

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА С МЕЧЕНЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ УСКОРИТЕЛЯ ОИЯИ

*И. Г. Митрофанов^{а,1}, Д. В. Головин^а, А. Б. Санин^а, С. Ю. Никифоров^а,
А. А. Аникин^а, М. В. Дьячкова^а, Н. Е. Карпушкина^а, Д. И. Лисов^а,
М. Л. Литвак^а, М. И. Мокроусов^а, Г. Н. Тимошенко^б, А. Р. Крылов^б,
В. Н. Швецов^б, Г. В. Мицын^б, А. Г. Молоканов^б*

^а Институт космических исследований РАН, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены первые результаты лабораторных испытаний макета космического гамма-спектрометра на фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с мечеными заряженными частицами на протонном пучке. Экспериментально подтвержден факт значительного повышения чувствительности прибора для регистрации гамма-линий основных породообразующих элементов небесных тел в случае отбора сигналов спектрометра по критерию совпадения с протонами, которые вызывают вторичное гамма-излучение в толстой мишени — аналоге планетного вещества.

This article presents first results of laboratory tests of a concept of space gamma-spectrometer with tagged protons method at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems of JINR. There are given results of a significant increase in the sensitivity of the gamma-ray instrument for the main rock-forming elements of celestial bodies in case of selecting spectrometer signals according to the criterion of coincidence with protons, which cause secondary gamma radiation in a thick target as an analogue of planetary matter.

PACS: 07.85.Nc; 29.30.Kv; 29.40.Mc; 29.40.Wk; 29.30.Hs

ВВЕДЕНИЕ

Небесные тела без атмосферы или с тонкой атмосферой испускают с поверхности собственное нейтронное излучение и гамма-излучение, которое возникает в верхнем слое поверхности толщиной несколько десятков сантиметров под воздействием потоков высокоэнергетических заряженных частиц от галактических космических лучей (ГКЛ) и спорадических солнечных протонных событий (СПС). В энергетических спектрах гамма-излучения присутствуют линии, связанные с переходом в основное состояние возбужденных ядер основных породообразующих элементов в результате ядерных реакций с первичными и вторичными частицами ГКЛ и СПС, а также с излучением природных и

¹E-mail: imitrofa@space.ru

вторичных радиоактивных изотопов. Известно, что каждое ядро имеет вполне определенный набор спектральных линий гамма-излучения с известными энергиями (так называемые характеристические эмиссионные линии), поэтому отождествление таких линий и измерение их интенсивности позволяет установить ядерный состав вещества.

Метод гамма-спектрометрического анализа состава поверхности небесных тел неоднократно использовался для изучения Луны, Марса, Меркурия и астероидов [1]. Основная особенность таких измерений, которая затрудняет интерпретацию полученных данных, заключается в неизбежном присутствии в спектре гамма-лучей вклада от фонового гамма-излучения самого космического аппарата, на борту которого установлен гамма-спектрометр. Эта особенность превращается в серьезную проблему при измерении массовой доли в веществе таких элементов, как водород, углерод, кислород, кремний, магний, алюминий, титан и др., так как они содержатся в материале космического аппарата. Наложение характеристических эмиссионных линий излучения от поверхности небесного тела и от аппарата не позволяет достоверно измерить концентрацию ядер в планетном веществе. Особенно сильно влияние такого фона проявляется в случае посадочного аппарата, гамма-спектрометр которого измеряет спектр с ограниченного участка поверхности, непосредственно прилегающей к аппарату.

В рамках проекта № 18-12-00487 Российского научного фонда был предложен метод «меченых заряженных частиц», позволяющий создать космический гамма-спектрометр с мечеными заряженными частицами (КГС-МЗЧ), который будет регистрировать спектры гамма-излучения от выделенного объема вещества небесного тела и позволит практически полностью исключить вклад гамма-лучей как от космического аппарата, так и от удаленных участков поверхности. Физическая концепция такого гамма-спектрометра основана на включении в его состав телескопа детекторов заряженных частиц (ТЗЧ), который должен быть расположен над исследуемым участком поверхности. ТЗЧ фиксирует частицы ГКЛ или СПС, которые попадают в объем вещества небесного тела непосредственно под ним. Величина этого объема определяется пробегом частиц ГКЛ и СПС в веществе, диффузией вторичных нейтронов и гамма-квантов в веществе и поглощением в веществе последних. Границы объема примерно соответствуют геометрическому фактору ТЗЧ (геометрический фактор телескопа определяет пространственную совокупность всех направлений прихода регистрируемых частиц). Регистрация каждой частицы в ТЗЧ сопровождается меткой времени с точностью до нескольких наносекунд.

Гамма-кванты регистрирует детектор гамма-квантов (ДГ), причем для каждого импульса фиксируется время его регистрации с точностью до нескольких наносекунд. В результате в приборе формируются две независимые временные последовательности отсчетов в ТЗЧ и ДГ. В зависимости от выбранной логико-временной схемы прибора эти последовательности могут непосредственно передаваться по радиоканалу на Землю или предварительно обрабатываться на борту. В обоих случаях на основе заданного критерия совпадения (разрешающего времени) из последовательности отсчетов в ДГ формируется выборка, для которой выполняется условие совпадения с отсчетами в ТЗЧ. Очевидно, что построение спектра таких событий позволит измерить гамма-линии только от тех ядер, которые находятся в указанном выше объеме вещества планеты. При этом следует учитывать, что предложенный метод хорошо работает при измерении гамма-квантов от реакций неупругого рассеяния вторичных быстрых нейтронов на ядрах вещества, так как в этом случае время от момента регистрации протонов до момента регистрации фотонов составляет несколько десятков наносекунд.

Очевидно, что для части отсчетов в ДГ критерий совпадения окажется выполненным случайно (фон случайных совпадений). Основное преимущество предложенного метода состоит в том, что фон случайных совпадений оказывается существенно меньше, чем фон одиночного гамма-спектрометра, в том числе из-за сильного подавления фона от космического аппарата.

Разработка и лабораторное макетирование КГС-МЗЧ проводится в рамках проекта № 18-12-00487 Российского научного фонда. Представлены описание и результаты первого этапа лабораторного макетирования эксперимента с КГС-МЗЧ. Задачей этого этапа является лабораторная отработка методики измерений гамма-лучей с «мечеными заряженными частицами» на фазотроне Объединенного института ядерных исследований.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторное макетирование прибора КГС-МЗЧ проводилось на медицинском пучке протонов с энергией 160 МэВ в 1-й терапевтической кабине Медико-технического комплекса фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Пучок протонов ускорителя с энергией 660 МэВ тормозится в углеродном поглотителе. В процессе взаимодействия с поглотителем пучок загрязняется вторичными частицами, при этом увеличивается фазовый объем пучка. Поэтому при формировании пучка с энергией 160 МэВ применяется магнитный анализ, за счет которого пучок очищается от вторичных частиц и протонов с энергиями, существенно отличающимися от средней энергии. Ширина на полувысоте энергетического распределения пучка на входе в кабину около 10 МэВ. Системой коллиматоров формируется однородное поле облучения размерами 8×8 см. Для измерения тока пучка используется ионизационная мониторинговая камера. При медленном выводе пучка длительность его растяжки составляет 3,5 мс и пауза 0,5 мс, пучок имеет также временную микроструктуру с периодом около 70 нс.

Схема установки для макетирования прибора показана на рис. 1. Установка состоит из системы формирования пучка, телескопа сцинтилляционных счетчиков, мишени, моделирующей планетарный грунт, и гамма-спектрометра. Протоны пучка проходят через ряд коллиматоров, последний из которых представляет собой пластину из стали толщиной по пучку 9 см, что превышает пробег 160 МэВ протонов. Отверстие в этой пластине имеет диаметр 1 см, что снижает интенсивность пучка протонов за ним до 10^5 с^{-1} при работе кабины в штатном режиме.

Непосредственно за коллиматором располагался телескоп из двух сцинтилляционных счетчиков S_1 и S_2 на основе ФЭУ-85 с пластиковыми сцинтилляторами размерами $40 \times 40 \times 3$ мм и пролетной базой 5 см. За телескопом на пучке устанавливалась мишень из силикатного стекла в виде параллелепипеда с поперечными размерами $\sim 20 \times 20$ см и толщиной по пучку 20–25 см. Сбоку от мишени вплотную к ней устанавливался сцинтилляционный гамма-спектрометр с кристаллом из бромида церия размерами $\varnothing 3 \times 3''$. Для подавления гамма-фона спектрометра от реакций захвата медленных нейтронов в стенах и потолке кабины сцинтилляционный датчик спектрометра закрывался слоями свинца толщиной 5 см (кроме торца детектора, обращенного к мишени).

Сигналы со счетчиков телескопа выводились из кабины по кабелям длиной 8 м и подавались на входы быстрых дискриминаторов в стандарте NIM (Quad 300 MHz discriminator 704) и далее на схему совпадений (Quad 300 MHz majority logic 754) фирмы

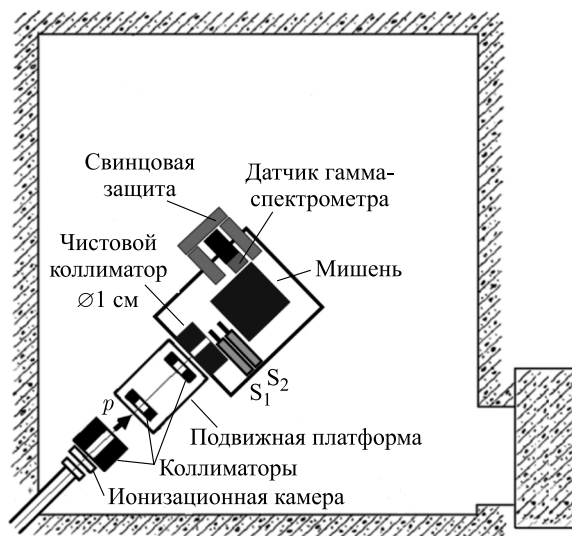


Рис. 1. Лабораторная установка на медицинском пучке протонов фазотрона ЛЯП для отработки методики измерений в эксперименте с прибором КГС-МЗЧ

Phillips Scientific. Пороги дискриминаторов были подобраны таким образом, чтобы регистрировать только протоны пучка. Разрешающее время схемы совпадений, измеренное на пучке протонов по кривой совпадений, составило 60 нс, но поскольку протоны пучка проходят через оба сцинтиллятора практически одновременно, то сигнал совпадений точно коррелирован по времени с этим событием. Далее сигнал со схемы совпадений конвертировался в уровень транзисторно-транзисторной логики и по кабелю длиной 10 м подавался на вход управления блока гамма-спектрометра. Сигналы со счетчиков S_1 и S_2 и схемы совпадений регистрировались быстродействующим (250 МГц) десятичным счетчиком (Quad scaler and preset counter/timer 1145 фирмы CAEN), что позволяло точно измерять число протонов, прошедших через мишень за время экспозиции. В ходе эксперимента интенсивность коллимированного пучка протонов поддерживалась на уровне не более 10^5 с^{-1} , при этом просчеты электронной аппаратуры практически отсутствовали.

При подтверждении факта прихода протона в мишень в логико-цифровом блоке вырабатывается байтовое слово «протон», в котором записывается цифровой код времени регистрации события с учетом времени пролета протона от телескопа до мишени с точностью до наносекунды. При регистрации гамма-квантов в ДГ для каждого события вырабатывается байтовое слово «фотон», в котором записывается цифровой код его амплитуды и время регистрации в ДГ с точностью до наносекунды.

В мишени могут формироваться мгновенные гамма-кванты в результате ядерных реакций, а также задержанные гамма-кванты от реакций неупругого рассеяния на ядрах мишени быстрых вторичных нейтронов. Поскольку размеры мишени малы, то термализоваться в ней быстрые нейтроны не успевают, и вклад в показания спектрометра от гамма-квантов, возникающих в реакциях захвата медленных нейтронов ядрами мишени, незначителен. В целом можно ожидать, что регистрация гамма-квантов из мишени детектором гамма-спектрометра может быть задержана по времени относительно момента

пролета протонов через телескоп счетчиков не более чем на 10–12 нс максимум. К сожалению, несмотря на то, что в гамма-спектрометре используется сравнительно быстрый сцинтиллятор CeBr_3 (время высвечивания 16–18 нс), из-за отсутствия в спектрометре схемы точной временной привязки импульсов возникает зависимость их задержки от амплитуды импульса (так называемый «джиттер»). При отборе совпадающих событий в телескопе $S_1 + S_2$ и гамма-спектрометре разрешающее время бралось большим (до 60 нс) для компенсации различия времен пролета электронов в фотоумножителях телескопа и гамма-спектрометра, а также эффекта «джиттера». Это разрешающее время меньше минимального интервала между двумя последовательными моментами прихода протонов пучка на мишень, определяемого временной микроструктурой пучка (около 70 нс). При интенсивности пучка протонов 10^5 с^{-1} средний интервал между протонами пучка составляет около 9 мкс.

Таким образом, обработка результатов измерений сводилась к отбору из непрерывного потока «фотонных» слов тех из них, для которых время регистрации запаздывало в пределах до 30 нс относительно времени, записанного в «протонном» слове. Для эксперимента КГС-МЗЧ такие отобранные «фотонные» слова можно рассматривать как «фотонные слова с мечеными заряженными частицами» (ФС-МЗЧ).

Ниже представлены результаты обработки данных лабораторных испытаний макета КГС-МЗЧ. Показано, что предложенная методика измерений спектров гамма-квантов от мишени, отобранных по признаку совпадения с возбуждающими мишень протонами, практически реализуема и дает ожидаемые результаты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 представлены спектры гамма-квантов при воздействии протонного пучка на мишень из стекла, имитирующую в первом приближении марсианский грунт (основной состав — SiO_2). Суммарное число зарегистрированных протонов, пришедших в мишень

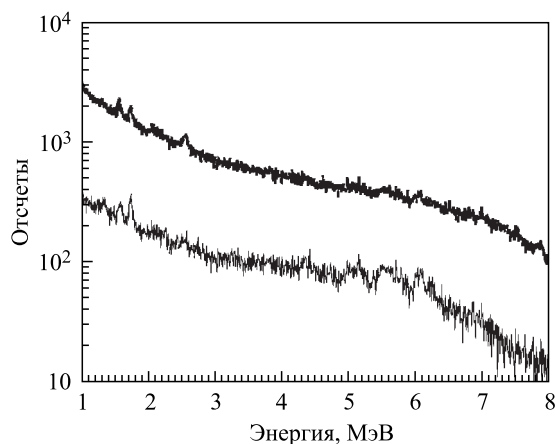


Рис. 2. Спектры гамма-квантов при воздействии протонного пучка на мишень из стекла: накопленный за 20 мин наблюдений без условия совпадения (толстая линия) и построенный на основе метода «меченых заряженных частиц» с разрешающим временем 60 нс и с условием совпадения (тонкая линия)

за время экспозиции, равно $1,2 \cdot 10^8$. В спектре гамма-квантов, удовлетворяющем критерию совпадения с временным разрешением 60 нс относительно регистрации протонов (тонкая линия на рис. 2), обнаружены спектральные линии с энергиями 4,93 и 4,42 МэВ. Первая линия соответствует реакции неупругого рассеяния быстрых нейтронов на кремнии, а вторая линия отображает результат однократной утечки гамма-кванта 0,51 МэВ из кристалла (single escape). Статистическая значимость регистрации этих двух линий равна $5,7\sigma$ и $4,9\sigma$ соответственно (таблица). Оценка статистической значимости основана на числе отсчетов в линии для спектральной ширины на полувысоте и на полном числе отсчетов в пределах этой ширины. При этом указанные линии неразличимы в спектре гамма-квантов, набранном без выборки событий по критерию совпадений с протонами (толстая линия на рис. 2).

В спектре, построенном на основе выборки по критерию совпадения, также наблюдается линия с энергией 6,13 МэВ, возникающая при неупругом рассеянии быстрых нейтронов на ядре атома кислорода. Статистическая значимость этой линии составляет $6,8\sigma$. Для этой линии в спектре также наблюдаются линии для однократной (5,62 МэВ) и двукратной (5,11 МэВ) утечки квантов 0,51 МэВ из кристалла, которые тоже имеют достаточно высокую статистическую значимость — $15,7\sigma$ и $8,2\sigma$ соответственно (см. таблицу). Следует отметить, что все три линии от неупругого рассеяния нейтронов на кислороде обнаруживаются в спектре, построенном без учета критерия совпадения, однако в этом случае статистическая значимость линий гораздо меньше (см. таблицу) из-за их регистрации в присутствии большого фона.

Регистрация спектральных линий от мишени из стекла на пучке протонов с энергией 160 МэВ

Линии гамма-квантов, МэВ	Оценка значимости по данным измерений на основе метода МЗЧ	Оценка значимости по данным измерений без МЗЧ	Ядерная реакция
2,6	$5,7\sigma$	$16,2\sigma$	Неупругое рассеяние на ^{28}Si и бета-распад ^{30}Al
4,4	$5,7\sigma$	Линия не обнаружена	Неупругое рассеяние на ^{28}Si , однократная утечка квантов (5,62 МэВ)
4,9	$4,9\sigma$	Линия не обнаружена	Неупругое рассеяние на ^{28}Si
5,1	$8,2\sigma$	$2,7\sigma$	Неупругое рассеяние на ^{16}O , двукратная утечка квантов (5,11 МэВ)
5,6	$15,7\sigma$	$6,6\sigma$	Неупругое рассеяние на ^{16}O , однократная утечка квантов (5,62 МэВ)
6,1	$6,8\sigma$	$4,1\sigma$	Неупругое рассеяние на ^{16}O

Следует отметить, что в обоих спектрах также регистрируются линии с энергиями меньше 4 МэВ, интенсивность которых в спектре без учета совпадений с протонами выше, чем в спектре с учетом этого критерия. Такой линией, например, является линия с энергией 2,6 МэВ. Причина этого эффекта состоит в том, что, кроме реакций неупру-

гого рассеяния нейтронов на кремнии, вклад в излучение для этих линий также вносят другие ядерные реакции, которые не удовлетворяют условию заданного отбора событий (для них разрешающее время 60 нс мало). Так, для указанной линии 2,6 МэВ такой реакцией может быть бета-распад изотопов алюминия ^{30}Al , накопившихся в материале экспериментальной установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные испытания макета прибора КГС-МЗЧ на пучке протонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ показали его практическую реализуемость и подтвердили возможность значительного повышения достоверности измерений ядерных гамма-линий вещества под воздействием потока протонов. Важнейшей особенностью применения метода «меченых заряженных частиц» в планетных исследованиях является практически полное исключение вклада гамма-лучей от материала космического аппарата, которые при традиционных измерениях приводят к неопределенности в оценках интенсивностей линий элементов, содержащихся как в материале поверхности небесного тела, так и в материале аппарата. При этом проведенные измерения показали, что метод «меченых заряженных частиц», как и следовало ожидать, не работает для анализа элементного состава на основе тех линий ядерного излучения, для которых происходит наложение излучения с такой же или близкой энергией от других ядерных реакций, которые не синхронизированы по времени с попаданием в вещество протона. К таким реакциям относится распад накопившихся в веществе нестабильных изотопов, а также реакции захвата ядрами тепловых нейтронов. Очевидно, что для анализа элементного состава планетного вещества на основе предложенного метода должны использоваться спектральные линии гамма-квантов от реакций, которые не перекрываются с линиями от других ядерных процессов, не коррелированных по времени с попаданием в грунт протонов ГКЛ. Примером таких линий для кремния и кислорода являются линии с энергиями 4,93 и 6,13 МэВ соответственно.

В дальнейшем планируется на пучке протонов фазотрона ЛЯП провести измерения с гетерогенной мишенью с целью оценки возможностей метода «меченых заряженных частиц» для определения вариаций элементного состава в разных частях мишени. Также будет проведена оптимизация разрешающего времени для выборки событий по критерию совпадения из спектра гамма-квантов с целью повышения эффективности предложенного метода.

Авторы благодарят Российский научный фонд за поддержку исследований, результаты которых представлены в данной статье (грант РНФ № 18-12-00487).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hasebe N., Kim K. J., Shibamura E., Sakurai K. Nuclear Planetary Science: Planetary Science Based on Gamma-Ray, Neutron and X-Ray Spectroscopy. Singapore: World Sci. Publ. Company, 2017.

Получено 13 декабря 2018 г.