, Nuclear Energy Agency, Paris, France, 1979.
- Qureshi A.A., Jadoon I.A.K., Wajid A.A., Attique A., Masood A., Anees M., Manzoor S., Waheed A., Tubassam A.** Study of natural radioactivity in Mansehra granite, Pakistan: environmental concerns // *Radiat. Prot. Dosimetry*, 158(4), p. 466—478. 2013, doi:10.1093/rpd/nct271.
- Rafique A.** Ambient indoor/outdoor gamma radiation dose rates in the city and at high altitudes of Muzaffarabad (Azad Kashmir) // *Environ. Earth Sci.*, 2013, v. 70, № 4, p. 1783—1790.
- Rafique M., Rehman H., Matiullah, Malik F., Rajput M.U., Rahman S.U., Rathore M.H.** Assessment of radiological hazards due to soil and building materials used in Mirpur Azad Kashmir; Pakistan // *Iranian. J. Radiat. Res.*, 2011, v. 9, № 2, p. 77—87.
- Rafique M., Basharat M., Azhar Saeed R., Rahamn S.** Effect of geology and altitude on ambient outdoor gamma dose rates in district poonch, azad Kashmir // *Carpathian J. Earth Environ. Sci.*, 2013a, v. 8, № 4, p. 165—173.
- Rafique M., Jabbar A., Khan A.R., Rahman S., Basharat M., Mehmood M., Matiullah.** Radiometric analysis of rock and soil samples of Leepa Valley; Azad Kashmir, Pakistan // *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 2013b, v. 298, p. 2049—2056.

**Rahman S.U., Rafique M.**  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , and  $^{40}\text{K}$  activities and associated radiological hazards in building materials of Islamabad capital territory, Pakistan // Nucl. Technol. Radiat. Prot., 2012, v. 27, № 4, p. 392—398.

**Rahman S.U., Matiullah, Malik F., Rafique M., Anwar J., Ziafat M., Jabbar A.** Measurement of naturally occurring/fallout radioactive elements and assessment of annual effective dose in soil samples collected from four districts of the Punjab Province Pakistan // J. Radioanal. Nucl. Chem., 2011, v. 287, p. 647—655.

**Rahman S.U., Rafique M., Jabbar A., Matiullah.** Radiological hazards due to naturally occurring radionuclides in the selected building materials used for the construction of dwellings in four districts of the Punjab province, Pakistan // Radiat. Prot. Dosimetry, 2013, v. 153, № 3, p. 352—360.

**Righi S., Bruzzi L.** Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings // J. Environ. Radioact., 2006, v. 88, p. 158—570.

**Tzortzis M., Tsertos H.** Determination of thorium, uranium and potassium elemental concentrations in surface soils in Cyprus // J. Environ. Radioact., 2004, v. 27, p. 325—338.

**UNSCEAR.** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. New York, United Nations, 1988.

**UNSCEAR.** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. New York, United Nations, 1993.

**UNSCEAR.** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Source and effects of ionizing radiation. New York, United Nations, 2000.

**Westmeier W.** Techniques and problems of low level gamma ray spectrometry // Appl. Radiat. Isot., 1992, v. 43, 305 p.

**Xinwei L., Lingqing W., Xiaodan J., Leipeng Y., Gelian D.** Specific activity and hazards of Archeozoic-Cambrian rock samples collected from the Weibei area of Shaanxi, China // Radiat. Prot. Dosimetry, 2006, v. 118, № 3, p. 352—359.

*Рекомендована к печати 24 января 2014 г.  
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.,  
после доработки — 20 января 2014 г.*