

Применение природных материалов с низким содержанием радионуклидов в качестве защиты от внешнего фона при проведении лабораторных гамма-спектрометрических и радиометрических измерений

Рассмотрен оригинальный способ организации защиты от внешнего фона при проведении гамма-спектрометрических и радиометрических измерений, при котором внутренняя поверхность стен, пола и потолка лабораторного помещения закрывается сплошным экраном из природных материалов с низким содержанием радионуклидов. Применение данного способа позволяет исключить затраты на приобретение традиционных металлических защитных камер, используемых для низкофоновой гамма-спектрометрии и радиометрии, снять ограничения на размер измеряемой пробы, устанавливаемые внутренними размерами измерительной полости защитной камеры. Установлено, что оптимальными материалами для указанных целей являются природные карбонаты с содержанием CaCO_3 не ниже 98%. Определены границы применения данного способа организации защиты, проведено экспериментальное подтверждение эффективности предложенного способа путем измерений в меловой келье Дивногорского пещерного храма. Разработан эскиз компоновки лабораторного помещения, реализующего предложенный способ защиты от внешнего фона при проведении измерений.

**В.П.Поваров, В.С.Росновский,
Е.И.Юрченко, В.Н.Карасев,
С.В.Росновский,
В.В.Добрынин, Ф.Г.Соколов,
А.А.Смородинов**

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»
«Нововоронежская АЭС», г. Нововоронеж
Воронежской обл.

Ключевые слова:

гамма-спектрометрия, радиометрия, экранирование, карбонат кальция, лаборатория, радиационный контроль.

Одним из основных методов, применяемых в настоящее время для анализа содержания радионуклидов в объектах окружающей среды, является низкофоновая гамма-спектрометрия с полупроводниковыми детекторами. При использовании современной приборной базы указанный метод обеспечивает необходимые на практике значения чувствительности и точности, а также удовлетворяет требованию высокой эффективности измерительных процедур.

При проведении гамма-спектрометрических и радиометрических измерений образцов с малой удельной активностью большое влияние на качество измерений оказывают факторы внешнего фона в месте проведения измерений.

В связи с наличием в лаборатории собственного гамма-фона для набора необходимой статистики и уверенного выделения полезного сигнала над фоном приходится увеличивать время измерений до нескольких часов и даже дней. Гамма-фон в помещении определяет нижний предел измерения (НПИ) для данного детектора, ниже которого активность не может быть измерена с приемлемой достоверностью.

Основными факторами, вносящими вклад в фон в лаборатории, являются:

1. Космическое гамма-излучение;
2. Излучение от внешних техногенных источников излучения;
3. Гамма-излучение, создаваемое радионуклидами природного происхождения, содержащимися в строительных конструкциях лабораторного помещения.

Радионуклидами, определяющими гамма-фон на открытой местности (не загрязненной техногенными радионуклидами), являются ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th . Горные породы вулканического происхождения (особенно граниты) по сравнению с осадочными (за исключением сланцев) обладают большей активностью. Помимо этого, в почвах могут содержаться радиоизотопы, индуцированные космическим излучением, например, C^{14} .

Для ослабления влияния природных радионуклидов, содержащихся в строительных конструкциях, на качество измерений традиционным является использование специальных толстостенных металлических конструкций (экранов-защит). При этом во время измерения блок детектирования гамма-спектрометра и измеряемая проба находятся внутри экрана-защиты, ослабляющего внешнее гамма-излучение.

Известна конструкция модуля биологической защиты по патенту RU 66841 [МПК G21F7/00, опубл. 27.09.2007], выполненного двустенным, обшитым стальными листами, содержащим в промежутках, образованных между внутренними и внешними стенками, свинцовую дробь, выполняющую роль экранирующего ионизирующее излучение поглотителя.

В настоящее время в природной среде достаточно широко распространены радионуклиды искусственного происхождения, появившиеся, главным образом, вследствие ранее проводившихся испытаний ядерного оружия в атмосфере, а также в результате техногенных аварий на объектах атомной энергетики. Радионуклиды искусственного происхождения содержатся, в том числе, в составе свинца и других конструкционных материалов экранов-защит. В связи с этим, для изготовления низкофонового экрана-защиты приходится изготавливать его внутренний слой из особо отобранного свинца – как правило, свинцовых изделий, изготовленных до 1950 г. Свинец перед изготовлением внутренних элементов защиты подвергается тщательному радиационному контролю, при необходимости проводится многоступенчатая дезактивация. Таким образом, изготовление низкофонового экрана-защиты представляет собой технически сложный и затратный процесс.

Известна низкофоновая гамма-спектрометрическая лаборатория ЛРК-1 МИФИ [1], которая расположена в полуподвальном проветриваемом помещении и включает в себя семь индивидуальных спектрометрических трактов (ИСТ). Спектрометр предназначен для определения радионуклидного состава и активности радионуклидов в пробах окружающей среды методами низкофоновой гамма-спектрометрии с полупроводниковыми детекторами в стационарных лабораторных условиях. Низкофоновая защита, входящая в состав каждого ИСТ, выполнена по модульному принципу и состоит из:

- внешней защитной оболочки (обычный свинец, толщина стенки 100 мм);
- внутренних модулей (низкофоновый свинец, толщина стенки от 20 до 40 мм);
- облицовки внутренней оболочки (медь, толщина от 5 до 15 мм);
- крышки (аналогична внешней защитной оболочке).

Применение внутренних модулей различных конфигураций позволяет помещать в камеру измерительные контейнеры различной геометрии, а также использовать детекторы разных конструкций. Подъемный механизм обеспечивает доступ внутрь защиты при смене проб, замене внутренних модулей и при извлечении детектора.

Для уменьшения вклада в фон установки гамма-излучения дочерних продуктов радионуклида ^{226}Ra внутренний объем защитной камеры постоянно продувается парами жидкого азота.

Исследуемые пробы помещаются в цилиндрические контейнеры объемом 145 см³ (Ø 95×30 мм) или 250 см³ (Ø 95×50 мм), либо в контейнер с геометрией Маринелли объемом 500 см³ или 1000 см³.

Аналогичные защитные камеры входят в состав двух гамма-спектрометрических трактов низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС».

Вес защитной камеры в сборе с блоком детектирования не превышает 600 кг; габаритные размеры, включая пространство для открывания /сдвига крышки: 0,6×0,8×1,3 м (W×D×H).

Указанный способ ослабления внешнего гамма-фона имеет ряд недостатков, в том числе: размер пробы ограничен размерами внутренней полости экрана-защиты; для обеспечения необходимого качества измерений внутренние модули низкофоновой защиты необходимо изготавливать из специального низкофонового свинца.

В целях нивелирования влияния космического гамма-излучения и излучения от внешних техногенных источников низкофоновую лабораторию иногда размещают в подземных помещениях, располагаемых много ниже уровня земли.

Так, национальная лаборатория Гран-Сассо [2] итальянского Национального института ядерной физики, занимающаяся экспериментами в области физики элементарных частиц и ядерной физики, состоит из наземной части и подземных помещений, расположенных на средней глубине около 1400 м и на высоте около 1000 м над уровнем моря. Подземное расположение позволяет на много порядков уменьшить фон от космических лучей в экспериментах, требующих крайне высокой чувствительности к ядерным событиям, что необходимо для регистрации редких радиоактивных распадов, исследования солнечных, реакторных и ускорительных нейтрино, детектирования взаимодействий гипотетических частиц темной материи с веществом.

Еще один пример подземного размещения – Солотвинская низкофоновая лаборатория, принадлежащая Институту ядерных исследований НАН Украины [3], расположенная в шахте № 9 солерудника.

Недостатком организации лабораторий в подземных шахтах является зависимость места их размещения от ранее проведенных горнорудных работ, что не всегда позволяет разместить лабораторию там, где она необходима исходя из текущих производственных задач.

Оригинальной идеей, позволяющей решить с приемлемым качеством все вышеперечисленные проблемы, может являться организация низкофоновой радиационной лаборатории в подвальном помещении с использованием в качестве биозащиты облицовку стен, потолка и пола природными материалами с низким содержанием природных радионуклидов.

Существующие строительные материалы мало подходят для создания защитного экрана, поскольку содержание в них природных радионуклидов не позволяет организовать измерения без дополнительной защиты. Известно использование строительных смесей, предназначенных для изготовления радиационно-защитных камней, стен, перегородок и штукатурных растворов различного состава, в том числе, на основе бетонных смесей. Так, в патенте RU 2172989 [МПК G21F1/04, опубл. 27.08.2001] предложено использование смеси следующего состава: цемент, железорудный концентрат, пластифицирующая добавка и вода, причем линейный коэффициент ослабления при $E = 0,66$ МэВ находится в интервале от 0,19 до 0,23 см⁻¹. Существует также сухая строительная смесь [RU2233255, МПК C04B28/30, опубл. 27.07.2004] для экранирования помещений от электромагнитных излучений и геопатогенного воздействия поля Земли, в состав которой входят: порошок магнезитовый каустический, модифицирующая добавка, которая содержит природный минерал шунгит, или дополнительно содержит баритовый концентрат [RU 2388715, МПК C04B28/30, G21F1/04, C04B111/20, опубл. 10.05.2010].

Недостатком применения указанных смесей является наличие в них природных радионуклидов как осадочного, так и вулканического происхождения, создающих собственный гамма-фон.

При сооружении строительных конструкций низкофоновой лаборатории целесообразно использовать материалы с низким содержанием радионуклидов для создания защитного экрана из мела или мрамора по всей поверхности строительных конструкций помещения (пола, стен и потолка), либо для сооружения строительных конструкций непосредственно из меловых или мраморных блоков.

Наиболее подходящим материалом для изготовления внутренних строительных конструкций низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории является мел, имеющий чистоту по CaCO₃ свыше 98% [4]. Поскольку мел является осадочной породой и представляет собой продукт метаболизма древних организмов (червей мелового периода), он фактически не содержит примесей K, U и Th. Радиоизотопы O, C и Ca, индуцированные космическим излучением, имеют малый, по отношению к возрасту меловых пород, период полураспада, и в меле также отсутствуют. В случае, если мел добыт не из поверхностных слоев, в нем отсутствуют и техногенные радионуклиды, обусловленные ядерными испытаниями и чернобыльскими выпадениями. Таким образом, мел (равно как и мрамор) практически лишен основных источников естественного радиационного фона, присутствующих в бетонных и металлических изделиях современных строительных конструкций, и является оптимальным материалом для сооружения низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории.

Как известно, радиационный фон имеет две основных составляющих (если исключить радон и его ДПР):

- природные р/н – в рассматриваемой местности это 0,08 мкЗв/ч;
- космический фон (в основном это протоны) – в средних широтах это 0,03–0,04 мкЗв/ч.

Если предположить, что степень химической чистоты мела определяет степень его свободы от естественных радионуклидов, а техногенных нуклидов мел не содержит по определению, то можно ожидать в меловых отложениях снижения радиационного фона, обусловленного наличием природных р/н относительно наружного до величин: $0,08 \text{ мкЗв/час} \cdot (1-0,98) = 0,0016 \text{ мкЗв/час}$.

Учитывая, что мел обладает плотностью выше плотности обычного строительного бетона ($2,7 \text{ г/см}^3$ против $2,3 \text{ г/см}^3$), толщина внутреннего защитного слоя лаборатории, эффективно снижающего излучение ^{40}K в 100 раз, составляет не более 500 мм. Указанная величина может быть принята в качестве минимально-допустимой толщины слоя защиты из меловых блоков.

Защита из 50 см мела практически полностью поглотит мягкую составляющую космического излучения, которая состоит из электронов и позитронов и дает вклад в общую дозу от космического излучения около 30%, но не повлияет на интенсивность жесткой компоненты, состоящей из высокоэнергетических мюонов. Таким образом, можно ожидать снижения фона космического излучения в защите из 50 см мела с $0,035 \text{ мкЗв/ч}$ до $0,0245 \text{ мкЗв/ч}$.

Таким образом, общее значение гамма-фона снижается до величины порядка $0,03 \text{ мкЗв/ч}$ во всем объеме лабораторного помещения, имеющего меловую облицовку, а не только в рабочем объеме защитной камеры, что позволяет проводить гамма-спектрометрические и радиометрические измерения объектов произвольного объема и геометрии.

В табл.1 показаны значения концентраций некоторых радионуклидов в горных породах и соответствующая ей мощность поглощенной дозы на высоте 1 м от поверхности Земли [5].

Имеющиеся научные данные свидетельствуют о том, что меловые породы (известняки, карбонаты) являются оптимальным материалом для формирования защитного экрана, обеспечивающего минимизацию природного фонового излучения при проведении гамма-спектрометрических и радиометрических измерений.

Для проверки данного заключения специалистами НВАЭС выполнены радиационные измерения в помещениях исторического объекта, расположенного на территории Воронежской области – подземной пещерной церкви Сицилийской иконы Божьей матери (Лискинский район, с. Дивногорье) – см. фото на 1-й стр. обложки. Церковь расположена в меловой толще, что позволяет считать условия измерений приближенными к тем, что могут быть искусственно созданы в измерительной лаборатории при применении меловых блоков в качестве облицовки пола, стен и потолка.

Табл.1. Концентрация некоторых радионуклидов в горных породах и соответствующая ей мощность поглощенной дозы на высоте 1 м от поверхности Земли [5].

Тип породы	Концентрация радионуклидов, нКи/кг (Бк/кг)			Мощность поглощенной дозы, мкрад/ч (10^{-8} Гр/ч)
	калий-40	уран-238	торий-232	
Вулканические:				
кислые (граниты)	27,0 (1000)	1,60 (60)	2,20 (81)	12,0 (12,0)
промежуточные (диориты)	19,0 (700)	0,62 (23)	0,88 (32)	6,2 (6,2)
ультраосновные (диабазы)	4,0 (150)	0,01 (0,37)	0,66 (24)	2,3 (2,3)
Осадочные:				
известняки	2,4 (89)	0,75 (28)	0,19 (7,0)	2,0 (2,0)
карбонаты	-	0,72 (27)	0,21 (7,8)	1,7 (1,7)
песчаники	10 (370)	0,5 (18,5)	0,30 (11)	3,2 (3,2)
сланцы	19 (700)	1,20 (44)	1,20 (44)	7,9 (7,9)

Табл.2. Результаты измерений.

Расположение точки измерений	Измеренное значение фона, с ⁻¹ (мкР/ч)	Наличие линий техногенных радионуклидов в спектре
На территории, прилегающей к церкви. Поверхность грунта у подножия меловой горы	16±19 (5±6)	Присутствует Cs-137, обусловленный глобальными выпадениями (рис.1)
Дальний от входа правый угол основного молеельного зала церкви. На поверхности пола	2±4 (0,8±1,2)	Линии техногенных радионуклидов в спектре отсутствуют (рис.2)

Результаты измерений приведены в табл.2 и в целом подтверждают выводы о возможности организации радиационной лаборатории в помещении, облицованном меловыми блоками.

Для проведения измерений использовался радиометр типа СРП-68 с диапазоном измерений регистрируемого потока гамма-излучения от 0 до 100 с⁻¹ (мощности экспозиционной дозы от 0±30 мкР/ч) и спектрометром энергии гамма-излучения типа «Гамма-1С/НВ1-01,02» с датчиком на базе кристалла NaI(Tl) 40×40 мм.

Помимо этого, с помощью переносных гамма-спектрометров «Гамма-1С/НВ1-01,02» был проведен анализ фонового спектра с целью определения наличия техногенных радионуклидов.

Как можно видеть, результаты измерений находятся в хорошем соответствии с принятыми предположениями (рис.2).

Значения гамма-фона по скорости счета за пределами церкви составили 16–19 с⁻¹ (0,05–0,06 мкЗв/ч), что примерно в два раза ниже гамма-фона, характерного для Воронежской области (20–22 с⁻¹ (0,12–0,14 мкЗв/ч)). Анализ фонового спектра показал наличие техногенного радионуклида Cs-137, обусловленного следами глобальных выпадений.

Внутри церкви измеренные значения гамма-фона по скорости счета составили порядка 18 с⁻¹ (0,01 мкЗв/час). Линии техногенных радионуклидов в спектре не обнаружены.

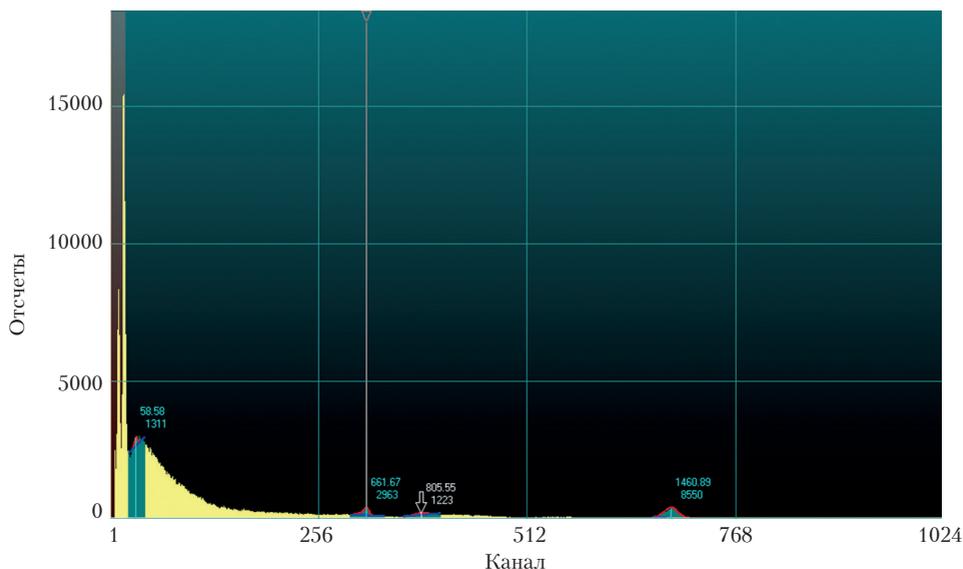


Рис.1. Спектр гамма-излучения за пределами церкви. В спектре присутствует линия 661 КэВ, что соответствует техногенному радионуклиду Cs-137.

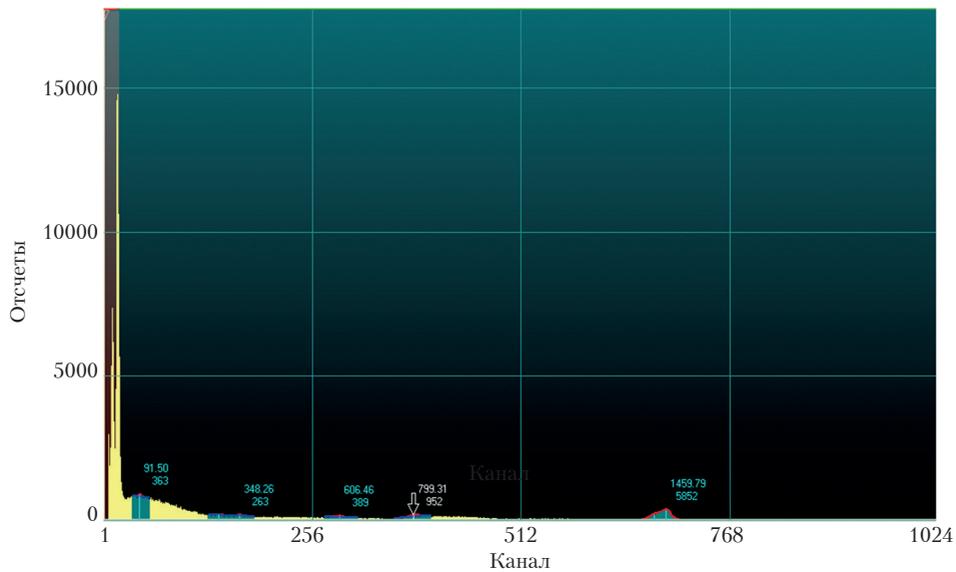


Рис.2. Спектр гамма-излучения внутри церкви. В спектре линии техногенных радионуклидов не обнаружены.

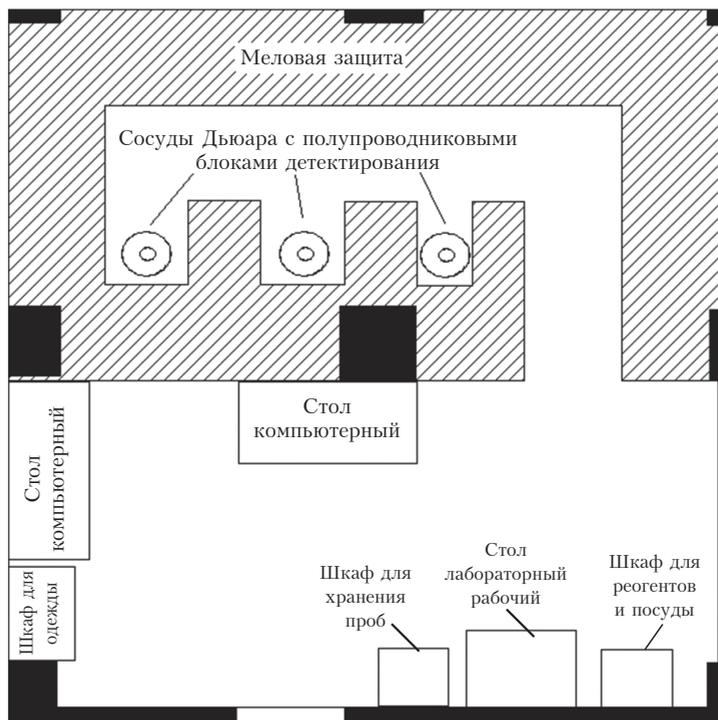


Рис.3. Эскиз компоновки оборудования в низкофоновой меловой лаборатории.

Таким образом, экспериментально была подтверждена возможность реализации низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории в помещении, внутренние поверхности которого выполнены из мела или мрамора, с отказом от применения металлических защитных камер.

Технически данная идея может быть реализована путем размещения низкофоновой гамма-спектрометрической лаборатории в полуподвальном или подземном помещении, стены, пол и потолок помещения облицованы блоками горной породы, состоящей не менее чем на 98%

из карбоната кальция, причем толщина блоков находится в диапазоне от 500 до 1000 мм. Низкофоновая гамма-спектрометрическая лаборатория может быть также расположена в имеющейся меловой штольне или выработке, образовавшейся ранее при горнорудных работах.

Для практической реализации идеи наиболее приемлемым с точки зрения технологии строительства является применение блоков из мрамора. ГОСТы [6,7] допускают применение при строительстве мраморных изделий толщиной до 400 мм. Таким образом, для практической реализации идеи могут быть использованы стандартные промышленные изделия из мрамора толщиной по 250 мм в два слоя для получения общей толщины защитного слоя 500 мм. Однако стоимость низкофоновой лаборатории при использовании мраморных блоков будет достаточно велика.

С экономической точки зрения более привлекательным является применение меловых блоков, стоимость которых значительно меньше стоимости мрамора. Варианты применения меловой защиты:

- организация лаборатории в выработанной меловой штольне;
- организация лаборатории в помещении общепромышленного назначения. Меловые блоки в этом случае должны использоваться в качестве внутреннего облицовочного слоя помещения лаборатории, не несущего нагрузки от перекрытий.

Разработана концепция организации низкофоновой меловой лаборатории, которая может быть организована в подвальном помещении (пом. № 027) инженерно-лабораторного корпуса (ИЛК) Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», которая реализует данный способ защиты от внешнего гамма-фона.

На рис.3 представлен эскиз компоновки оборудования в низкофоновой меловой лаборатории размером 6000×6000 мм, которая может быть организована в подвальном помещении (пом. № 027) инженерно-лабораторного корпуса (ИЛК) Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС».

Пол помещения расположен на глубине 7,2 метра, что обеспечивает изоляцию измерительного объема от космического гамма-излучения и воздействия внешних техногенных источников. Помещение имеет размер 6000×6000 мм. В половине помещения организуется измерительный объем, включающий три изолированные меловые камеры. Стены, потолок и пол измерительного объема обкладываются меловыми или мраморными блоками. Общая толщина защитного слоя мела/мрамора составляет порядка 800 мм. В каждой меловой камере размещается блок детектирования полупроводникового гамма-спектрометра и сосуд Дьюара с жидким азотом для охлаждения блока детектирования. Во второй половине помещения организуются рабочие места персонала, включающие два компьютерных стола для размещения гамма-спектрометрического оборудования; лабораторный рабочий стол для обращения с пробами; шкаф для хранения проб; шкаф для реагентов и посуды; шкаф для одежды, используемый для переодевания персонала.

Таким образом, предложенный способ организации низкофоновых радиационных лабораторий в подземных помещениях с применением в качестве защитного экрана облицовки из материалов с низким содержанием природных радионуклидов представляется вполне реализуемым и целесообразным как с точки зрения экономической выгоды, так и с точки зрения удобства сотрудников лаборатории при выполнении радиационных измерений.

Литература

1. URL: <http://www.radiation.ru/research/laborat.htm> (дата обращения: 27.01.2025).
2. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Национальная_лаборатория_Гран-Сассо (дата обращения: 27.01.2025).
3. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Солотвино> (дата обращения: 27.01.2025).
4. Кудеярова Н.П., Назарова В.В., Рожков В.П. Меловые толщи Белгородской области: состав, структура и свойства // Строительные материалы. 2010.
5. А.М. Кузин. Невидимые лучи вокруг нас. М.: Наука, 1980, 151 с.
6. ГОСТ 9479-98. Блоки из горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий. Технические условия.
7. ГОСТ 23342-91. Изделия архитектурно-строительные из природного камня. Технические условия.

The Use of Natural Materials with a Low Content of Radionuclides as Protection from the External Background During Laboratory Gamma-Ray Spectrometric and Radiometric Measurements

Povarov Vladimir, Rosnovskiy Viktor, Karasev Vyacheslav, Rosnovsky Sergey, Smorodinov Andrei, Sokolov Fedor, Dobrynin Virtor, Yurchenko Evgeny (Rosenergoatom, Joint-Stock Company (REA JSC) Novovoronezh Nuclear Power Plant (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russia)

Abstract. An original method of organizing protection from the external background during gamma-spectrometric and radiometric measurements is considered, in which the inner surface of the walls, floor and ceiling of the laboratory room is covered with a solid screen made of natural materials with a low content of radionuclides. The use of this method makes it possible to eliminate the cost of purchasing traditional metal protective chambers used for low-background gamma-ray spectrometry and radiometry, and to remove restrictions on the size of the measured sample set by the internal dimensions of the measuring cavity of the protective chamber. It has been established that natural carbonates with a CaCO_3 content of at least 98% are the optimal materials for these purposes. The boundaries of the application of this method of protection organization have been determined, and experimental confirmation of the effectiveness of the proposed method has been carried out by measurements in the Cretaceous cell of the Divnogorsky cave temple. A sketch of the layout of the laboratory room has been developed, which implements the proposed method of protection from the external background during measurements.

Keywords: *gamma-ray spectrometry, radiometry, shielding, calcium carbonate, laboratory, radiation control.*

В.П.Поваров (д.т.н., зам.ген.директора), В.С.Росновский (оператор реакторного отд.), В.Н.Карасев (зам.нач.цеха по обрац. с РАО), С.В.Росновский (зам.гл.инж.), В.В.Добрынин (зам.нач.отд. РБ), Ф.Г.Соколов (зам.нач.цеха по РБ), А.А.Смородинов (вед.инж.), Е.И.Юрченко (инж.-физик) – Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», г. Нововоронеж Воронежской обл.

Контакты: тел. +7 (920) 889-00-30; rosnovskyviktor@yandex.ru