

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ СОСТАВНЫХ МИШЕНЕЙ-АНАЛОГОВ ПЛАНЕТНОГО ВЕЩЕСТВА НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ УСКОРИТЕЛЯ ОИЯИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ ПРОТОНОВ

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

^в Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Представлены результаты второй очереди лабораторных испытаний макета космического гамма-спектрометра на фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с использованием метода меченых протонов. В эксперименте были получены сравнительные оценки чувствительности метода меченых протонов для его применения на борту посадочных станций или мобильных платформ с целью обнаружения неоднородностей в подстилающей поверхности. В качестве имитации космического эксперимента были использованы составные мишени-аналоги планетного вещества, состоящие из оксида кремния с добавлением алюминия и железа.

The results of the second stage of laboratory tests of the space gamma-spectrometer prototype at the JINR DLNP Phasotron using the method of tagged protons are presented. In the experiment, comparative estimates of the sensitivity of the tagged proton method were obtained for its use on board landing stations or mobile platforms in order to detect inhomogeneities in the underlying surface. As an imitation of a space experiment, composite targets-analogs of planetary ground, consisting of silicon oxide with the addition of aluminum and iron, were used.

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

¹E-mail: imitrofa@space.ru

ВВЕДЕНИЕ

Нейтронные и гамма-спектрометры уже довольно давно используются в космических экспериментах для измерения элементного состава поверхности планет Солнечной системы, их спутников и малых тел (малых планет и даже астероидов) [1–10]. С их помощью можно определить концентрацию в планетных реголитах таких порообразующих элементов, как O, C, Na, Mg, Al, Si, Ca, K, Fe и др. Обычно спектрометры устанавливаются на орбитальные космические аппараты, чтобы в ходе реализации миссии можно было построить глобальную карту элементного состава поверхности (см., например, [2]). В этом случае используется так называемая пассивная нейтронная и гамма-спектроскопия, основанная на измерении вторичного излучения поверхности, возникшего за счет бомбардировки поверхности заряженными частицами галактических космических лучей (ГКЛ).

В последнее время акцент при планировании будущих космических экспериментов делается на посадочные миссии, предназначенные для изучения наиболее интересных локальных участков поверхности, обнаруженных во время орбитальных наблюдений. Это предполагает разработку стационарных и мобильных платформ, на борту которых могут устанавливаться нейтронные и гамма-спектрометры. В этом случае возникают дополнительные возможности для использования низкофоновых методов, позволяющих повысить чувствительность измерений.

Нейтронная и гамма-спектроскопия — это проникающие методы изучения космических объектов, предоставляющие возможность исследования элементного состава некоторого объема вещества. Платой за это является необходимость аккуратной режекции паразитного фона космического аппарата, в котором могут присутствовать те же гамма-линии, что и в исследуемом объеме. В случае пассивных методов измерений приходится проводить сложные наземные и летные калибровки, а также детальное численное моделирование, чтобы оценить вклад фоновой компоненты. При орбитальных измерениях (глобальном картографировании поверхности небесных тел) этих трудностей избежать не удастся, а вот при измерениях непосредственно на поверхности можно использовать специальные методики, позволяющие существенно подавить фоновую компоненту результатов измерений. Одним из эффективных методов режекции фона является метод меченых частиц. Мечеными частицами могут быть, например, нейтроны, если для гамма-спектроскопии используется облучение поверхности быстрыми нейтронами из нейтронного генератора для формирования вторичного гамма-излучения. В этой методике отбираются нейтроны, вылетевшие из источника в определенном телесном угле и облучившие заданный объект [11, 12]. Соответственно, в детекторе отбираются только те гамма-кванты, регистрация которых по времяпролетной методике была синхронизована с мечеными нейтронами [11, 12]. Подобные методы широко используются на Земле в различных промышленных приложениях [11–14] и уже нашли отражение в передовых разработках космической аппаратуры [15]. К их недостаткам относится большой вес измерительной аппаратуры и необходимость использования искусственных источников нейтронов, таких как нейтронные генераторы.

В нашем исследовании мы рассмотрели другие возможности, а именно, космический источник проникающего излучения в виде заряженных частиц ГКЛ, генерирующих гамма-излучение из грунта. Телескоп счетчиков заряженных частиц ГКЛ

позволяет отобрать частицы ГКЛ в выделенном телесном угле, т. е. частицы, проникающие в выделенный объем грунта. Используя временную корреляцию сигналов телескопа счетчиков заряженных частиц ГКЛ и гамма-спектрометра, можно отобрать гамма-кванты, приходящие в спектрометр только из этого объема. Естественно, предполагается регистрация мгновенных характеристических гамма-квантов из ядерных реакций, а не распадных квантов от активации грунта. Этот метод по аналогии с нейтронами получил название метода меченых протонов [16]. Первые лабораторные измерения с макетом космического гамма-спектрометра, основанного на методе заряженных частиц (КГС-МЗЧ), были проведены на протонном пучке фазотрона ЛЯП ОИЯИ в 2018 г. [17]. Они показали перспективность этого метода.

В данном исследовании учтены результаты прошлых испытаний, доработана измерительная установка (см. разд. 1), методика измерений (см. разд. 2) и использованы новые составные мишени-аналоги планетного вещества (см. разд. 1 и 2), позволяющие оценить возможности метода и сравнить его чувствительность с обычными измерениями (см. разд. 3).

Основная цель проведенных тестов заключалась в получении сравнительных оценок чувствительности метода меченых протонов при его применении на борту посадочных станций или мобильных платформ для обнаружения неоднородностей в подстилающей поверхности. В первую очередь исследовалась возможность надежной идентификации локального участка поверхности, существенно отличающегося по своему химическому составу от окружающей его территории.

При движении марсоход или луноход может проезжать локальные участки поверхности с уникальным химическим составом, которые необходимо быстро и достоверно обнаружить, чтобы успеть вовремя остановиться и вернуться для проведения детальных исследований в районе их обнаружения. Научная и практическая значимость таких участков может быть довольно высока. Например, с научной точки зрения исследование локальных неоднородностей может дать принципиально новую информацию о формировании поверхности на различных этапах эволюции планеты, включая понимание роли, которую играла вода/водяной лед в этих процессах. С практической точки зрения обнаруженные участки могут представлять собой залежи полезных ископаемых, которые можно использовать для обеспечения длительного пребывания космонавтов на поверхности Луны или Марса.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторные испытания с макетом прибора КГС-МЗЧ проводились в 1-й терапевтической кабине медико-технического комплекса фазотрона ЛЯП ОИЯИ на пучке протонов с энергией 160 МэВ, который имитировал поток заряженных частиц ГКЛ и облучал поверхность мишени-аналога планетного вещества. Пучок протонов для радиотерапии образуется торможением протонов с энергией 660 МэВ в углеродном поглотителе. Для очистки пучка от легких заряженных частиц и протонов с энергиями, существенно отличающимися от 160 МэВ, применяется магнитный анализ. В результате образуется пучок с шириной на полувисоте энергетического распределения около 10 МэВ. В кабину выводился широкий пучок, из которого коллиматорами формируется поле облучения размерами 8×8 см с высокой степенью однородности.

Пучок имел микроструктуру с периодом ~ 70 нс и растяжку длительности вывода 2,7 мс при частоте 250 Гц. Ток пучка мониторировался пучковой ионизационной камерой на входе в кабину. К сожалению, интенсивность пучка, при которой еще возможен его контроль, создавала недопустимую загрузку сцинтилляционных счетчиков, поэтому в эксперименте применялся коллиматор с большим числом отверстий, снижающих среднюю плотность потока протонов в поле облучения до приемлемых значений. Стальной коллиматор размерами 8×8 см и толщиной по пучку 5 см, т. е. превышающей пробег протонов пучка, имел 25 равномерно распределенных отверстий диаметром 8 мм. Это позволило обеспечить облучение протонами поверхности мишени-аналога планетного вещества на уровне $10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Непосредственно за коллиматором располагался протонный телескоп из двух сцинтилляционных счетчиков с пластическими сцинтилляторами 3×3 см и толщиной 3 мм. Сигналы со счетчиков телескопа подавались на входы быстрых дискриминаторов (Quad 300 MHz discriminator 704) и далее на быструю схему совпадений (Quad 300 MHz majority logic 754), что гарантировало отсутствие просчетов событий в канале телескопа. Сигнал со схемы совпадений по кабелю длиной ~ 10 м передавался на вход блока управления гамма-спектрометром. Телескоп позволял точно измерить число протонов, прошедших через его сцинтилляторы за время экспозиции, и создать временную отметку этих событий.

За коллиматором с отверстиями и телескопом размещалась мишень-аналог планетного вещества. Для этой серии тестов была предложена концепция составной мишени из двух частей, что позволило имитировать неоднородность элементного состава гипотетического планетного грунта. Составная мишень (СМ) имела поперечные размеры 8×8 см и толщину по пучку 20 см. В качестве материала основного фрагмента СМ было выбрано силикатное стекло плотностью $2,55 \text{ г/см}^3$, химический состав которого был измерен во ВНИИМС (табл. 1). Такой выбор был обусловлен тем, что грунт планет земной группы и их спутников в первом приближении также представляет собой смесь различных оксидов, среди которых доминирует оксид кремния с содержанием от 50 до 80% по массовой доле (см., например, [18]).

Таблица 1. Химический состав фрагмента мишени-аналога из силикатного стекла

Оксид	Массовая доля, %
SiO ₂	69,8 ± 0,5
Na ₂ O	13,8 ± 0,2
MgO	4,8 ± 0,1
Al ₂ O ₃	1,5 ± 0,1
K ₂ O	0,3 ± 0,1
CaO	9,5 ± 0,2
Fe ₂ O ₃	0,1 ± 0,02

Часть мишени-аналога, расположенная непосредственно за телескопом, была сменной и состояла как из того же стекла, что и основная мишень, так и из других материалов (Al, Fe, Ti, NaCl). Ее размеры $3 \times 3 \times 20$ см. Схематический чертеж измерительной установки показан на рис. 1.

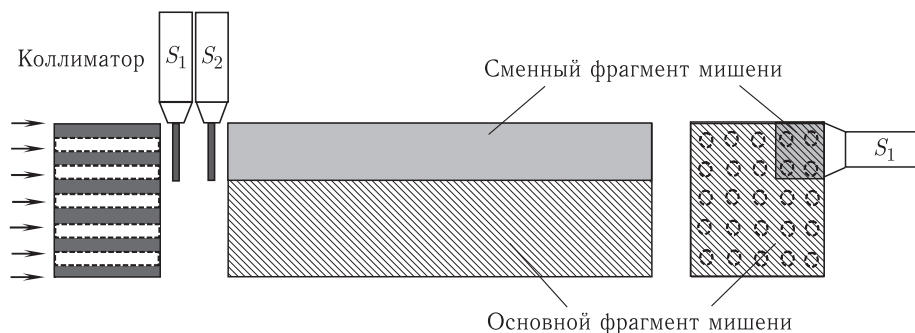


Рис. 1. Схематический вид установки для тестирования метода меченых протонов

Основной фрагмент мишени имел угловой вырез размерами 3×3 см, в который вставлялись сменные фрагменты мишени. Соответственно, 86% всех протонов облучали основной фрагмент мишени и 14% — сменную мишень.

Алюминиевые сменные мишени были двух видов — из сплава АМЦ, в котором доля алюминия составляет от 96 до 99%, а доля магния не более 0,2%, и из сплава АМГ-6, в котором доля алюминия составляет 93–94%, а доля магния — до 6–7%. Для железной мишени использовалась сталь СТ-3. В этом сплаве содержание железа составляет около 97%, а в остатке, в основном, доминируют углерод, кремний, марганец, медь, никель и хром. В качестве хлорсодержащей мишени использовалась насыпная мишень из поваренной соли. Такая конструкция установки позволяла моделировать как однородный (если в качестве сменного фрагмента использовалось



Рис. 2. Общий вид установки на пучке протонов медицинской кабины

то же самое силикатное стекло), так и неоднородный состав планетного грунта (при использовании в качестве сменной мишени другого материала).

Приоритет в использовании указанных выше материалов для сменных мишеней был связан с тем, что повышенное содержание определенного металла, например в лунном грунте, может позволить определить тип и возраст поверхности. Для Марса повышенное содержание алюминия и железа может указывать на наличие определенных минералов (например, гематита или филосиликатов), сформировавшихся в теплых и влажных условиях раннего Марса.

Для регистрации гамма-излучения от мишени использовался сцинтилляционный гамма-спектрометр с детектором из бромида церия с размерами $\varnothing 3 \times 3''$. Сцинтиллятор CeBr_3 имеет отличное спектральное разрешение ($\sim 4\%$ на энергии 661 кэВ), короткое время высвечивания ~ 19 нс и высокую эффективность регистрации жестких гамма-квантов (не менее 15% на энергии 6 МэВ). По спектральному разрешению он несколько уступает другому, также часто используемому сцинтилляционному детектору на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Однако у детекторов на основе бромида церия отсутствует собственный радиационный фон в отличие от $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, что существенно облегчает идентификацию гамма-линий в диапазоне до 3 МэВ и делает этот сцинтиллятор предпочтительным для задач космического эксперимента [19].

Для снижения фоновой загрузки гамма-спектрометра он был частично окружен свинцовой защитой толщиной 5 см.

Общий вид установки показан на рис. 2.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Логика работы установки в режиме меченых протонов заключается в следующем. Сигнал со схемы совпадений телескопа формирует в блоке управления гамма-спектрометром признак «протон». Одновременно записывается время этого события с точностью до наносекунды. При регистрации спектрометром гамма-кванта управляющая электроника формирует признак «фотон», записывает время его регистрации (с точностью до наносекунды) и номер канала анализатора, в который он попадает. В результате по окончании измерений формируется файл данных, в котором записаны как протонные, так и фотонные события с указанием точного времени их регистрации. Это позволяет при последующем анализе данных отобрать только те фотоны, время регистрации которых коррелировано с временем регистрации протонов (т. е. событие «фотон» следует за событием «протон» в пределах некоторого разрешающего времени).

Под действием протонов и вторичных нейтронов в мишени происходят ядерные реакции, приводящие к генерации мгновенных характеристических гамма-квантов и задержанных квантов, связанных с метастабильными состояниями возбужденных ядер или образованием радионуклидов. Термализация нейтронов с последующим их захватом также приводит к образованию характеристических гамма-квантов, регистрация которых, однако, смещена во времени относительно момента попадания первичного протона в мишень. Гамма-спектрометр регистрирует и рассеянный объектами окружающей среды гамма-фон.

Основным механизмом возникновения мгновенных гамма-квантов является неупругое рассеяние быстрых вторичных нейтронов на ядрах мишени. Таким образом, если

в файле с записанной последовательностью событий в телескопе и в гамма-детекторе отобрать только те отсчеты от фотонов, которые были зарегистрированы в малом временном окне сразу после регистрации протона, то можно создать выборку событий из общего спектра гамма-излучения, которая соответствует регистрации мгновенных квантов, возникших при воздействии меченых протонов с мишенью-аналогом планетного вещества. Такая выборка из общего фона событий позволит повысить эффективность идентификации характеристических линий элементов в планетном веществе.

Момент регистрации события «протон» в блоке управления спектрометром был сдвинут во времени относительно момента попадания протона в мишень на ~ 70 нс (из-за времени пролета электронов в фотоумножителях, задержки в блоках электроники и кабелях). Эта задержка учитывалась при анализе данных, записанных в файл. По сравнению с предыдущими лабораторными тестами [17] в гамма-спектрометре была доработана схема точной временной привязки отсчетов от зарегистрированного кванта и практически полностью устранена зависимость времени регистрации события от амплитуды импульса (джиттер).

Длительность набора каждого спектра гамма-квантов от фрагментов мишени-аналога составляла порядка 30–40 мин. Все измеренные гамма-спектры нормировались на количество зарегистрированных протонных событий. Поэтому на всех представленных далее спектрах гамма-квантов данные приведены в размерности количества гамма-квантов на одно протонное событие.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Из всей совокупности тестов в данной статье представлены результаты с двумя приоритетными фрагментами сменной мишени — железным и алюминиевым (оба — сплавы). Это два наиболее распространенных металла в планетных реголитах, по концентрациям которых можно судить о типе поверхности и процессах, повлиявших на ее формирование.

3.1. Мишени со сменными фрагментами из силикатного стекла и алюминия. Результаты серии измерений со сменными мишенями из силикатного стекла и алюминиевого сплава АМЦ представлены на рис. 3 и 4. Для сравнения спектры гамма-квантов от сменной мишени из алюминия сопоставлялись со спектрами с сменной мишенью из того же силикатного стекла, что и основная мишень (т. е. в этом случае вся мишень была однородной — из стекла). На рис. 3, *а* показаны спектры гамма-квантов, набранные в обычном режиме без отбора событий методом меченых протонов, а на рис. 3, *б* приведена их разность (из спектра со сменной мишенью вычитался спектр однородной мишени из стекла). Аналогично, на рис. 4, *а* представлены данные измерений с отбором зарегистрированных квантов по методу меченых протонов, а на рис. 4, *б* — разность измеренных спектров.

При неупругом рассеянии быстрых нейтронов на алюминии возникает много характеристических гамма-линий, из которых можно выделить линии 844, 1014, 1130, 1369, 1612, 1809, 2211, 2754 и 3004 кэВ. Гамма-линии 844, 1014, 2211, 3004 кэВ связаны с переходами ядра алюминия из возбужденных состояний в основное. Гамма-

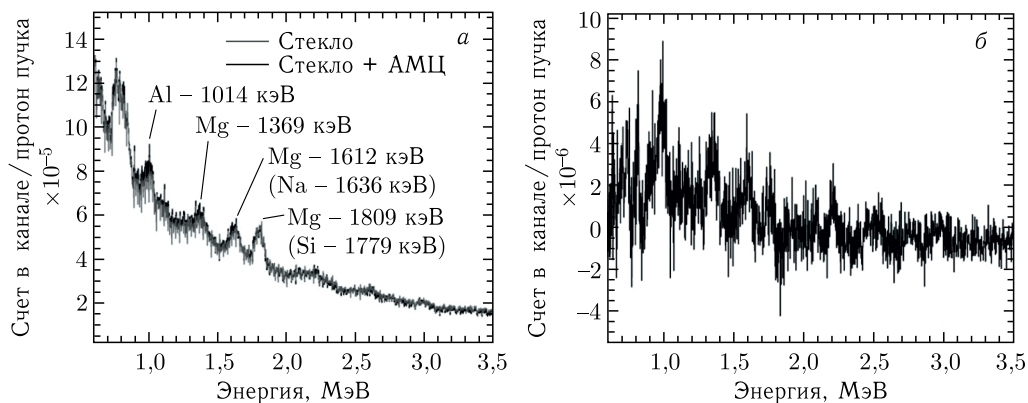


Рис. 3. а) Спектры гамма-излучения от однородной мишени из силикатного стекла (серый) и от неоднородной мишени со вставкой из алюминия (черный). б) Разность спектров (из спектра от неоднородной мишени вычитается спектр от однородной мишени). Измерения сделаны без использования метода меченых протонов

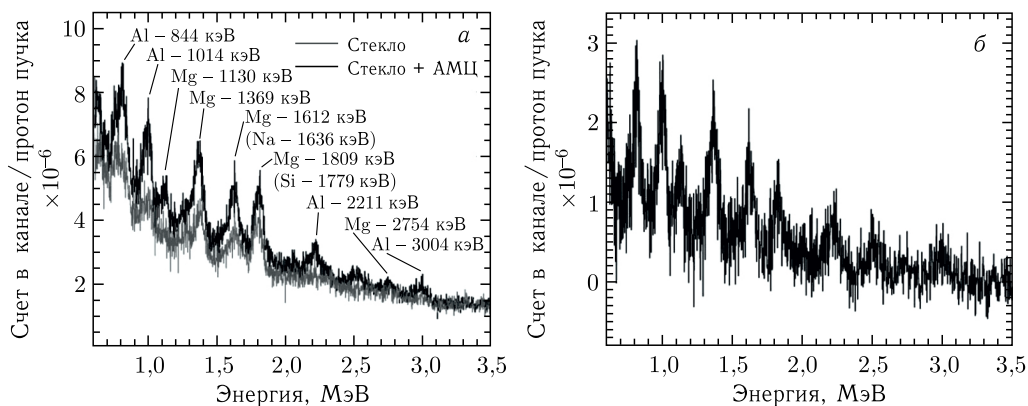


Рис. 4. а) Спектры гамма-излучения от однородной мишени из силикатного стекла (серый) и от неоднородной мишени со вставкой из алюминия (черный). б) Разность спектров (из спектра от неоднородной мишени вычитается спектр от однородной мишени). Измерения сделаны с использованием метода меченых протонов

линии с энергиями 1130, 1369, 1612, 1809 кэВ соответствуют возбужденным состояниям магния в сплаве АМЦ и стекле, образующимся при неупругом рассеянии нейтронов.

Результаты измерений в обычном режиме (рис. 3, а) демонстрируют слишком малое различие спектров для однородной стеклянной мишени и мишени с алюминиевой вставкой. Видны лишь небольшие отличия в амплитудах некоторых пиков на энергиях, где можно ожидать появления сильных гамма-линий алюминия. На разности спектров (рис. 3, б) можно выделить только три таких явных значимых превышения на энергиях 1014, 1369 и 1612 кэВ. Количественная оценка статистических значимостей остальных ожидаемых гамма-линий на энергиях 844, 1809 и 3004 кэВ не

превысила порога в 3σ , что обусловлено, главным образом, наличием большого фона как из стекла, так и внешнего. Следует также учесть, что в реальных условиях планетного эксперимента в спектре излучения также будут присутствовать линии алюминия не только из грунта, но и из космического аппарата. Это означает, что в реальных условиях наблюдения на борту посадочного аппарата без использования селективных методов существенно возрастает неопределенность в оценке концентрации данного элемента в грунте и значительно падает вероятность его обнаружения.

Применение метода меченых протонов принципиально меняет ситуацию. На рис. 4, *a* видно, как различаются спектры для однородной стеклянной мишени и мишени с алюминиевой вставкой при измерениях по методу меченых протонов. Количественно это подтверждается разностью этих гамма-спектров (рис. 4, *б*), которая представляет статистически значимые максимумы во всех энергетических интервалах, где должны находиться сильные гамма-линии алюминия при его облучении высокоэнергичными протонами или нейтронами. Для гамма-линии 844 кэВ значимость составляет 16σ , на энергии 1014 кэВ — 20σ , на энергии 1369 кэВ — 23σ .

3.2. Мишени со сменными фрагментами из силикатного стекла и железа.

Аналогичные измерения были сделаны со сменной мишенью из СТ-3. Результаты измерений представлены на рис. 5 для измерений в обычном режиме и на рис. 6 с применением метода меченых протонов. Аналогично измерениям с алюминиевой сменной мишенью различия в форме спектров однородной мишени из силикатного стекла и мишени со стальной вставкой (рис. 5, *a*) практически незаметны. Их разностный спектр (рис. 5, *б*) выглядит как статистический шум, в котором не удается выделить явных гамма-пиков.

При облучении стальной мишени в результате реакций неупругого рассеяния нейтронов в измеренном гамма-спектре должны наблюдаться несколько гамма-линий.

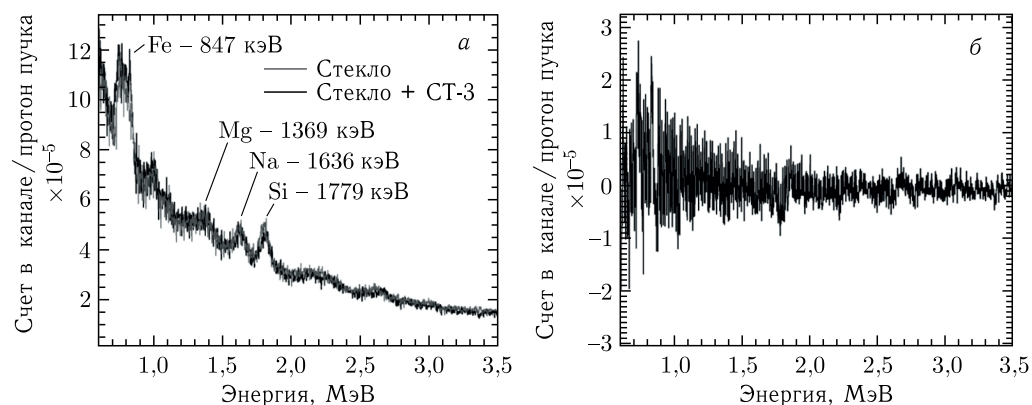


Рис. 5. *a*) Спектры гамма-излучения от однородной мишени из силикатного стекла (серый) и от неоднородной мишени со вставкой из железа (черный). *б*) Разность спектров (из спектра от неоднородной мишени вычитается спектр от однородной мишени). Измерения сделаны без использования метода меченых протонов

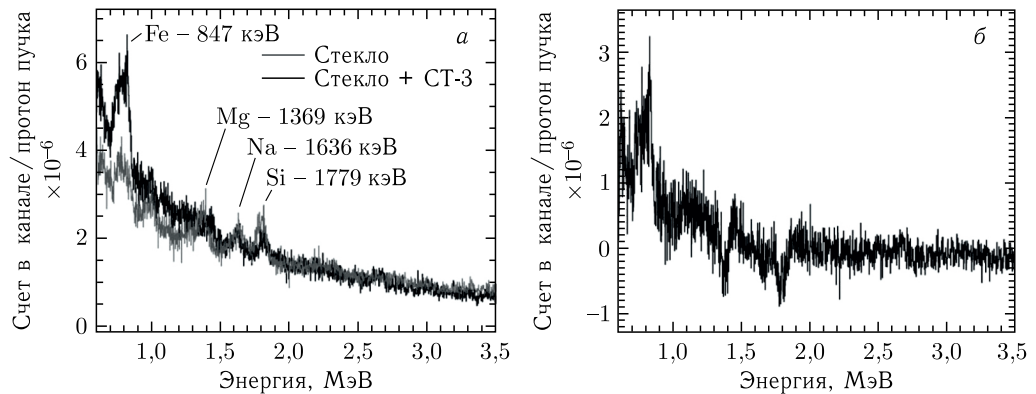


Рис. 6. а) Спектры гамма-излучения от однородной мишени из силикатного стекла (серый) и от неоднородной мишени со вставкой из железа (черный). б) Разность спектров (из спектра от неоднородной мишени вычитается спектр от однородной мишени). Измерения сделаны с использованием метода меченых протонов

Самая сильная из них имеет энергию 847 кэВ. Две другие, более слабые гамма-линии имеют энергии 1238 и 1811 кэВ.

При сравнении гамма-спектров для однородной и неоднородной мишеней с отбором событий по методу меченых протонов хорошо видно их существенное качественное различие (см. рис. 6, а). Это различие подтверждается количественно при анализе разности двух спектров (см. рис. 6, б). Здесь статистически значимо, на уровне 22σ ,

Таблица 2. Результаты измерений гетерогенных мишеней-аналогов планетного вещества

Тип мишени-аналога планетного вещества	Гамма-линия, кэВ	Статистическая значимость линий в разностном спектре	
		С использованием метода меченых протонов	Без использования метода меченых протонов
Сменная мишень из сплава АМЦ	844 (Al)	$16\sigma^{**}$	$< 3\sigma$
	1014 (Al)	$20\sigma^{**}$	$10\sigma^{**}$
	1369 (Al/Mg)	$23\sigma^{**}$	10σ
	1612 (Al/Mg)	$14\sigma^{**}$	7σ
	1809 (Al/Mg)	$11\sigma^{**}$	$< 3\sigma$
	2211 (Al)	13σ	4σ
Сменная мишень из сплава СТ-3 (97% железа)	847 (Fe)	22σ	$< 3\sigma$
	1369 (Al/Mg)	$> 3\sigma^*$	$< 3\sigma$
	1779 (Si)	$> 3\sigma^*$	$< 3\sigma$

* В разностных спектрах наблюдаются отрицательные значения в связи с тем, что данные гамма-линии присутствуют в спектре гамма-квантов из однородной мишени из силикатного стекла.

** Также подтверждается численными расчетами спектров из мишени с алюминиевой вставкой.

выделяется гамма-линия с энергией 847 кэВ, что подтверждает обнаружение железа в мишени. Отрицательные значения в окрестности энергий 1370 и 1800 кэВ связаны с тем, что в спектре для однородной стеклянной мишени в этом диапазоне находятся сильные линии магния и кремния (1369 и 1779 кэВ). Поэтому при вычитании из спектра от сменной стальной мишени, у которой гамма-линий с этими энергиями нет, возникает отрицательная разность.

Суммируя результаты, можно утверждать, что применение метода меченых протонов не только улучшает статистическую значимость при идентификации характеристических гамма-линий, но в принципе позволяет обнаружить неоднородность мишени в условиях большого фона, что невозможно при гамма-спектроскопии облучаемой мишени в обычном режиме.

Полностью сравнение статистических значимостей в двух методах измерений представлено в табл. 2.

3.3. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования. Условия эксперимента были также численно смоделированы с помощью специального программного обеспечения, написанного на языке C++ и основанного на использовании программы Geant4 версии 10.06.beta01. Рассчитывались спектры гамма-квантов из составной мишени, облучаемой пучком протонов с энергией 160 МэВ. В расчетах была реализована детальная геометрия экспериментов, конфигурация пучка, состав мишеней и характеристики гамма-детектора. Точно учесть фоновое гамма-излучение в медицинской кабине не представлялось возможным. Тем не менее, сравнение относительной амплитуды модельных и экспериментальных спектральных линий, а также отождествление основных линий, присутствующих в спектрах, показало адекватность проведенного моделирования эксперимента и протекающих физических процессов.

На рис. 7, а, по аналогии с рис. 3, представлены интегральные расчетные спектры гамма-квантов для однородной мишени из стекла и составной мишени со вставкой из алюминия в режиме регистрации всех квантов, т. е. без применения метода меченых

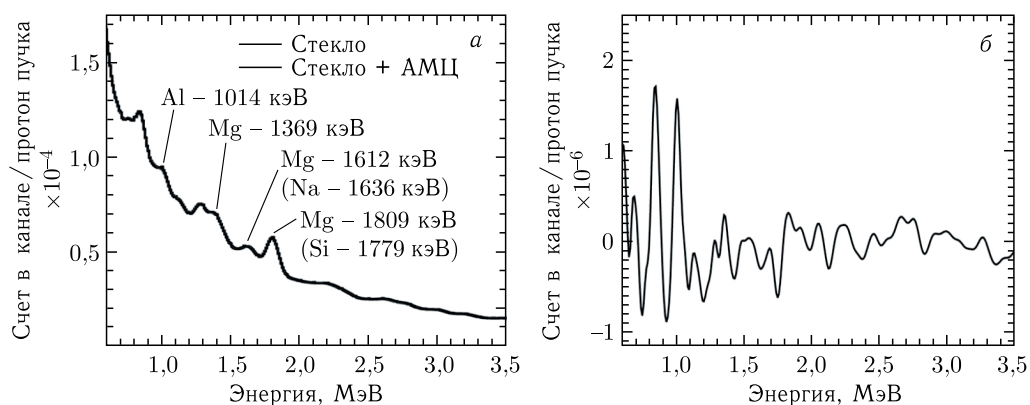


Рис. 7. а) Расчетные спектры гамма-излучения от однородной мишени из силикатного стекла (серый) и от неоднородной мишени со вставкой из алюминия (черный). б) Разность спектров (из спектра от неоднородной мишени вычитается спектр от однородной мишени). Численное моделирование выполнено без использования метода меченых протонов

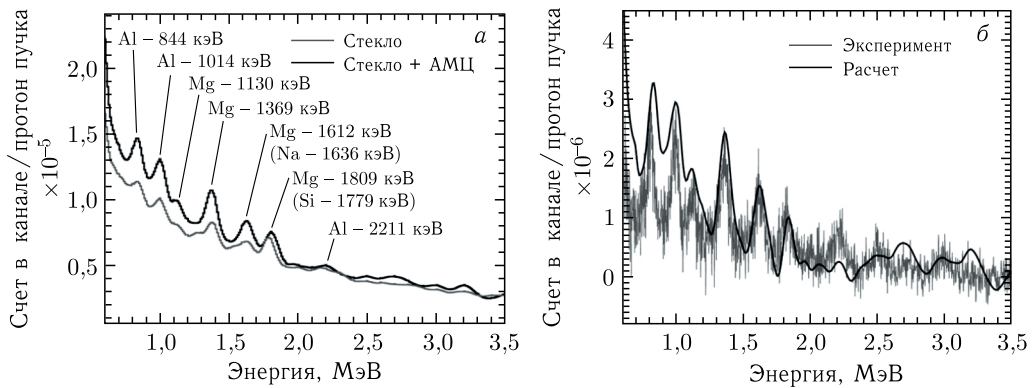


Рис. 8. *а*) Расчетные спектры гамма-излучения от однородной мишени из силикатного стекла (серый) и от неоднородной мишени со вставкой из алюминия (черный). *б*) Черным цветом показана разность спектров (из спектра для неоднородной мишени вычитается спектр для однородной мишени). Серым цветом показаны экспериментальные данные (см. также рис. 4, б). Численное моделирование выполнено с использованием метода меченых протонов

протонов, которые практически совпали друг с другом. Небольшие различия видны только на рис. 7, б, где показана их разность. Так как силикатное стекло включает не только оксид кремния, но и добавки в виде оксидов натрия, магния и алюминия, то на модельном спектре однородной мишени хорошо видны сильные гамма-линии, соответствующие этим элементам. Для кремния это энергии: 1273, 1779 и 2839 кэВ. Для алюминия и магния это 844, 1014, 1130, 1369, 1612, 1809, 2211 и 3004 кэВ. Для натрия можно выделить сильную линию на энергии 1636 кэВ. Эта комбинация линий практически идентично воспроизводится и для интегрального спектра, смоделированного для составной мишени с алюминиевой вставкой. Разница двух спектров показана на рис. 7, б, хорошо видно, что единственные значимые отклонения возникают только на энергиях 844 и 1014 кэВ, которые соответствуют сильным алюминиевым гамма-линиям. Таким образом, численные расчеты подтверждают выводы, полученные при анализе экспериментальных данных в режиме сбора всех фотонов в интегральном спектре. Наблюдается лишь незначительное различие формы интегральных спектров однородной и составной мишеней, и это различие наблюдается лишь в нескольких гамма-линиях. Так, расчеты и эксперимент совпали в том, что маркером такого различия может быть сильная линия алюминия на энергии 1014 кэВ.

Численное моделирование измерений с составной мишенью из алюминия по методу меченых протонов так же, как и в эксперименте, показывает высокую чувствительность этого метода для обнаружения неоднородностей в планетном грунте. Результаты расчетов представлены на рис. 8.

На рис. 8, *а* показаны спектры однородной и составной мишеней, полученные с помощью метода меченых протонов, а на рис. 8, *б* — их разность. Для сопоставления расчетов с измерениями на этом графике также приведен экспериментальный разностный спектр из рис. 4, *б* (показан серым цветом).

Можно заключить, что численное моделирование и эксперимент хорошо согласуются друг с другом в оценке чувствительности метода меченых протонов. В спек-

тральной разности составной и однородной мишеней возникает большое количество значимых гамма-линий, которые соответствуют алюминию. Совпадение между расчетами и экспериментом в первую очередь проявляется для гамма-линий с энергиями 844, 1014, 1369, 1612 и 1809 кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые лабораторные испытания макета прибора КГС-МЗЧ были проведены на пучке протонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ в 2018 г. Они показали принципиальную возможность существенного повышения достоверности обнаружения характеристических гамма-линий, возникающих в космическом эксперименте в результате бомбардировки грунта ГКЛ путем использования метода меченых протонов [17]. Эти протоны облучают только определенный участок исследуемой поверхности, ограниченный телесным углом телескопа заряженных частиц. В этом случае, несмотря на снижение статистики событий, за счет практически полного подавления фона повышается статистическая значимость регистрации характеристических гамма-линий из планетного грунта в измеряемом объеме. При этом создается возможность поиска и исследований локальных неоднородностей состава планетного вещества при установке прибора КГС-МЗЧ на борту мобильного аппарата. При движении аппарата прибор будет сканировать поверхность грунта в непосредственной близости к аппарату и позволит исследовать изменения химического состава планетного грунта по пути следования аппарата. Для измерений на поверхности небесных тел обнаружение локальных неоднородностей, где содержание основных породообразующих элементов оказывается существенно отличным от среднего содержания в окружающей поверхности, играет важную роль. Это может предоставить уникальную информацию о сложных механизмах формирования поверхности на различных стадиях эволюции небесного тела.

В экспериментах на протонном пучке Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ получены результаты измерений составных мишеней-аналогов планетного вещества, собранных из оксида кремния с добавлением алюминия и железа как основных породообразующих металлов. Экспериментально подтверждено, что использование метода меченых протонов существенно повышает статистическую значимость характеристических гамма-линий в спектре излучения, возникающего в смоделированной неоднородности грунта. Также продемонстрировано, что в некоторых случаях, например для железистых грунтов, метод меченых протонов является фактически единственным способом, позволяющим обнаружить эту неоднородность достоверно. Результаты экспериментальных измерений были сопоставлены с их численным моделированием. Полученное согласие расчетов и эксперимента позволяет в дальнейшем использовать численные модели для подготовки и разработки реальных космических проектов по изучению состава вещества Луны, Марса и других небесных тел Солнечной системы.

По результатам лабораторных испытаний планируется дальнейшее усовершенствование спектральных и временных свойств макета КГС-МЗЧ, чтобы максимально приблизить его к уровню прототипа космического прибора. Кроме этого, будет создано следующее поколение неоднородных мишеней-аналогов планетного вещества с различным элементным составом и более сложным пространственным распределением внутри мишени.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boynton W. V., Feldman W. C., Squyres S. W., Prettyman T. H., Bruckner J., Evans L. G., Reedy R. C., Starr R., Arnold J. R., Drake D. M., Englert P. A., Metzger A. E., Mitrofanov I., Trombka J., d'Uston C., Wanke H., Gasnault O., Hamara D. K., Janes D. M., Marcialis R. L., Maurice S., Mikheeva L., Taylor G. J., Tokar R., Shinohara C.* Distribution of Hydrogen in the near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits // *Science*. 2002. V. 297. P. 81–85.
2. *Boynton W. V. et al.* Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the Low- and Mid-Latitude Regions of Mars // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 112. P. E12S99.
3. *Goldsten J. O., Rhodes E. A., Boynton W. V., Feldman W. C., Lawrence D. J., Trombka J., Smith D. M., Evans L. G., White J., Madden N. W., Berg P. C., Murphy G. A., Gurnee R. S., Strohhahn K., Williams B. D., Schaefer E. D., Monaco C. A., Cork C. P., Eckels J. D., Miller W. O., Burks M. T., Hagler L. B., DeTeresa S. J., Witte M. C.* The MESSENGER Gamma-Ray and Neutron Spectrometer // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 131. P. 339–391.
4. *Hasebe N. et al.* High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer on Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA) // *Trans. Space Technol. Japan*. 2010. V. 7. P. Pk_35–Pk_41.
5. *Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Barmakov Yu. N., Behar A., Bitulev A., Bobrovitsky Yu., Bogolubov E. P., Boynton W. V., Bragin S. I., Churin S., Grebennikov A. S., Kononov A., Kozyrev A. S., Kurdumov I. G., Krylov A., Kuznetsov Yu. P., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Ryzhkov V. I., Sanin A. B., Shvetsov V. N., Smirnov G. A., Sholeninov S., Timoshenko G. N., Tomilina T. M., Tuvakin D. V., Tretyakov V. I., Troshin V. S., Uvarov V. N., Varenikov A., Vostrukhin A.* The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8, No. 3. P. 605–612.
6. *Mitrofanov et al.* The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) on Board the Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission // *Planet. Space Sci.* 2010. V. 58. P. 116–124.
7. *Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Barmakov Yu. I., Behar A., Bobrovitsky Yu. I., Bogolubov E. P., Boynton W. V., Harshman K., Kan E., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A. V., Mokrousov M. I., Ryzhkov V. I., Sanin A. B., Smirnov G. A., Shvetsov V. N., Timoshenko G. N., Tomilina T. M., Tretyakov V. I., Varenikov A. B., Vostrukhin V.* Experiment for Measurements of Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170, Iss. 1–4. P. 559–582.
8. *Prettyman T. H. et al.* Elemental Composition of the Lunar Surface: Analysis of Gamma Ray Spectroscopy Data from Lunar Prospector // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, Iss. E12.
9. *Prettyman T. H. et al.* Elemental Mapping by Dawn Reveals Exogenic H in Vesta's Regolith // *Science*. 2012. V. 338. P. 242.
10. *Surkov et al.* Uranium, Thorium, and Potassium in the Venusian Rocks at the Landing Sites of VEGA 1 and 2 (Lunar and Planetary Institute, NASA, AAS) // *Lunar and Planetary Science Conf., 17th, Houston, TX; USA, March 17–21, 1986; J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. E537–E540.
11. *Alexakhin V. Yu. et al.* Use of the Tagged Neutron Technique for Detecting Dangerous Underwater Substances // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10. P. 860–867.
12. *Beyerle A., Hurley J. P., Tunnell L.* // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1990. V. 299. P. 458.

13. *Alexakhin V. Yu. et al.* Detection of Diamonds in Kimberlite by the Tagged Neutron Method // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 785. P. 9–13.
14. *Ipe N.E. et al.* A Cargo Inspection System Based on Pulsed Fast Neutron Analysis (PFNATM) // Radiat. Prot. Dosim. 2005. V. 116. P. 343–346.
15. *Litvak M.L. et al.* Associated Particle Imaging Instrumentation for Future Planetary Surface Missions // Nucl. Instr. Meth. A. 2019. V. 922. P. 19–27.
16. *Mitrofanov I.G. et al.* Cosmic Gamma-Ray Spectrometer with Tagged Charged Particles of Galactic Cosmic Rays // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 953. P. 163148.
17. *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.
18. *Bell J.F.* The Martian Surface. Composition, Mineralogy and Physical Properties. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2008.
19. *Kozyrev A.S. et al.* A Comparative Study of $\text{LaBr}_3(\text{Ce}^{3+})$ and CeBr_3 Based Gamma-Ray Spectrometers for Planetary Remote Sensing Applications // Rev. Sci. Instr. 2016. V. 87, No. 8. P. 085112.

Получено 15 декабря 2019 г.