

ЛАБОРАТОРНЫЕ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ПЛАНЕТНОГО ВЕЩЕСТВА ДЕТЕКТОРОМ ИЗ ВЫСОКОЧИСТОГО ГЕРМАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МЕЧЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*М. И. Мокроусов^{а,1}, И. Г. Митрофанов^а, А. А. Аникин^а, Д. В. Головин^а,
А. С. Козырев^а, М. Л. Литвак^а, С. Ю. Никифоров^а,
А. Б. Санин^а, Г. Н. Тимошенко^б, В. Н. Швецов^б, Е. Е. Павлик^б*

^а Институт космических исследований РАН, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлено описание эксперимента на протонном пучке фазотрона ОИЯИ с лабораторным макетом космического прибора для гамма-спектрометрии небесных тел на основе метода меченых заряженных частиц галактических космических лучей. Особенностью эксперимента является применение в составе макета полупроводникового детектора *p*-типа из высокочистого германия.

An experiment description on the JINR Phasotron proton beam for a laboratory model of a space instrument for gamma spectrometry of celestial bodies based on the method of tagged charged particles of galactic cosmic rays is presented. A feature of the experiment is the use of a *p*-type high-purity germanium semiconductor detector.

PACS: 95.85.Ry; 95.85.Pw; 29.30.Ep; 07.85.Nc; 29.40.Wk; 29.20.dk

ВВЕДЕНИЕ

На фоне увеличивающейся активности ведущих космических держав по освоению Луны и Марса с каждым годом возрастает актуальность задачи анализа состава поверхностного грунта этих небесных тел бесконтактными методами с бортов космических аппаратов. Для выбора наиболее удачных районов для строительства будущих обитаемых баз требуется получить максимально достоверные данные об элементном составе грунта. Одним из хорошо зарекомендовавших себя методов определения элементного состава грунта является космическая гамма-спектроскопия [1–5].

Численное моделирование гамма-излучения поверхности Луны, возникающего под воздействием потока галактических космических лучей (ГКЛ), позволяет получить

¹E-mail: mokromax@iki.rssi.ru

оценки полного числа фотонов гамма-лучей во всем спектральном диапазоне в пересчете на 1 частицу ГКЛ. Эти оценки соответствуют величине 5,3 фотона за все время послесвечения после воздействия на вещество одиночной частицы ГКЛ (так называемое *полное альbedo* [6]). Процесс послесвечения включает излучение гамма-лучей в реакциях раскола ядер породообразующих элементов с образованием новых ядер и нейтронов, в реакциях неупругого рассеяния нейтронов или частиц ГКЛ на ядрах породообразующих элементов, в реакциях захвата замедлившихся нейтронов этими ядрами, а также в реакциях распада образовавшихся радиоактивных изотопов. С учетом физических особенностей процесса послесвечения можно ввести понятие *раннего альbedo*, которое соответствует гамма-лучам, испускаемым ядрами вещества за время до 100 нс непосредственно после воздействия на них отдельных частиц ГКЛ (см. [6]).

Спектральный состав гамма-лучей для полного и раннего альbedo существенно различается. В первом случае в спектре присутствуют ядерные линии от всех реакций, происходящих в веществе небесного тела под воздействием ГКЛ. Во втором случае вклад в спектр вносят только те реакции, которые происходят в интервале до 100 нс после попадания в вещество энергичной заряженной частицы ГКЛ — в этом случае ядерное гамма-излучение связано только с переходами в основное состояние ядер, образовавшихся в реакциях раскола под воздействием энергичных частиц ГКЛ, и с реакциями неупругого рассеяния на ядрах породообразующих элементов частиц ГКЛ и быстрых вторичных нейтронов.

Космическая гамма-спектроскопия небесных тел основана на измерении характеристических ядерных линий вторичного гамма-излучения их поверхности, возникающего вследствие бомбардировки ядер породообразующих элементов заряженными частицами ГКЛ. С помощью этого метода можно определить концентрацию в планетном веществе таких основных породообразующих элементов, как O, C, Na, Mg, Al, Si, Ca, K, Fe. Основной проблемой проведения экспериментов по гамма-спектроскопии с бор-

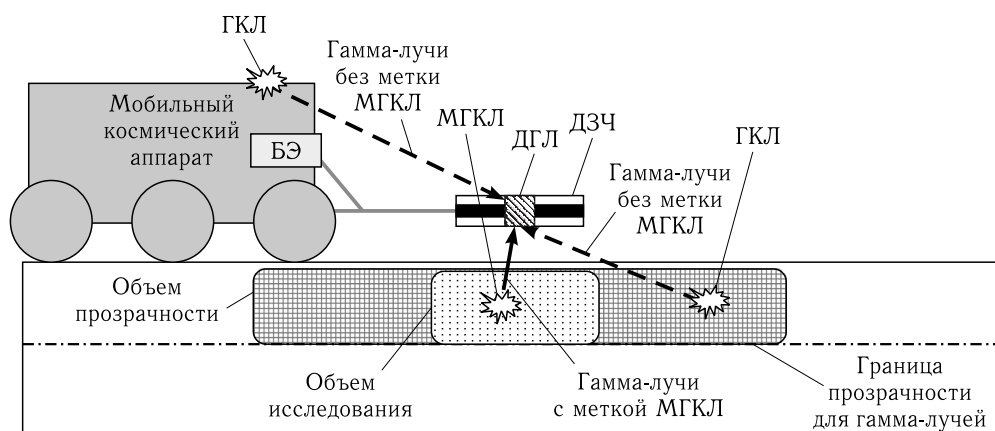


Рис. 1. Схема эксперимента с космическим гамма-спектрометром с применением метода меченых космических лучей на борту мобильного аппарата на поверхности небесного тела. Иллюстрация воспроизведена из статьи [6]

тов орбитальных и посадочных аппаратов является вторичный фон гамма-лучей от космического аппарата (КА), который также имеет в своем составе большинство исследуемых элементов. Для решения этой проблемы был предложен метод меченных заряженных частиц (МЗЧ) [7], который позволяет не только уменьшить объем исследуемого грунта до непосредственной окрестности расположения гамма-спектрометра, но и практически полностью исключить фон от космического аппарата из данных спектрометрического эксперимента (рис. 1). Основная идея метода состоит в дополнении гамма-спектрометра детектором-телескопом частиц ГКЛ, которые попадают в изучаемый объем вещества под поверхностью небесного тела (так называемые меченные ГКЛ, или МГКЛ). Если для построения спектра гамма-лучей отобраны только те отсчеты, которые совпали по времени с регистрацией МГКЛ, то с высокой вероятностью этот спектр характеризует раннее альbedo вещества в выделенном объеме (детали см. в [6–8]).

В рамках проекта Российского научного фонда (РНФ, № 18-12-00487) была предложена концепция космического гамма-спектрометра с метками заряженных частиц (КГС-МЗЧ) и выполнена разработка нескольких лабораторных макетов такого прибора, в которых реализуется предложенный метод [7–11]. В данной работе представлено описание заключительных лабораторных испытаний на протонном пучке фазотрона ОИЯИ макета такого прибора с детектором из высокочистого германия.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА С МАКЕТОМ КГС-МЗЧ НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

Лабораторный макет прибора КГС-МЗЧ состоит из детектора гамма-лучей (ДГЛ), детектора заряженных частиц (ДЗЧ) и блока электроники (БЭ). В основу его работы заложен принцип регистрации гамма-лучей в детекторе гамма-лучей ДГЛ и частиц ГКЛ в детекторе заряженных частиц ДЗЧ с наносекундной точностью, в результате чего для отсчетов от фотонов и от частиц формируются так называемые *байтовые слова*, содержащие признак типа отсчета, момент времени регистрации и величину энергии отсчета (для ДГЛ). После этого полученный массив данных из «фотонных» и «протонных» слов подвергается математической обработке, где происходит их взаимная привязка по признаку времени совпадения фотонов, зарегистрированных в ДГЛ, с заряженными частицами, зарегистрированными в ДЗЧ. Такое совпадение в пределах достаточно короткого временного интервала позволяет принять, что фотон был излучен под воздействием заряженной частицы в выделенном объеме исследуемого вещества, который ограничивает условие регистрации этой частицы в ДЗЧ (см. рис. 1).

На начальном этапе проекта в макете прибора КГС-МЗЧ в качестве ДГЛ использовался детектор на основе кристалла бромида церия CeBr_3 (такие сцинтилляционные детекторы имеют достаточно высокое спектральное разрешение среди сцинтилляторов ($\sim 27\text{--}37$ кэВ или $\sim 4\text{--}4,5\%$ для фотонов с энергией 662 кэВ), относительно малое время высвечивания, высокую эффективность регистрации и низкий собственный фон [12, 13]). Однако такой детектор значительно уступает по разрешению детектору из высокочистого германия, который обладает спектральным разрешением около 2 кэВ для фотонов с энергиями 0,662 и 1,33 МэВ. Высокое спектральное разре-

шение существенно повышает достоверность измерений характеристических ядерных линий, поэтому было принято решение изучить возможность использования в составе КГС-МЗЧ детектора ДГЛ на основе кристалла германия высокой чистоты (HPGe).

Лабораторные отработки макета прибора КГС-МЗЧ проводились на протонном пучке фазотрона Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне с энергией ~ 170 МэВ, импульсной микроструктурой с характерным временем 70 нс и сечением 80 мм. Схема экспериментальной установки (ЭУ) представлена на рис. 2. В состав ЭУ входят система из двух коллиматоров, лабораторный макет КГС-МЗЧ в составе ДЗЧ, ДГЛ и БЭ, а также модуль облучаемых мишеней (МОМ). МОМ содержит массивный блок из силикатного стекла и набор облучаемых мишеней, которые могут устанавливаться в этом блоке. МОМ имеет механизм, который позволяет сдвигать облучаемые мишени в направлении поперек протонного пучка в соответствии с выбором конкретной облучаемой мишени. Непосредственно за системой коллиматоров в пучке располагается ДЗЧ в составе двух счетчиков S1 и S2. Пройдя ДЗЧ, протоны пучка попадают на МОМ. Вне пучка протонов, но в непосредственной близости от конкретной облучаемой мишени устанавливался гамма-спектрометр ДГЛ на основе высокочистого германия (HPGe). Для подавления потока рассеянных протонов и гамма-фона от системы коллиматоров ДГЛ был защищен со стороны пучка свинцовой защитой толщиной 50 мм (см. рис. 2). В качестве ДГЛ в эксперименте использовался гамма-спектрометр GEM-30182 фирмы ORTEC p -типа. За время исследований на протонном пучке ухудшения спектрального разрешения, вызванного деградацией кристалла под действием нейтронного потока, выявлено не было.

Сцинтилляционные счетчики в составе ДЗЧ включают ФЭУ-85 и пластиковые сцинтилляторы $30 \times 30 \times 4$ мм с пролетной базой 50 мм. Сечение ДЗЧ значительно меньше площади поперечного сечения пучка протонов 80×80 мм и, следовательно, площади всей облучаемой поверхности мишени. Площадь ДЗЧ перекрывала

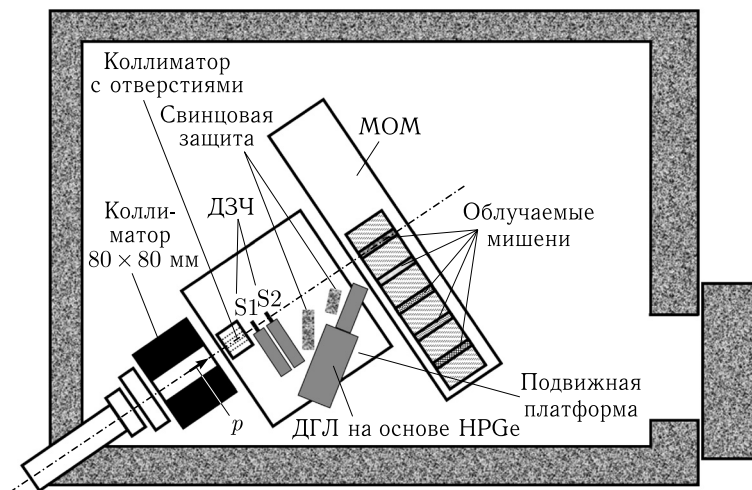


Рис. 2. Схема экспериментальной установки на протонном пучке фазотрона ЛЯП ОИЯИ (Дубна)

примерно 14% сечения пучка, что позволяло имитировать геометрию будущего космического прибора, в котором детектор ДЗЧ выделяет ограниченный телесный угол в потоке ГКЛ.

Чтобы уменьшить интенсивности потока протонов и избежать перегрузки детекторов ДЗЧ, на пути протонного пучка дополнительно к основному коллиматору 80×80 мм был установлен толстый стальной коллиматор с большим числом отверстий (см. рис. 2). Полученная в результате плотность потока падающих на мишень протонов составила $\sim 0,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. ДЗЧ был установлен в центре поперечного сечения пучка протонов перед мишенью и позволял регистрировать время прохождения протонов через детекторы с точностью до 10,42 нс.

Особенностью МОМ является возможность дистанционного позиционирования различных мишеней относительно пучка протонов и контроля этого положения с помощью специализированного программного обеспечения (ПО), системы видеонаблюдения, а также лазерной разметки экспериментальной комнаты. Конструкция МОМ позволяла размещать и перемещать перпендикулярно пучку каждую отдельную облучаемую мишень (рис. 3). В качестве основного материала для МОМ использовалось силикатное стекло толщиной 10 мм, из которого были нарезаны заготовки необходимых размеров. Полученные заготовки складывались одна на другую, образуя практически монолитный массив стекла с полостями, в которые помещались облучаемые мишени. Расстояние между облучаемыми мишенями было выбрано исходя из сечения пучка для гарантированного облучения только одной из них с учетом рассеивания пучка. Конструкция также допускает расположение облучаемых мишеней вплотную друг к другу для имитации резкой переменности грунтов. Максимальный размер массивного блока стекла с облучаемыми мишенями внутри, который допускается устанавливать в конструкцию, составляет $630 \times 90 \times 200$ мм. При этом предельная масса не должна превышать 150 кг (оценочная масса, при которой происходит минимальная деформация конструкции, необходимая для точного позиционирования в пучке). Для создания облучаемых мишеней использовались медные контейнеры с наружными размерами $30 \times 30 \times 200$ мм, формированные ручным методом, с герметизацией швов с помощью припоя ПОС-61. Для изготовления стенок контейнеров был выбран медный

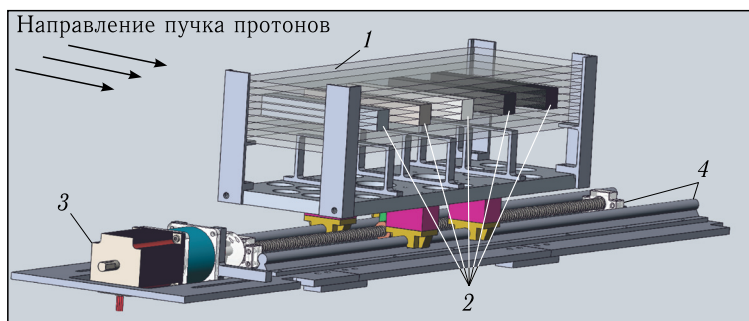


Рис. 3. Схема МОМ в составе ЭУ: 1 — мишень из силикатного стекла; 2 — пять облучаемых мишеней; 3 — шаговый двигатель с редуктором; 4 — шариковинтовая передача с направляющими

лист толщиной 0,5 мм. Медь выбрана в качестве основного вещества стенок контейнеров по трем причинам. Во-первых, медь мало распространена в поверхностных слоях грунта планет. Во-вторых, медь достаточно прочна и технологична для изготовления контейнеров для мишеней. В-третьих, медь имеет относительно небольшое количество характеристических линий гамма-излучения, возникающих при реакциях неупругого рассеяния нейтронов и протонов.

2. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА КГС-МЗЧ

Блок-схема БЭ лабораторного макета прибора КГС-МЗЧ приведена на рис. 4. В состав БЭ входят аналоговый блок обработки сигналов от ДГЛ, цифровой блок обработки сигналов от ДЗЧ и ДГЛ, схема совпадений ДЗЧ и источники высоковольтного напряжения. Высокое напряжение вырабатывалось с помощью двух сдвоенных источников высокого напряжения 0–5 кВ ORTEC 660, установленных в стандартный мини-крейт ORTEC 4006 со встроенным блоком питания и шестью модулями стандарта NIM.

Схема совпадений для ДЗЧ также реализована на модулях стандарта NIM. Сигналы с двух детекторов заряженных частиц S1 и S2 выводились из кабины по кабелям длиной 8 м и подавались на входы быстрых дискриминаторов (Quad 300 MHz discriminator 704) и далее на схему совпадений (Quad 300 MHz majority logic 754) фирмы Phillips Scientific. Поскольку пластиковые сцинтилляторы чувствительны как к протонному, так и к гамма-излучению, то уровни дискриминаторов были подобраны соответствующим образом для регистрации только протонов. Сигналы со счетчиков S1 и S2 и схемы совпадений ДЗЧ регистрировались быстродействующим десятичным

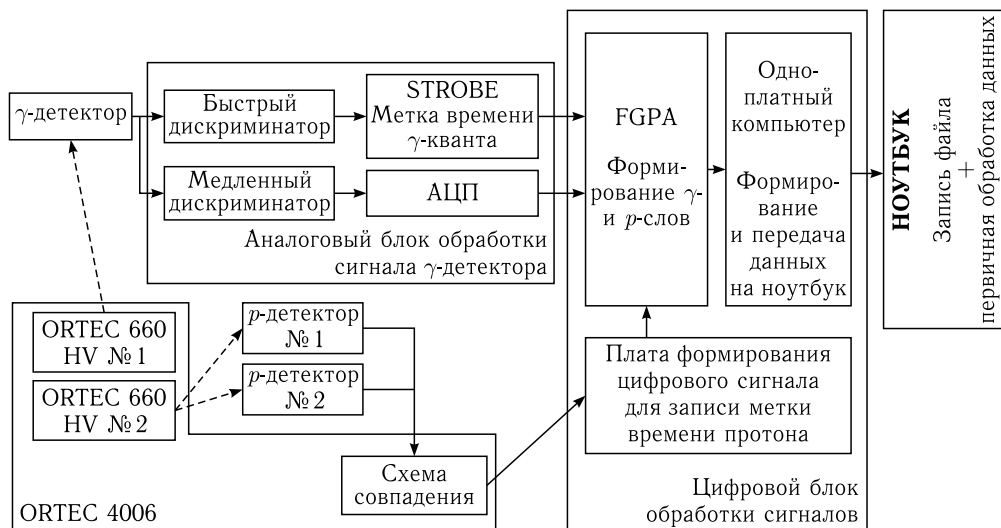


Рис. 4. Блок-схема электроники лабораторного макета прибора КГС-МЗЧ с полупроводниковым детектором

счетчиком с частотой 250 МГц (Quad scaler and preset counter/timer 1145 фирмы CAEN), что позволяло измерять число протонов, прошедших через ДЗЧ за время экспозиции. Сигнал со схемы совпадений ДЗЧ по кабелю длиной около 10 м подавался на вход цифрового блока обработки сигналов. В состав этого блока входят процессорный модуль на базе одноплатного компьютера Adlink Cool SpaceRunner-LX800, узел питания для процессорного модуля, плата с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) и плата формирования цифрового сигнала для записи метки времени для протона. В данном блоке происходит формирование потока данных, которые через интерфейс Ethernet записываются в память подключенного персонального компьютера.

Поскольку метод КГС-МЗЧ предъявляет высокие требования к точности измерения времени регистрации фотонов, были проведены предварительные исследования профилей отсчетов полупроводникового детектора. Известно, что основным отличием таких детекторов от сцинтилляционных является различие во фронтах сигнала. Если для сцинтилляционных детекторов это время определяется временем высвечивания сцинтилляционного излучения в кристалле (16–20 нс для La/CeBr₃), то для полупроводниковых детекторов это время определяется временем дрейфа зарядов к аноду. Время сбора зарядов зависит от линейного размера детектора, от места регистрации гамма-фотона в детекторе и от направления трека ионизации. Эта особенность полупроводникового детектора не позволяет провести достаточно точную привязку момента начала формирования профиля отсчета от гамма-фотона к моменту его физического поглощения в полупроводниковом кристалле — в нашем случае время запаздывания составляло от нескольких наносекунд до 1800 нс.

Вторым следствием особенностей регистрации гамма-лучей в полупроводниковых детекторах является протяженный фронт нарастания профилей сигналов. Для использованного детектора с HPGe время от начала фронта до максимума составляет 250–350 нс. Применение стандартной методики с малым усилением профилей отсчетов в 5–10 раз привело бы к значительной погрешности при определении момента начала регистрации отсчета в зависимости от его величины. Для минимизации этой погрешности был применен канал быстрого дискриминатора: входной сигнал от отсчета усиливался с коэффициентом $\sim 10^4$ и подавался на быстрый дискриминатор с временем обработки < 3 нс (см. рис. 4). Это позволило осуществить привязку времени регистрации фотона к началу профиля сигнала от отсчета с точностью < 10 нс. Метка времени присваивается отсчету в ДГЛ именно по сигналу этого канала. Следует отметить, что усиление с коэффициентом порядка 10^4 потребовало дополнительных мероприятий по снижению помех во всем БЭ.

Условия выработки временной метки регистрации фотона в детекторе ДГЛ иллюстрирует рис. 5. Момент времени $T_{ДЗЧ}$ на верхней шкале соответствует моменту регистрации заряженной частицы в ДЗЧ, а интервал ΔT_0 соответствует физической задержке момента регистрации фотона, который был испущен в мишени под воздействием этой частицы, в ДГЛ (наносекунды). Момент времени $T_{ДГЛ}$ соответствует моменту попадания фотона в рабочий объем детектора ДГЛ: в этот момент происходит поглощение фотона и начинается дрейф образовавшихся носителей заряда к аноду полупроводникового детектора и зарядочувствительному усилителю (ЗЧУ) аналогового тракта. Продолжительность дрейфа зарядов $T_{др}$ зависит от места реакции в детекторе и от его размера. Оно может варьироваться практически от нуля до максимального

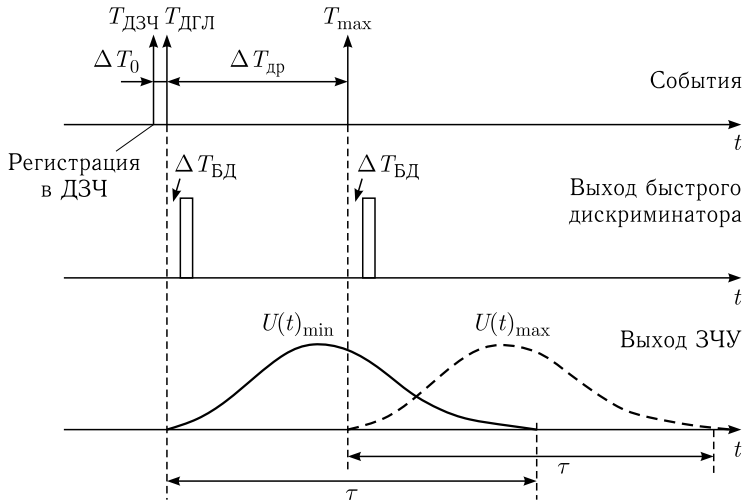


Рис. 5. Временная схема процесса обработки сигналов от отсчетов в ДГЛ

значения T_{\max} около 1800 нс: минимальное время соответствует области поглощения фотона, максимально близкой к аноду, а время T_{\max} — наиболее удаленной области поглощения.

После начала формирования профиля отсчета в быстром дискриминаторе (БД) вырабатывается метка регистрации фотона (см. рис. 5). Задержка $\Delta T_{\text{БД}}$ выработки метки времени относительно начала фронта сигнала составляет менее 10 нс. Таким образом, полное время задержки метки времени для отсчета в ДГЛ относительно метки времени для отсчета в ДЗЧ составляет сумму $\Delta T_0 + T_{\text{др}} + \Delta T_{\text{БД}}$. Переменной величиной в этой сумме является $T_{\text{др}}$.

Таким образом, временная метка регистрации отсчета от фона в детекторе ДГЛ отстает от момента его физической регистрации в полупроводниковом кристалле вследствие двух последовательных задержек: во-первых, начало сбора зарядов в детекторе может отставать относительно момента поглощения фотона в кристалле на время дрейфа $T_{\text{др}}$ от 0 до 1800 нс, во-вторых, пологий фронт профилей отсчетов вносит дополнительную задержку $\Delta T_{\text{БД}}$ около нескольких наносекунд для выработки метки регистрации фотона относительно указанного момента поглощения (см. рис. 5). Это обстоятельство необходимо принимать во внимание при использовании полупроводниковых детекторов в приборах КГС-МЗЧ, в которых спектрометрия гамма-лучей должна проводиться для отсчетов в ДГЛ, отобранных по признаку физической одновременности с регистрацией протонов в ДЗЧ (см. ниже).

Очевидно, что продолжительное время сбора зарядов в германиевом кристалле также необходимо учитывать для обеспечения высокого спектрального разрешения ДГЛ. Если для сцинтилляционных детекторов время высвечивания для формирования профилей отсчетов составляет несколько сотен наносекунд, то для полупроводниковых детекторов необходимое время сбора всех зарядов должно составлять десятки микросекунд. Если в течение этого интервала времени в детекторе произойдет регистрация еще одного фотона или нескольких таких фотонов, то результирующий отсчет приобретет суммарную амплитуду (так называемый эффект наложения). Для

космического спектрометра такое продолжительное время формирования профилей отсчетов от гамма-лучей вполне допустимо, так как ожидаемый темп счета фотонов не превышает 10^2 – 10^3 отсчетов/с (см., например, [14]) — он определяется потоком частиц ГКЛ и размером выделенного объема исследования (рис. 1). Вероятность регистрации второго фотона за время формирования профиля отсчета от ранее зарегистрированного мала, и эффектом наложения можно пренебречь. Однако при измерениях на протонном ускорителе протоны в ДЗЧ регистрируются короткими импульсами, и, соответственно, локальный фон наведенного гамма-излучения также будет носить импульсный характер. Эффект наложения в этом случае приведет к существенному уменьшению статистики отсчетов для узких спектральных линий излучения ядер.

В процессе экспериментальных отработок для медленного спектрометрического канала с последующим амплитудно-цифровым преобразованием (см. рис. 4) было выбрано время сбора заряда τ ДГЛ около 7 мкс, при котором спектральное разрешение составляло 5,2 кэВ для фотонов с энергией 1,33 МэВ. Это разрешение хуже паспортного значения использованного HPGe-детектора в 1,82 кэВ, однако эта компромиссная величина сбора заряда позволила значительно уменьшить мертвое время аналогового тракта и при этом сохранить значительное преимущество в спектральном разрешении HPGe-детектора относительно сцинтилляционного CeBr_3 : у последнего спектральное разрешение при этой энергии составляет около 37 кэВ.

Для анализа амплитуды сигнала, сформированного в медленном канале, применяется плата DEMO 1826A-A на основе 18-битного малошумящего АЦП последовательного приближения LTC2389CLX-18 с неполным использованием его разрядности (12 бит вместо возможных 18). В результате в цифровом блоке обработки сигналов формируется информация двух типов: «фотонные» и «протонные» слова. «Фотонные» слова содержат метку времени прихода гамма-кванта и номер спектрального канала (амплитуду сигнала), а «протонные» слова — только метку времени (сигнал от ДЗЧ является дискретным). Эта информация поступает на ПЛИС, где и формируется поток финальной информации для передачи на лабораторный компьютер для последующей обработки.

«Фотонные» и «протонные» слова имеют 8-байтовую структуру (рис. 6). Первое поле каждого слова содержит временную привязку «фотонного» или «протонного» события с высокой точностью, которая определяется частотой дискретизации работы таймера и составляет 10,42 нс, второе поле — номер измерительного канала (01 — ДГЛ, 08 — ДЗЧ), третье — номер спектрометрического канала для ДГЛ (для ДЗЧ — 0000). Последнее поле содержит контрольную сумму предыдущих трех полей и позволяет проверить достоверность и бесспорность данных всего слова.

Измерение прибором двух независимых последовательностей «протонных» и «фотонных» слов, которые включают метки времени регистрации отсчетов в ДЗЧ и ДГЛ,

4 байта	1 байт	2 байта	1 байт
Метка времени	Номер измерительного канала	Спектрометрический канал	Контрольная сумма

Рис. 6. Структура «байтовых» слов

позволяет реализовать спектрометрию гамма-лучей методом КГС-МЗЧ на этапе применения специальной процедуры обработки результатов измерений. В рамках этой процедуры проводится отбор отсчетов фотонов с метками времени, которые попадают в фиксированный интервал времени совпадения $\Delta T_{\text{сов}}$ после меток протонов, продолжительность которого удовлетворяет условию физического совпадения моментов регистрации протона и фотона в детекторах ДЗЧ и ДГЛ в пределах ΔT_0 (см. рис. 5). При отработке процедуры обработки данных измерений лабораторного макета экспериментально установлено, что максимальная значимость интенсивностей ядерных линий гамма-лучей раннего альбеда наступает при $\Delta T_{\text{сов}}$ около 1800 нс. Эта величина практически совпадает с экспериментально измеренной продолжительностью дрейфа зарядов в кристалле ДГЛ после регистрации фотонов $T_{\text{др}}$ (см. рис. 5).

3. ОБЛУЧАЕМЫЕ МИШЕНИ

Основной целью проведенных экспериментов было моделирование спектрометрии гамма-излучения небесных тел, таких как Марс, Меркурий, Луна, для проверки эффективности метода КГС-МЗЧ с детектором гамма-лучей из высокочистого германия. Вторичное гамма-излучение обусловлено взаимодействием заряженных частиц ГКЛ с ядрами планетного грунта, поэтому для проведения экспериментов на протонном пучке было создано несколько облучаемых мишеней, которые имитировали планетный грунт.

Типичный планетный грунт представляет собой смесь различных оксидов с преобладанием SiO_2 . Содержание SiO_2 обычно колеблется от ~ 50 до 80% по массе, поэтому был создан МОМ, представляющий собой упрощенный аналог планетарной поверхности, в виде сборки из силикатного стекла размерами $630 \times 200 \times 90$ мм (см. рис. 3). Это стекло содержит $\sim 33\%$ Si в виде SiO_2 , $\sim 3\%$ Mg в виде MgO , $\sim 6,5\%$ Ca в виде CaO , $\sim 10\%$ Na в виде Na_2O и $\sim 0,25\%$ K в виде K_2O по массе. Такие концентрации сопоставимы с содержанием данных элементов в марсианских или лунных грунтах. Основное отличие от реальных грунтов состоит в том, что в используемом силикатном стекле содержится лишь малая концентрация других основных породообразующих элементов, таких как Al ($< 1\%$), Fe ($< 0,1\%$) и Ti ($< 0,1\%$).

Результаты обработки данных лабораторных экспериментов состояли в достоверном обнаружении разницы между спектрами гамма-излучения от однородной мишени в виде однородного массива силикатного стекла и от гетерогенной мишени, представлявшей собой массив силикатного стекла со вставками различных облучаемых мишеней, содержащих вещества, имитирующие химический состав планетных грунтов. Возможность обнаружения расхождений между спектрами должна быть проверена методом традиционной гамма-спектрометрии и методом на основе применения КГС-МЗЧ.

Вещества, имитирующие химический состав различных планетных грунтов, были созданы из смесей различных оксидов в пропорциях, близких к тем, которые наблюдаются в марсианских грунтах. Состав марсианских грунтов известен благодаря данным прибора APXS на борту марсохода NASA Curiosity в кратере Гейл. Рентгеновский спектрометр альфа-частиц (APXS) сделал сотни измерений, выявив разно-

Состав 11 облучаемых мишеней, смешанных из порошковых фракций различных химических соединений (в граммах) для имитации марсианских грунтов

Соединение	Грунт											
	Average	Min_Al	Max_Al	Min_Si Max_Ca	Max_Si Max_Ti	Min_Mg	Max_Mg	Min_Ca	Min_Ti	Min_Fe	Max_Fe	
CaCO ₃	10,0	0,0	32,3	65,9	0,3	0,0	24,2	15,2	86,3	84,7	26,4	
CaSO ₄ · 2H ₂ O	46,8	84,2	0,0	134,5	28,3	82,1	0,0	0,0	108,3	122,3	0,0	
MgO	22,7	3,4	9,6	6,1	2,3	8,3	57,6	14,2	9,6	8,8	32,9	
Al ₂ O ₃	30,4	6,8	54,8	6,6	17,1	15,1	12,7	37,9	7,1	7,2	31,9	
Fe	49,0	10,7	20,0	8,8	12,1	39,7	53,0	65,7	11,8	4,9	139,5	
Ti	2,1	2,1	0,7	0,2	3,1	2,2	1,7	2,6	0,3	0,1	2,3	
NaCl	17,0	9,6	38,3	5,8	11,9	16,6	6,1	16,1	6,6	7,0	23,4	
SiO ₂	157,2	204,2	174,8	30,7	235,4	184,5	105,0	203,5	33,2	31,9	155,6	
Cu ₂ S	6,9	1,9	0,0	0,0	4,3	2,1	52,7	26,7	0,0	0,0	5,2	
Всего	342,1	322,9	330,6	258,5	314,9	350,7	313,0	381,9	263,1	266,9	417,2	

образии элементного состава реголита в разных локальных точках [15]. Всего было создано 11 облучаемых мишеней (таблица), имитирующих средний состав марсианского грунта, составы с максимальными и минимальными концентрациями по каждому из следующих элементов: Al, Mg, Si, Ca, Fe, Ti [16–18]. На рис. 3 показано расположение облучаемых мишеней внутри массива силикатного стекла в составе МОМ.

Также были созданы 11 облучаемых мишеней, содержащие окислы редкоземельных элементов (РЗЭ): Eu_2O_3 , Nd_2O_3 , CeO , Dy_2O_3 , Y_2O_3 , La_2O_3 , Pr_6O_{11} , Er_2O_3 , Tm_2O_3 , Gd_2O_3 , Yb_2O_3 . Поиск и отождествление этих элементов в лунном веществе станет в среднесрочной перспективе актуальной задачей для космической гамма-спектроскопии. Доступные данные о характеристических линиях ядерного излучения РЗЭ не полны и не отражают свойства излучения под воздействием ГКЛ (см., например, [21]), поэтому применение полупроводниковых детекторов для их измерений вполне оправданно. С другой стороны, предложенный метод построения меченых спектров должен обеспечить благоприятные возможности для измерений ядерных линий от РЗЭ с максимальной достоверностью, так как он позволяет значительно понизить вклад фонового излучения от окружающего вещества и обеспечить высокое пространственное разрешение. Поэтому экспериментальные исследования лабораторного макета КГС-МЗЧ на пучке протонов также включали спектрометрические измерения гамма-лучей от облучаемых мишеней с редкоземельными элементами.

4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИМЕР ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для обработки собранных экспериментальных данных было создано программное обеспечение, позволяющее получать как *интегральные спектры* всех зарегистрированных в ДГЛ фотонов, так и *меченые спектры* для фотонов, зарегистрированных во временном окне продолжительностью от нескольких сотен до 1800 нс относительно момента регистрации протона в ДЗЧ. Величины задержки подбирались экспериментально исходя из особенностей HPGe-детектора, геометрии эксперимента и временных задержек в аналоговых электронных трактах. Это позволило проводить эксперимент одновременно для двух режимов измерений — интегрального и меченого.

Для интегрального режима все зарегистрированные гамма-фотоны суммировались в один гамма-спектр независимо от времени регистрации. Очевидно, что интегральный спектр содержит информацию как о фотонах от облучаемой протонами мишени, так и о локальном гамма-фоне от всей ЭУ и от всего помещения, в котором проводился эксперимент. В интегральном режиме работают большинство гамма-спектрометров на борту космических аппаратов: в таких измерениях излучение от всей поверхности небесного тела и фоновое излучение от КА складываются. Разделение между ними может быть проведено только косвенно на основе данных физических калибровок на Земле и в космосе и численного моделирования.

Для меченого режима при построении спектра гамма-лучей суммируются только отсчеты от фотонов, зарегистрированных в ДГЛ в коротком временном окне совпадения, задержанном на необходимый временной интервал относительно момента регистрации протона в детекторах ДЗЧ. В этом режиме измерений формируется спектр гамма-лучей раннего альбеда, основной вклад в который вносят фотоны, образовав-

шиеся в результате реакций неупругого рассеяния в той части объема толстой мишени, которая перекрывается полной апертурой ДЗЧ в пределах поперечного сечения протонного пучка.

4.1. Измерения с облучаемыми мишенями, имитирующими состав марсианского грунта. В результате проведенных измерений были получены полные и меченые спектры гамма-лучей для различных облучаемых мишеней, имитирующих состав марсианских грунтов (см. разд. 3). Все интегральные гамма-спектры, измеренные при облучении пучком протонов массива стекла с указанными облучаемыми мишенями, совпадают друг с другом в пределах статистических погрешностей. Этот результат объясняется тем, что в интегральном режиме регистрируются все гамма-лучи, рожденные не только в веществе облучаемой мишени, но и в силикатном стекле, окружающем облучаемую мишень, а также в стенах экспериментального зала и элементах конструкции ЭУ. Масса облучаемой мишени составляет очень малую долю от массы всего вещества, которое излучает гамма-лучи, регистрируемые в интегральном спектре. Кроме того, во многих случаях химические элементы, входящие в состав облучаемой мишени, также содержатся в ЭУ, в окружающих предметах, в веществе стен, пола и потолка. Поэтому вариации характеристических ядерных линий в интегральном спектре при смене облучаемой протонами мишени становятся статистически неразличимы при большом постоянном фоне. С другой стороны, меченые спектры позволяют при смене облучаемой мишени различить вариации интенсивности ядерных линий основных порообразующих элементов даже в том случае, если их концентрация различается незначительно. Это связано с тем, что метод КГС-МЗЧ в основном отбирает для спектрометрии только фотоны, регистрируемые в ДГЛ от облучаемой мишени. Это достоинство КГС-МЗЧ было подтверждено экспериментально на ЭУ, в которой применялся сцинтилляционный детектор гамма-лучей с предельно коротким временем регистрации отсчетов (см. [12]). Благодаря быстройдействию сцинтилляционного детектора CeVg_3 отбор меченых фотонов проводился по критерию предельно короткого запаздывания относительно меток протонов, в пределах 80 нс. Ниже обсуждается возможность успешной реализации эксперимента по методу КГС-МЗЧ с применением полупроводникового детектора гамма-лучей, который имеет более продолжительное время регистрации отдельных отсчетов (см. разд. 2).

В качестве иллюстрации была рассмотрена реализация метода КГС-МЗЧ с полупроводниковым детектором для оценки разного содержания алюминия в облучаемых мишенях, имитирующих состав марсианского грунта. Алюминий — это один из основных порообразующих элементов, а переменность его концентрации в марсианском грунте может указывать на присутствие различных гидратированных минералов, образовавшихся в прошлую эпоху в водной среде, и тем самым служить маркером, показывающим, как менялся климат на Марсе.

На рис. 7 представлены результаты измерений, когда внутри массива стекла располагались облучаемые мишени марсианского вещества с минимальным и максимальным содержанием алюминия (см. таблицу). Результаты этих измерений сопоставляются с результатами измерений чистого массива стекла — эта конфигурация имитирует однородный марсианский грунт без пространственных неоднородностей его состава. В качестве реперной линии алюминия была выбрана ядерная линия 1369 кэВ. Из рис. 7 видно, что чистое стекло также излучает гамма-лучи в ядерной линии 1369 кэВ, так как в его составе присутствует $\sim 1,5\%$ по массовой доле оксида алю-

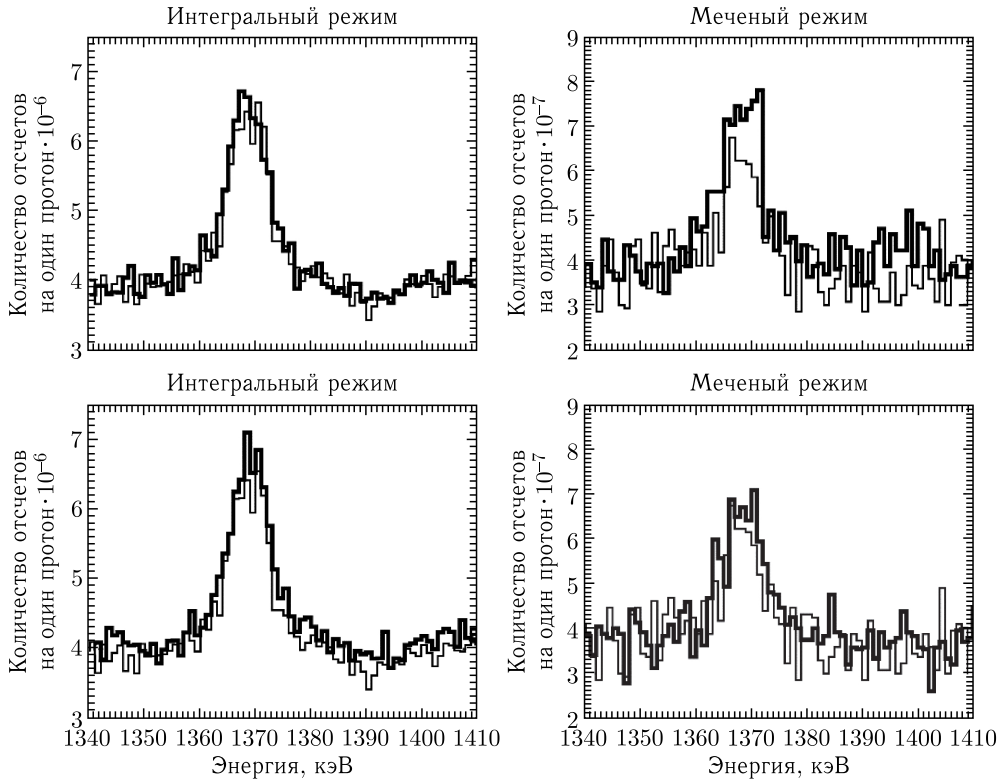


Рис. 7. Темп счета гамма-фотонов от облучаемых мишеней с минимальным (нижние графики, толстая линия) и максимальным (верхние графики, толстая линия) содержанием алюминия и мишени, полностью состоявшей из стекла (тонкая линия на всех графиках). Измерения сделаны в интегральном (левая колонка) и меченом (правая колонка) режимах

миния. Для интегрального спектра эта ситуация ухудшается еще тем, что алюминий присутствует в окружающих элементах конструкции установки и блока детектора. Хорошо видно, что интегральный спектр не позволяет отличить фоновый спектральный пик при энергии 1369 кэВ от спектрального пика при этой же энергии для облучаемой мишени, даже если использовалась мишень с максимальным содержанием алюминия, которое можно ожидать на Марсе (см. рис. 7, левый верхний и левый нижний графики). В то же время при переходе в меченый режим измерений облучаемые мишени с минимальным и максимальным содержанием алюминия можно значимо отличить друг от друга (см. рис. 7, правый верхний и правый нижний графики).

Подобную ситуацию можно ожидать и в космическом эксперименте, поскольку конструкция посадочного аппарата также в основном состоит из алюминиевого сплава. Это означает, что интегральные спектрометрические измерения непригодны для отождествления небольших участков на поверхности с аномальным содержанием алюминия, вдоль которых может проезжать марсоход.

На рис. 8 показано, как интенсивность линии алюминия меняется в зависимости от массы алюминия в облучаемых мишенях марсианского реголита с разным

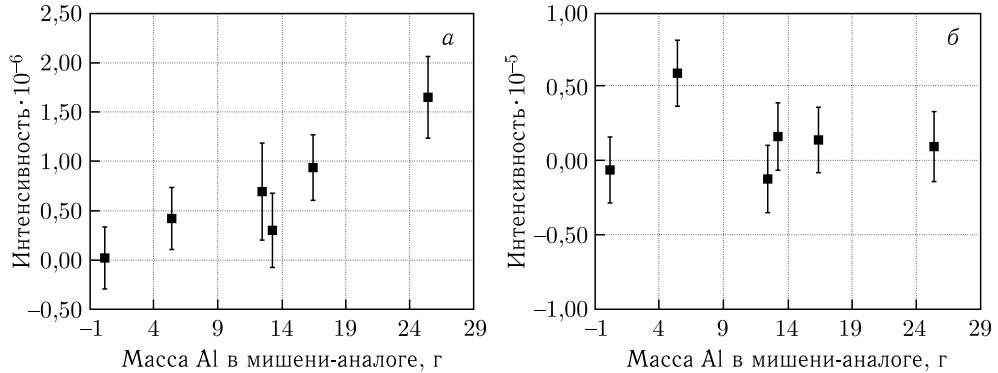


Рис. 8. Разности интенсивностей спектральной линии алюминия 1369 кэВ, измеренных для МОМ с облучаемыми мишенями с разным содержанием алюминия, и для интенсивности указанной линии, измеренной для чистого массива стекла, для меченого (а) и интегрального (б) режимов измерений соответственно

составом. В составе МОМ были измерены мишени с массовой долей алюминия от 4 до 24%. По оси Y отложена разность интенсивностей спектрального пика алюминия с энергией 1369 кэВ, измеренных для МОМ с облучаемыми мишенями с различным содержанием алюминия и для чистого массива стекла. После вычитания остается только линия, интенсивность которой характеризует количество алюминия в облучаемой мишени. Статистическая значимость этой величины показывает, насколько выбранный режим измерений (интегральный или меченый) позволяет отличить неоднородную мишень МОМ с небольшой вставкой из аналога марсианского грунта от однородной мишени, состоящей целиком из стекла.

При измерениях в меченом режиме наблюдается сильная линейная корреляция между интенсивностью пика 1369 кэВ и количеством алюминия в облучаемой мишени. С другой стороны, аналогичный анализ, проведенный для пика 1369 кэВ в интегральном спектре, показывает, что какая-либо статистически значимая связь между интенсивностью пика и количеством алюминия в облучаемой мишени отсутствует — линия «тонет» в статистических ошибках, возникающих при регистрации фонового излучения. Это означает, что в космическом эксперименте для детектирования ядерных линий, принадлежащих основным порообразующим элементам, меченый режим измерения КГС-МЗЧ дает существенное преимущество даже в случае применения полупроводникового детектора гамма-лучей с длительным временем обработки отсчетов от фотонов.

4.2. Измерения с облучаемыми мишенями, содержащими редкоземельные элементы. Кроме сложных мишеней, состоящих из массива стекла со вставками облучаемых мишеней, имитирующих марсианские грунты, на экспериментальной установке проводились измерения с облучаемыми мишенями, содержащими редкоземельные элементы (РЗЭ), см. разд. 3. Известно, что повышенное содержание редкоземельных элементов было обнаружено в лунных морях. Это показали данные анализа образцов лунного грунта, привезенных с Луны американскими и советскими миссиями, и данные последующих орбитальных наблюдений (см. [19–21]). Ожидается, что будущие исследования будут направлены не только на изучение элементного состава

и геохимии лунной поверхности, но и на поиск различных лунных ресурсов, которые могут быть востребованы на Земле. Потребность в редкоземельных элементах возрастает с каждым годом в связи с их активным использованием в высокотехнологичных областях, и спрос может существенно превысить разведанные запасы. Поэтому геологоразведка лунных ресурсов в числе приоритетных задач будет включать поиск залежей редкоземельных элементов, а гамма-спектроскопия может использоваться как один из эффективных инструментов для такого поиска.

Основной целью эксперимента на протонном пучке было изучение возможности применения стандартного метода гамма-спектрометрии и метода на основе КГС-МЗЧ с полупроводниковым детектором для поиска РЗЭ. При облучении протонным пучком мишеней с окислами РЗЭ исследовались характерные спектральные линии гамма-лучей, которые могут излучаться ядрами РЗЭ в лунном веществе под воздействием ГКЛ.

Ниже на рис. 9 в качестве примера представлены спектры, полученные в интегральном и меченом режимах измерений при облучении протонами МОМ, в котором

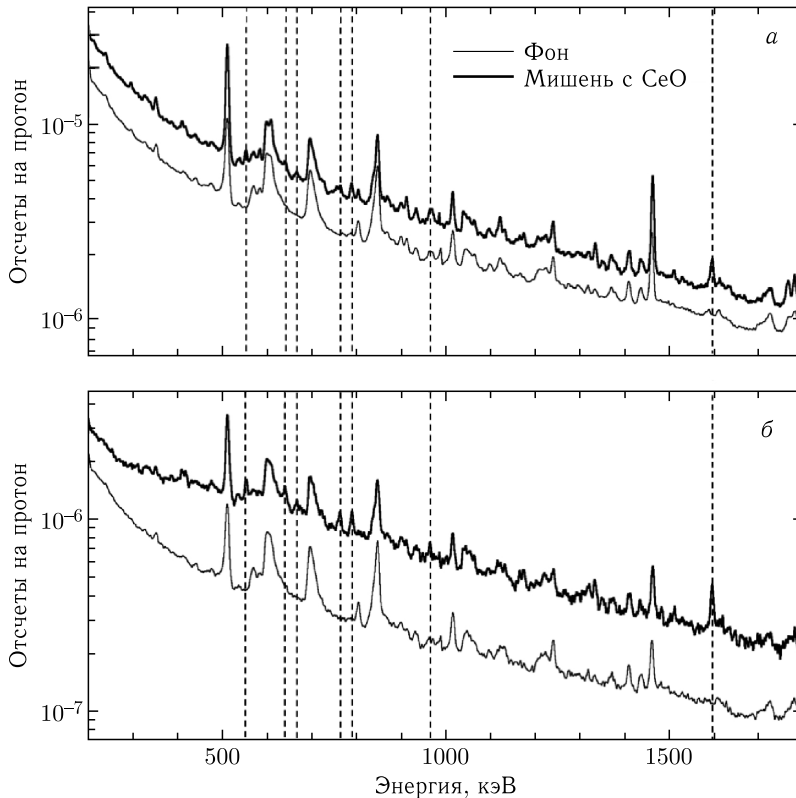


Рис. 9. Спектры гамма-излучения, полученные для мишени с оксидом церия (толстая линия) и при измерении фона (тонкая линия) для интегрального (а) и меченого (б) режимов измерений ЭУ. Штриховыми линиями показаны значимые спектральные пики, которые возникают при облучении протонами мишени с оксидом церия

установлена облучаемая мишень с наполнением из оксида церия. Также на рис. 9 показаны спектры фонового излучения от МОМ из чистого стекла. На рисунке хорошо видны несколько значимых спектральных пиков, которые есть в спектре МОМ с облучаемой мишенью из оксида церия и отсутствуют в спектре фона (553, 641, 666, 763, 789, 964 и 1594 кэВ). Эти линии могут служить признаком присутствия церия в лунном веществе.

Для более детального анализа были выбраны два спектральных пика при энергиях ~ 763 и 1594 кэВ (рис. 10 и 11). На этих рисунках показаны результаты аппроксимации, выполненной с помощью одной или суммы двух функций Гаусса, для определения интенсивности обнаруженных гамма пиков и темпа счета в подстилающем континууме. Линия с энергией 1594 кэВ образуется при снятии возбужденного состояния ядра основного изотопа ^{140}Ce , возникающего при неупругом рассеянии нейтрона

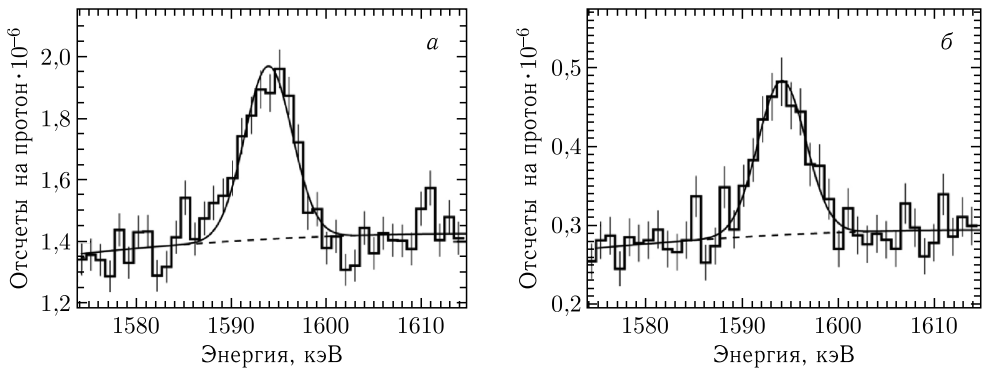


Рис. 10. Спектральная особенность в районе 1594 кэВ, обнаруженная в интегральном (а) и меченом (б) спектрах гамма-излучения. Также показана аппроксимация спектрального пика с помощью функции Гаусса (тонкая сплошная линия) и континуума с помощью полиномиальной функции (штриховая линия)

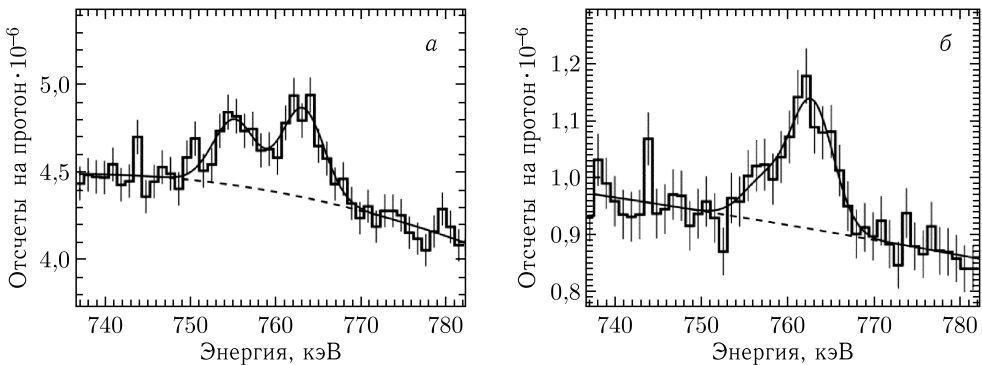


Рис. 11. Спектральная особенность в районе 763 кэВ, обнаруженная в интегральном (а) и меченом (б) спектрах гамма-излучения. Также показана аппроксимация пика с помощью двух функций Гаусса (тонкая сплошная линия) и континуума с помощью полиномиальной функции (штриховая линия)

или протона. Это одна из самых интенсивных ядерных линий церия, занесенная в каталог линий от реакций неупругих столкновений (см. [22]). Из рис. 10 и 11 хорошо видно, что соответствующий спектральный пик имеет очень высокую значимость как в меченом, так и в интегральном режимах измерений.

Пик в окрестности 763 кэВ имеет более сложную природу. Он не занесен в каталог ядерных линий (см. [22]) и может образовываться в различных ядерных реакциях, например в реакции $^{140}\text{Ce}(p, n\gamma)^{140}\text{Pr}$ с образованием нестабильного изотопа ^{140}Pr в возбужденном состоянии или в реакции $^{140}\text{Ce}(p, 2p2n\gamma)^{137}\text{La}$ с образованием нестабильного изотопа ^{137}La в возбужденном состоянии. В интегральном спектре на него накладывается спектральный пик с энергией ~ 756 кэВ (см. рис. 11, а). Его происхождение связано с образованием метастабильного изотопа ^{139}Ce , время жизни которого составляет 57,6 с. В меченом спектре этот пик отсутствует (рис. 11, б), так как в меченом режиме спектральных измерений отбираются только фотоны раннего альбеда с коротким временем излучения после реакции взаимодействия с протонами. И в интегральном, и в меченом спектрах спектральная особенность 763 кэВ является значимой, но при измерениях в меченом режиме ее значимость значительно выше, чем в интегральном: около 6 и 8 стандартных отклонений соответственно.

Таким образом, применение спектрометрического детектора с высокочистым германием, имеющего как интегральный, так и меченый режимы измерений, предоставляет возможность поиска характеристических линий гамма-лучей от РЗЭ в лунном веществе, а также отождествления этих линий с различными реакциями, происходящими с ядрами РЗЭ во время взаимодействия с протонами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте с лабораторным макетом космического гамма-спектрометра КГС-МЗЧ с полупроводниковым детектором из высокочистого германия было установлено, что такой тип прибора, вероятно, является наиболее эффективным для исследований пространственной переменности состава вещества поверхности небесного тела с борта мобильного посадочного аппарата. Высокое спектральное разрешение высокочистого германия позволяет обнаружить ядерные линии с максимальной чувствительностью для детектора с заданной массой, а применение метода МЗЧ дает возможность максимально повысить пространственное разрешение гамма-спектрометрии поверхности и исключить собственный фон от космического аппарата и от удаленных участков поверхности.

Благодарности. Авторы благодарят коллектив отдела фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ за обеспечение экспериментальной работы авторов на протонном ускорителе ОИЯИ и Российский научный фонд за поддержку исследований, результаты которых представлены в данной статье (грант РНФ № 18-12-00487).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adler I., Trombka J.I.* Orbital Chemistry — Lunar Surface Analysis from the X-Ray and Gamma Ray Remote Sensing Experiments // *Phys. Chem. Earth.* 1977. V. 10. P. 17–43.
2. *Evans L. G., Reedy R. C., Starr R. D. et al.* Analysis of Gamma Ray Spectra Measured by Mars Odyssey // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2006. V. 111. P. E03S04.

3. *Feldman W. C., Barraclough B. L., Fuller K. R., Lawrence D. J., Maurice S., Miller M. C., Prettyman T. H., Binder A. B.* The Lunar Prospector Gamma-Ray and Neutron Spectrometers // *Phys. Res. A.* 1999. V. 422, Iss. 1–3. P. 562–566.
4. *Prettyman T. H., Feldman W. C., McSween H. Y., Jr., Dingler R. D., Enemark D. C., Patrick D. E., Storms S. A., Hendricks J. S., Morgenthaler J. P., Pitman K. M., Reedy R. C.* Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 163. P. 371–459.
5. *Vinogradov A. P., Surkov Yu. A., Chernov G. M., Kirnozov F. F., Nazarkina G. B.* Measurements of Gamma Radiation of the Lunar Surface by the Luna-10 Space Station // *Cosmic Res.* 1966. V. 4. P. 751.
6. *Аникин А. А., Дьячкова М. В., Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Мокроусов М. И., Никифоров С. Ю., Санин А. Б.* Перспективный эксперимент с гамма-спектрометром на борту мобильного космического аппарата для изучения элементного состава вещества Луны, Марса и других небесных тел без атмосферы или с тонкой атмосферой // *Косм. исслед.* 2021. Т. 59, № 1. С. 44–50.
7. *Митрофанов И. Г., Головин Д. В., Санин А. Б. и др.* Результаты экспериментальной верификации гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами на протонном пучке ускорителя ОИЯИ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2019. Т. 16, № 3. С. 233–239.
8. *Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Nikiforov S. Y., Golovin D. V., Djachkova M. V., Anikin A. A., Karpushkina N. E., Lisov D. I., Litvak M. L., Mokrousov M. I., Dubasov P. A., Zontikov A. O., Starr R. D.* Cosmic Gamma-Ray Spectrometer with Tagged Charged Particles of Galactic Cosmic Rays // *Nucl. Instr. Meth.* 2020. V. 953. P. 163148.
9. *Аникин А. А., Митрофанов И. Г., Головин Д. В. и др.* Перспективный прибор «Космический гамма-спектрометр с мечеными заряженными частицами» (КГС-МЗЧ) для изучения Луны, Марса и других небесных тел Солнечной системы методами ядерной физики // *Тр. 16-й конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования».* М.: ИКИ РАН, 2019. С. 5–10.
10. *Аникин А. А., Митрофанов И. Г., Головин Д. В., Санин А. Б., Никифоров С. Ю., Дьячкова М. В., Лисов Д. И., Литвак М. Л., Мокроусов М. И., Тимошенко Г. Н., Швецов В. Н.* Перспективный эксперимент с гамма-спектрометром на борту мобильного космического аппарата для изучения элементного состава вещества Луны, Марса и других небесных тел без атмосферы или с тонкой атмосферой // *Тр. XVII конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования».* Сер. «Механика, управление, информатика» / Под ред. А. М. Садовского. М., 2020. С. 5–13.
11. *Аникин А. А., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Санин А. Б., Мокроусов М. И., Никифоров С. Ю.* Экспериментальная установка для тестирования перспективного космического гамма-спектрометра с мечеными заряженными частицами для изучения элементного состава вещества Луны, Марса и других небесных тел без атмосферы или с тонкой атмосферой // *Тр. XVIII конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования».* М., 2021. С. 5–12.
12. *Quarati F. G. A., Dorenbos P., van der Biezen J. et al.* Scintillation and Detection Characteristics of High-Sensitivity CeBr₃ Gamma-Ray Spectrometers // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2013. V. 729. P. 596–604.
13. *Kozyrev A., Mitrofanov I., Owens A. et al.* A Comparative Study of LaBr₃(Ce³⁺) and CeBr₃ Based Gamma-Ray Spectrometers for Planetary Remote Sensing Applications // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87. P. 085112.
14. *Evans L. G., Reedy R. C., Starr R. D., Kerry K. E., Boynton W. V.* Analysis of Gamma Ray Spectra Measured by Mars Odyssey // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. E03S04.

15. Berger J. A. et al. Elemental Composition and Chemical Evolution of Geologic Materials in Gale Crater, Mars: APXS Results from Bradbury Landing to the Vera Rubin Ridge // J. Geophys. Res.: Planets. 2020. V. 125. P. e06536.
16. Mitrofanov I. G. et al. First Results for Laboratory Tests of a Concept of Space Gamma-Spectrometer with Tagged Protons Method at the JINR Particle Accelerator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16. P. 251–255.
17. Mitrofanov I. G. et al. Gamma Spectrometry of Composite Models of Planetary Matter on the JINR Accelerator Proton Beam with Tagged Protons // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 348–357.
18. Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Sanin A. B., Anikin A. A., Mokrousov M. I., Golovin D. V., Nikiforov S. Y., Timoshenko G. N., Shvetsov V. N. Laboratory Demonstration of Space Experiment for Spectrometry of Planetary Gamma-Rays with Tags of Galactic Cosmic Rays Producing Them // Nucl. Instr. Meth. A. 2021. V. 1003. P. 165286.
19. Haskin L. A., Allen R. O., Helmke P. A., Paster T. P., Anderson M. R., Korotev R. L. Rare-Earths and Other Trace Elements in Apollo 11 Lunar Samples // Geochim. Cosmochim. Acta Suppl. V. 1. Proc. of the Apollo 11 Lunar Sci. Conf. Houston, TX, 1970. V. 2. Chemical and Isotope Analyses / Ed. by A. A. Levinson. New York: Pergamon Press, 1970. P. 1213.
20. Nguyen L.-D., de Saint Simon M., Puil G., Yokoyama Y. Rare Earth Elements in Luna 20 Soils and Their Implications for Cosmochemistry // Proc. of the Lunar Sci. Conf. 1973. V. 4. P. 1415.
21. Binder A. B. Lunar Prospector: Overview // Science. 1998. V. 281(5382). P. 1475–1476.
22. Демидов А. М., Говор Л. И., Черепанцев Ю. К., Ахмед М. Р., аль-Наджар С., аль-Амили М. А., аль-Ассафи Н., Раммо Н. Атлас спектров гамма-излучения от неупругого рассеяния быстрых нейтронов реактора. М.: Атомиздат, 1978. 328 с.

Получено 29 ноября 2022 г.