

УДК 520.6523.4-36

ОБ ИЗУЧЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ СОСТАВА ВЕЩЕСТВА ЛУНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ НА БОРТУ МОБИЛЬНОГО АППАРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА “МЕЧЕНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ”

© 2020 г. А. Б. Санин^а, *, И. Г. Митрофанов^а, Б. Н. Бахтин^а, М. Л. Литвак^а, А. А. Аникин^а, Д. В. Головин^а, С. Ю. Никифоров^а

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*E-mail: sanin@nr.cosmos.ru

Поступила в редакцию 13.12.2019 г.

После доработки 16.04.2020 г.

Принята к публикации 13.07.2020 г.

В статье предложен метод “меченых космических частиц”, использующий естественный поток высокоэнергичных частиц ГКЛ для изучения состава приповерхностного слоя грунта небесного тела методами гамма-спектрометрии с высоким пространственным разрешением порядка нескольких десятков сантиметров. Рассмотрены результаты численного моделирования чувствительности прибора, реализующего предложенный метод, к определению типа изучаемого грунта. При работе на борту мобильного космического аппарата (лунохода) на поверхности лишенных атмосферы небесных тел, например, Луны или астероида, такой научный прибор позволит как выделить отдельные объекты с отличным от окружающей поверхности элементарным составом, так и построить профиль или даже карту локальной переменности элементарного состава грунта.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, космические лучи, планеты, грунт, моделирование

DOI: 10.31857/S0320930X20060055

ВВЕДЕНИЕ

Изучение распределения основных породообразующих химических элементов таких, как Fe, Ti, Ca, Si, Mg, Al, O и др., естественных радиоактивных элементов (K, Th и U), а также летучих соединений, например, водяного льда, предоставляет важную информацию об условиях формирования и эволюции небесных тел. Построить глобальные карты распределения указанных элементов и соединений по поверхности небесных тел с тонкой атмосферой или лишенных ее вовсе позволяют методы ядерной физики. Измерения с орбиты потоков нейтронов, рентгеновских и гамма-лучей позволяют определить концентрацию основных породообразующих элементов в верхнем слое грунта толщиной от нескольких сантиметров до глубины порядка одного метра, в зависимости от типа детектируемых частиц и их энергии.

Поверхность таких небесных тел непрерывно подвергаются воздействию энергичных заряженных частиц Солнечных и Галактических космических лучей (СКЛ и ГКЛ, соответственно). Бла-

годаря своей высокой энергии частицы ГКЛ проникают в приповерхностный слой грунта и производят целый каскад вторичных частиц на глубины до нескольких метров. Образовавшиеся в этом каскаде вторичные нейтроны блуждают в грунте и теряют энергию взаимодействуя в разнообразных процессах. Сталкиваясь с ядрами породообразующих элементов нейтроны теряют энергию и переводят их в возбужденное состояние в результате неупругого рассеяния. Возбужденные ядра переходят в основное состояние испуская характерные для каждого из них гамма-кванты. Кроме того, замедлившиеся до тепловых энергий нейтроны могут быть захвачены ядрами с образованием нестабильных изотопов, которые распадаясь также испускают характерные для них гамма-кванты. Другие характеристические гамма-кванты испускаются при распаде естественных радиоактивных элементов, всегда присутствующих в грунте небесного тела. Некоторое количество образовавшихся гамма-квантов и нейтронов способно покинуть поверхность небесного тела и свободно достичь детектора, расположенного на борту посадочного или орбитального космиче-

ского аппарата (Reedy и др., 1973; Reedy, 1978; Masarik, Reedy, 1996). Из анализа спектральных линий в зарегистрированных спектрах можно количественные оценки содержания в грунте тех ядер, которые их испустили. Анализ нейтронных спектров позволяет определить концентрацию в грунте водородсодержащих соединений, таких как вода или водяной лед. Впервые подобные методы изучения состава поверхности небесного тела были применены на борту советских космических аппаратов (КА) Луна-10 и Луна-12 (Виноградов и др., 1966). Впоследствии, научные инструменты, содержавшие нейтронные, рентгеновские и гамма-детекторы предоставили важную информацию о составе грунта Луны, Меркурия, Венеры, Марса, астероидов и кометы (см., например, Surkov и др., 1986; Metzger и др., 1973; Boynton и др., 2002; 2006; Prettyman и др., 2006; 2012; Goldsten и др., 2007; Litvak и др., 2008; Mitrofanov и др., 2010; Hasebe и др., 2010).

В настоящее время все чаще обсуждаются идеи пилотируемых полетов на Луну и в перспективе на Марс. В значительной степени возможность и стоимость реализации регулярной пилотируемой программы зависит от разумности выбора места расположения будущей базы, которое следует выбирать, основываясь на информации о разведанных локальных полезных ресурсах. Огромные массивы научных данных, полученных в том числе и в ходе проведения орбитальной нейтронной и гамма-спектрометрии Луны и Марса, позволяют обсуждать выбор потенциальных мест посадки. Однако, пространственное разрешение таких данных не превышает 10 км. Поэтому, представляется разумным проводить детальные исследования обнаруженных с орбиты интересных участков поверхности с борта стационарных или мобильных посадочных КА. Для этого в состав полезной нагрузки таких КА, наряду с другими приборами, могут быть включены нейтронные и гамма-спектрометры. Поскольку ресурс КА всегда ограничен и выбор конкретных наиболее важных и интересных объектов исследований должен быть проведен оперативно, актуальной является такая оптимизация спектрометров, которая позволяет получать максимально статистически достоверные данные за минимальное время накопления сигнала, т.е. предоставляют данные с наилучшим соотношением сигнал/фон. Кроме того, мобильный КА может относительно быстро проезжать локальные участки поверхности, грунт которых имеет важные особенности, и время определения этих особенностей должно быть достаточно коротким не только для определения самого факта наличия особенности, но и для воз-

можности изменить программу работы для детального изучения обнаруженной особенности. Выбор объекта исследования будет неполон, если он будет основан только лишь на внешнем виде объекта. Важное дополнение несет информация о его химическом составе и о том, на сколько он отличается от состава окружающих объектов. Любая неоднородность в химическом составе поверхности или какого-то объекта может сделать его предметом детального изучения. Конечно, средний состав поверхности в месте посадки лунохода будет примерно известен по орбитальным ИК-, УФ-, гамма- и нейтронным измерениям, однако, для подготовки пилотируемых экспедиций и строительства лунной базы, может потребоваться детальное изучение не только самой поверхности, но и подповерхностных слоев лунного грунта на масштабах от нескольких метров до километров, доступных только с борта лунохода. В состав его полезной нагрузки должен входить максимально широкий набор инструментов — ИК- и УФ-спектрометры, дающих информацию о поверхности объекта исследования, гамма- и нейтронные спектрометры, позволяющие заглянуть на десятки сантиметров под поверхность, и, возможно, радар, дающий представление о слоях грунта на глубины от метров до сотен метров. Используя такой набор информации, можно будет приоритизировать объекты исследования не только на поверхности Луны, но и на некоторой глубине, доступной для взятия образцов посредством, например, бурения. Гамма-спектрометр — это еще один инструмент, позволяющий не просто посмотреть на исследуемый объект снаружи, но и определить его состав на глубину до нескольких десятков сантиметров.

МЕТОД “МЕЧЕНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ”

Получение наиболее статистически достоверной информации (наилучшее отношение сигнал/фон) за отведенное время измерений всегда является одной из актуальнейших задач в науке, в том числе и в гамма-спектроскопии. В планетной гамма-спектрометрии измеряются спектры гамма-лучей, рожденных теми или иными субатомными частицами в том объеме вещества, в который они способны проникнуть. Обычно, таким первичными частицами являются высокоэнергичные заряженные частицы ГКЛ. Так как используется естественный постоянный источник первичного излучения, данный метод спектрометрии можно называть пассивным. Иногда в экспериментах на борту посадочных КА приме-

няют активный метод, когда первичные частицы создаются искусственно, например, нейтронными генераторами, дающими в нужный момент времени изотропный поток быстрых нейтронов (Litvak и др., 2008).

Частицы ГКЛ, и нейтроны обладают большой проникающей способностью и возбуждают гамма-излучение не только в грунте изучаемого небесного тела, но и в элементах конструкции КА и самого прибора-спектрометра. Многие химические элементы, входящие в состав КА и прибора, обычно содержатся в изучаемом грунте (например, алюминий, железо, титан, магний, углерод, водород и т.д.). Очевидно, что положение характеристических гамма-линии в спектре совпадают в том и другом случае. Значит, для правильной оценки концентрации указанных химических элементов спектр излучения КА является фоновым, и следует найти способ отделить его от спектра излучения грунта. Один из методов — измерение на перелете к небесному телу спектра, регистрируемого гамма-излучения КА, и использование этого спектра для коррекции измерений выполненных после посадки на поверхность. Этот метод сложно осуществить, так как на перелете КА значительная (от 50% и более) часть массы аппарата представляет собой топливо, которая израсходуется при посадке, и, возможно, частей конструкции, которые не окажутся на поверхности. Значит, спектр гамма-излучения КА после посадки будет значительно отличаться от измеренного на перелете. Что потребует привлечения модельнозависимых вычислений. Другой способ — применение в приборе массивных коллимационных экранов вокруг детекторов. Недостаток этого метода в том, что сами массивные экраны также являются источниками локального фона нейтронного и гамма-излучения, который трудно измерить или смоделировать во время наземных предполетных калибровок спектрометра. Эти способы приходится применять при орбитальных измерениях.

В случае измерений на поверхности можно, например, применить так называемый метод “меченых частиц”. Он основан на использовании нейтронного генератора для возбуждения гамма-излучения грунта. Но в отличие от обычного метода активного облучения грунта, в методе “меченых нейтронов” отбираются (метятся) только те нейтроны, которые вылетели из источника в направлении изучаемого объекта, и те гамма-кванты, регистрация которых была синхронизована по времяпролетной методике с “мечеными нейтронами”. Изменяя положение временного окна относительно момента регистрации “меченого нейтрона”, можно просканировать изучаемый

объект в глубину. Этот метод широко используется на Земле, например, в геологоразведке (Alexakhin и др., 2015) и системах таможенного контроля (Pesente и др., 2007). Он нашел отражение в разработке новейших космических научных приборов (Litvak и др., 2019). К недостаткам метода следует отнести необходимость использования сложного в изготовлении нейтронного генератора, позволяющего не только получать поток нейтронов, но и “метить” их долю, вылетающую в нужном телесном угле.

Коллективом авторов данной статьи было предложено использовать естественный поток ГКЛ для получения потока “меченых” частиц — “меченых космических лучей”. Используя схему совпадения из двух детекторов заряженных частиц, которую можно назвать протонным телескопом, можно из изотропного потока ГКЛ, падающих на поверхность небесного тела, отбирать только частицы, прошедшие через оба детектора. Варьируя площадь детекторов, расстояние между ними и высоту над поверхностью, можно выделять из общего потока ГКЛ только частицы, которые облучили изучаемый участок грунта. Если после факта регистрации частицы ГКЛ обоими детекторами открывать для регистрации гамма-кванта короткое временное окно, то можно ожидать, что зарегистрированный гамма-спектрометром фотон скорее всего пришел из изучаемого участка грунта. Выбирая разумно короткую длительность временного окна, можно минимизировать количество регистраций фоновых гамма-квантов, родившихся вне изучаемого участка грунта, но случайно зарегистрированных гамма-детектором в течение выбранного временного окна.

Работающий по предложенной схеме гамма-спектрометр относительно прост в изготовлении и не создает дополнительного собственного радиационного фона, но позволяет достигнуть лучшего пространственного разрешения, чем простой пассивный гамма-детектор. Он также позволяет практически полностью исключить фоновое излучение от КА. Прибор может быть использован на борту стационарного или мобильного КА на поверхности любого небесного тела с тонкой атмосферой или без нее. Отсутствие у небесного тела плотной атмосферы, аналогичной земной или венерианской, является критически важным условием для достижения космическими лучами ее поверхности.

Таким образом, представляется оптимальным выбор прибора на основе метода “меченых космических лучей” для размещения на борту стационарного или мобильного посадочного КА. Первые лабораторные измерения с макетом косми-

ческого гамма-спектрометра, основанного на предложенном методе, были проведены на протонном пучке фазотрона ЛЯП ОИЯИ в 2018 г. (Mitrofanov и др., 2019) и продолжены в 2019 г. (Митрофанов и др., 2019). Они подтвердили перспективность этого метода. Ниже обсуждаются особенности проведения эксперимента с таким прибором на борту мобильного посадочного КА на поверхности Луны.

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА

Очевидно, что определение чувствительности предлагаемого метода является важной задачей для решения вопроса о его практической применимости. Чувствительность гамма-спектрометра к характеристическим линиям излучения определяется в основном следующими факторами: величиной статистической обеспеченности каждой измеряемой спектральной линии и уровнем фонового излучения в ее спектральной окрестности. Но первоочередным является следующий вопрос. Предлагаемый метод накопления спектра гамма-квантов, пришедших в коротком временном окне после регистрации заряженной частицы ГКЛ, способен предоставить спектры гамма-излучения, возникающего в реакциях неупругого рассеяния и/или скола ядер энергичными частицами ГКЛ. Большое количество характеристических линий, возникающих, например, в реакциях захвата медленных нейтронов или радиоактивного распада нестабильных изотопов, остаются недоступны этому методу. Поэтому следует определить, возможно ли в принципе используя только неупругие характеристические линии различить типы лунного грунта?

Для ответа на этот и другие связанные вопросы, было проведено численное моделирование спектральной плотности потока гамма-излучения от двух реальных типов грунта Луны и от возможной конструкции посадочного КА с типичным химическим составом. Для моделирования был использован инструментарий для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло — Geant4 версии 10.06.b01. Был выбран однородный железистый анортозитный (FAN, Lawrence и др., 2006) состав лунного реголита, соответствующий высокогорным и полярным районам, с содержанием водорода около 100 промилле по массе и температурой 100 К. Второй выбранный тип выбранного грунта — один из вариантов “морских” лунных грунтов, полученный из анализа образцов породы в районе посадки КА Apollo-11 (A11, Lawrence и др., 2006). Такой тип грунта был выбран

потому, что средний атомный вес ядер составляющих его химических элементов в наибольшей степени отличается от грунтов другого типа. А известно, что этот параметр является одним из основных факторов, коррелирующих с производством в грунте частицами ГКЛ вторичных нейтронов и гамма-квантов. На производство вторичных нейтронов влияет концентрация тяжелых химических элементов (например, железа), с высоким сечением образования быстрых нейтронов в реакциях скола ядер частицами ГКЛ и неупругих реакциях с другими быстрыми нейтронами. Так, концентрация железа в грунте A11 в 8.6 раза выше, чем в грунте FAN. Концентрации магния также сильно отличаются, их отношение составляет 9.4 раза в пользу грунта A11. Очень сильно различаются концентрации титана, их отношение составляет почти 60 раз в пользу грунта A11 при концентрации менее 5% по массе. Кроме того, концентрация тяжелых и редкоземельных элементов, таких как железо, кадмий, самарий, гадолиний и т.п., обладающих большим сечением поглощения тепловых нейтронов, сильно влияет на поглощение таких нейтронов. Концентрация самария и гадолиния отличается для этих грунтов еще сильнее, так как они отсутствуют в грунте FAN. Плотность потока быстрых и тепловых нейтронов влияют на производство гамма-квантов в реакциях неупругого рассеяния и захвата, соответственно. Поэтому из сопоставления химического состава указанных типов грунта можно ожидать существенного различия спектральных распределений потока гамма-излучения от них. Химический состав рассмотренных грунтов показан для справки в табл. 1. Грунты с промежуточными значениями концентрации указанных элементов будут производить и промежуточные значения потоков нейтронов и гамма-квантов.

Энергетическое распределение протонов и альфа-частиц в спектре ГКЛ было описано с помощью модели, описанной в работе Usoskin и др., 2017 с величиной потенциала модуляции $\phi = 550$ MV, соответствующей солнечной активности начала восходящей ветви нового цикла после минимума. Вклад более тяжелых частиц космических лучей в модели не учитывался. Такая модель предсказывает изотропный всенаправленный поток частиц ГКЛ, равный 3.6 частиц $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ среди которых 91.52% составляют протоны и 8.47% — альфа-частицы.

С помощью численного моделирования было получено, что под действием указанного потока ГКЛ из поверхности грунта FAN выходит полный поток гамма-излучения, равный 4.2 фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, а в окне “послесвечения” 0–100 нс после попада-

Таблица 1. Массовая доля химических элементов, входящих в состав грунтов FAN и A11 (воспроизведен из статьи Lawrence и др., 2006)

Элемент	Грунт A11	Грунт FAN
O	0.4252	0.4560
Na	0.0035	0.0045
Mg	0.0478	0.0051
Al	0.0666	0.1763
Si	0.1963	0.2066
Ca	0.0839	0.1359
Ti	0.0476	0.0008
Mn	0.0016	0.0000
Fe	0.1275	0.0148
Sm	1.38×10^{-5}	0.0000
Gd	1.80×10^{-5}	0.0000

ния частицы ГКЛ в грунт, из него выходит поток, составляющий $3.5 \text{ фотон см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для грунта A11 полный поток равен $4.4 \text{ фотон см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и поток в указанном окне “послесвечения” составляет $3.6 \text{ фотон см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, соответственно. Временное окно “послесвечения” 0–100 нс (для краткости можно назвать “коротким окном”) было выбрано исходя из того, что основное количество реакций скола ядер, неупругих взаимодействий с быстрыми нейтронами и испускания гамма-квантов ядрами при переходе из возбужденного состояния в основное за это время успевают произойти и возникшие в результате фотоны успевают достичь детектора. Более подробно то, какие процессы в различные моменты времени ответственны за производство в грунте гамма-квантов, рассмотрены в работе Mitrofanov и др., 2019.

Полученные в результате моделирования спектры гамма-излучения, выходящего из поверхности рассмотренных грунтов, в интегральном потоке и “коротком” временном окне “послесвечения” показаны на рис. 1 и 2, соответственно. В табл. 2 приведен список наиболее сильных гамма-линий, их интенсивностей и изотопов элементов, ответственных за излучение

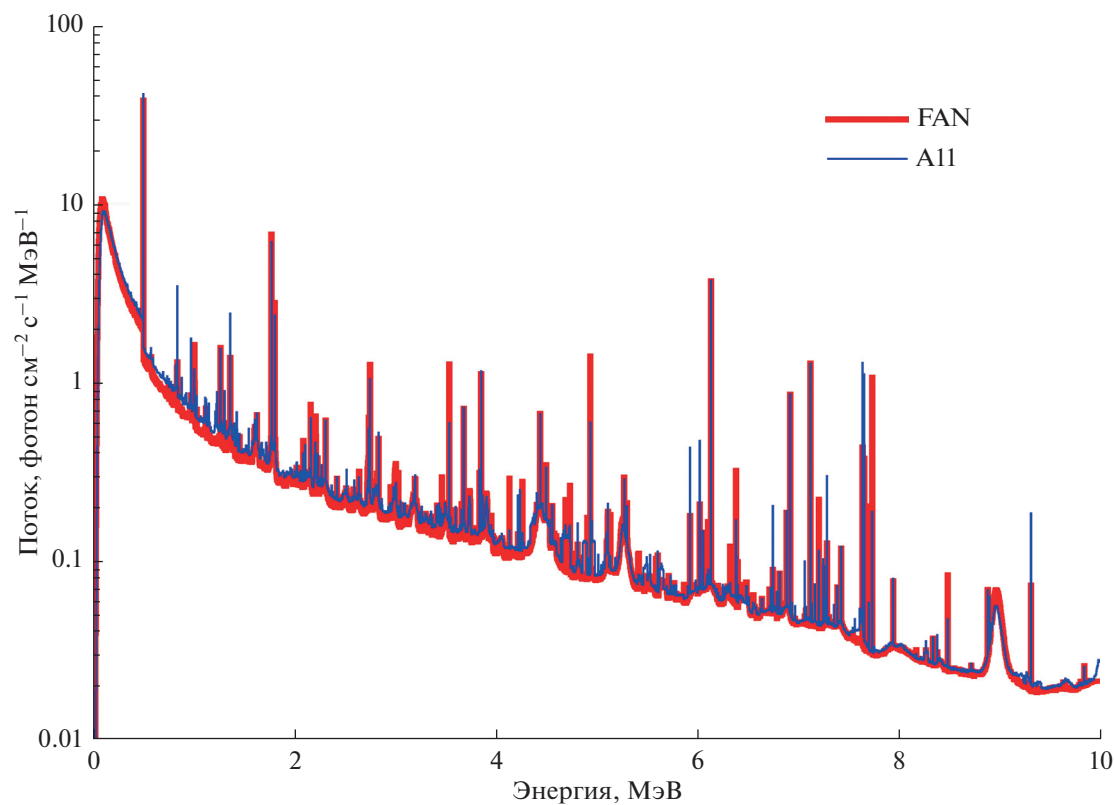


Рис. 1. Спектральная плотность полного потока гамма-излучения, выходящего из грунтов FAN (толстая красная линия) и A11 (тонкая синяя линия).

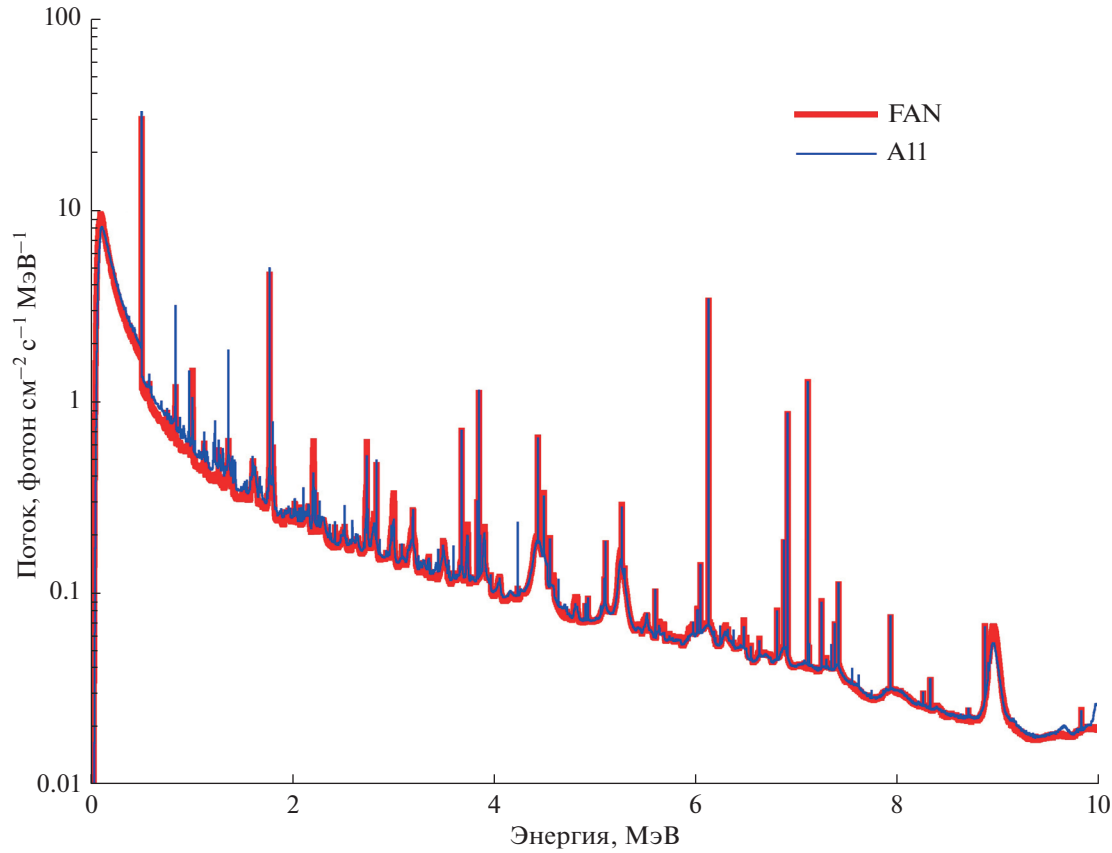


Рис. 2. Спектральная плотность потока гамма-излучения, выходящего из грунтов FAN (толстая красная линия) и A11 (тонкая синяя линия), во временном окне 0–100 нс после попадания частицы ГКЛ в грунт.

Таблица 2. Список гамма-линий хорошо различимых в “коротком” временном окне, которые можно использовать для отождествления грунтов A11 и FAN

Энергия МэВ	Интенсивность, фотон см ⁻² с ⁻¹ МэВ ⁻¹				Источник	Номер на рис. 6 и 8
	A11		FAN			
	“короткое” окно	интегральное окно	“короткое” окно	интегральное окно		
0.8467	4.75	5.21	1.13	1.17	⁵⁶ Fe*	1
0.9835	1.63	2.11	0.14	0.43	⁴⁸ Ti*	2
1.0144	0.92	1.34	1.84	2.072	²⁷ Al(n,nγ)	3
1.2383	0.63	0.63	0.05	0.05	⁵⁶ Fe(n,nγ)	4
1.3686	2.59	3.69	0.25	1.625	²⁴ Mg(n,nγ), ²⁴ Na	5
1.7790	4.60	5.81	4.30	6.46	²⁸ Si*, ²⁸ Al, ²⁶ Mg* (1.7798)	6
2.2110	0.19	0.20	0.40	0.40	²⁷ Al(n,nγ)	7
3.0040	0.09	0.09	0.19	0.19	²⁷ Al(n,nγ)	8

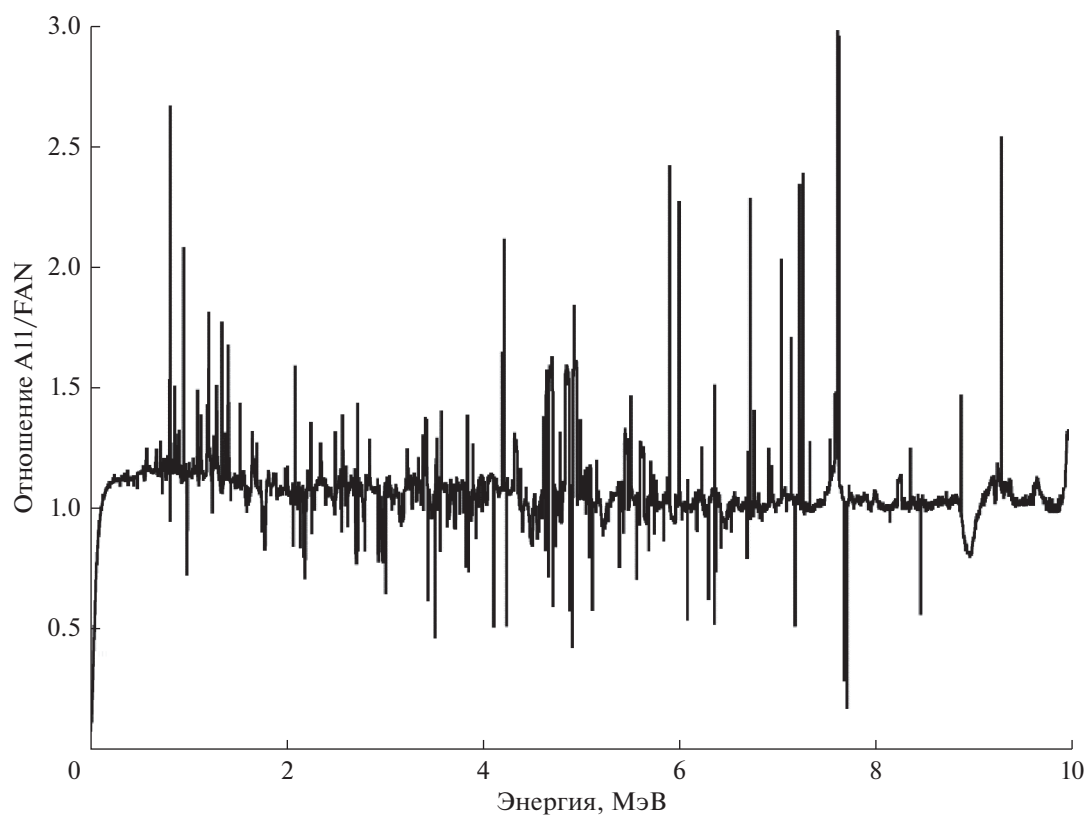


Рис. 3. Отношение спектральных плотностей полного потока гамма-излучения от грунта A11 к грунту FAN.

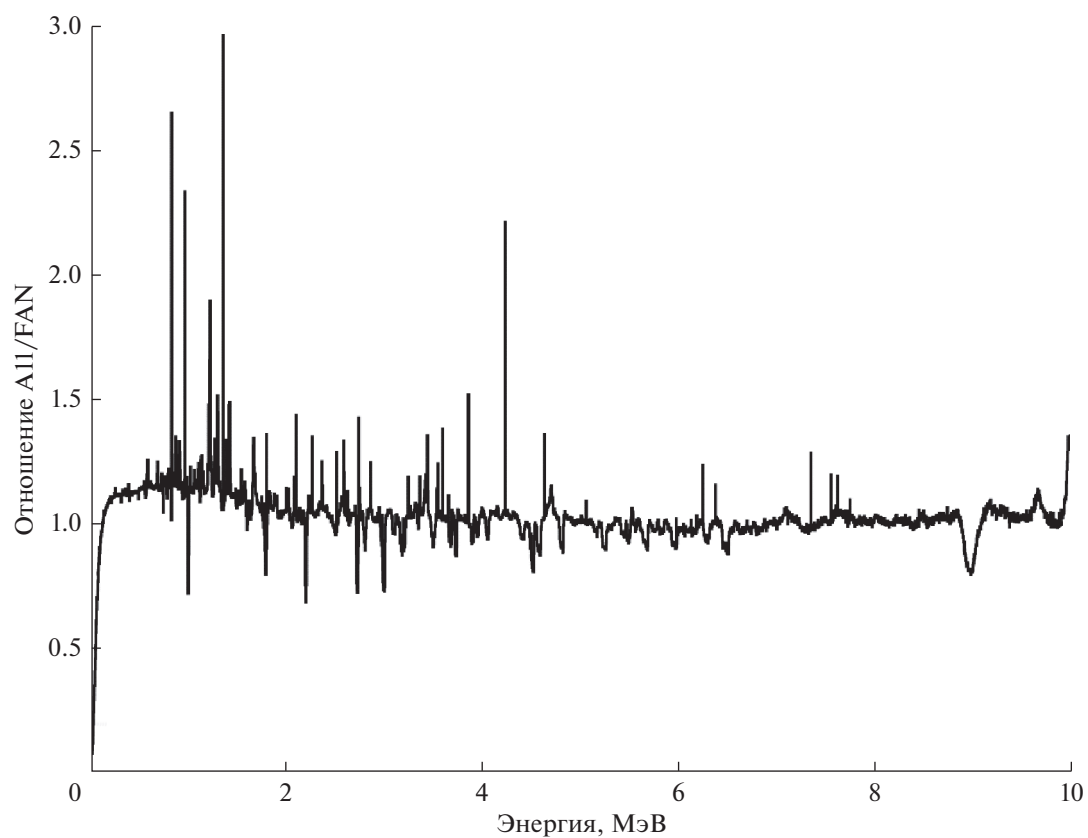


Рис. 4. Отношение спектральных плотностей потока гамма-излучения от грунта A11 к грунту FAN во временном окне 0–100 нс.

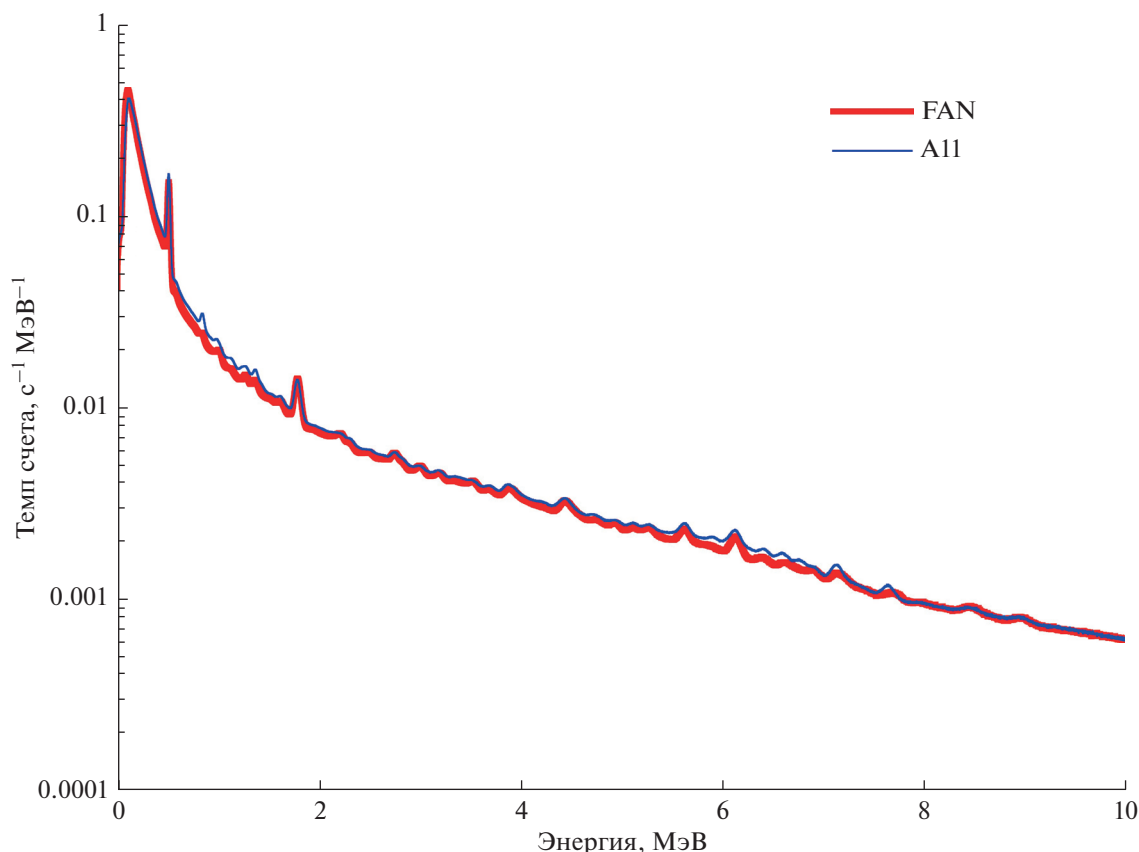


Рис. 5. Спектр скорости счета гамма-квантов в детекторе CeBr_3 , полученный в результате регистрации полных потоков гамма-излучения от грунтов FAN (толстая красная линия) и A11 (тонкая синяя линия).

данных ядерных линий. Очевидно, что наиболее сильное различие интенсивностей линий наблюдается для тех элементов, концентрации которых в грунтах различаются наиболее сильно — магний, алюминий, титан и железо. Эти элементы можно назвать ядерно-физическими маркерами данных типов грунтов. Среди большого количества спектральных линий, наблюдаемых в полном потоке излучения, присутствует несколько десятков линий с заметно различающейся интенсивностью, которые соответствуют элементам-маркерам рассмотренных типов грунтов и излучаются во всех возможных процессах от неупругого рассеяния до радиоактивного распада. Эти линии хорошо заметны на рис. 3 (отношение спектра потока от грунта A11 к спектру потока от грунта FAN), как резкие выбросы вверх или вниз относительно континуума. Однако большинство указанных ядерных линий также генерируются веществом КА, которое также содержит в своем составе аналогичные элементы (Al, Mg, Fe, Ti, O и т.д.) и также подвергается бомбардировке энергичными частицами ГКЛ.

Основной целью проведенного моделирования было выяснить, возможно ли при изучении спектров гамма-лучей в “коротком” временном окне “послесвечения” найти достаточное количество спектральных линий, рожденных в процессах неупругого рассеяния нейтронов на ядрах элементов-маркеров? Оказалось, что действительно, в этом окне можно найти более 30 различных линий (рис. 4), рождающихся в течение короткого времени после воздействия на вещество заряженной частицы ГКЛ в процессах неупругого рассеяния нейтронов, и интенсивность которых существенно меняется при переходе от одного типа грунта к другому. Естественно, что линии с наибольшим различием интенсивности, обусловленные своим рождением ядрами элементов-“маркеров”, в наибольшей степени интересны для определения типа изучаемого грунта.

Этот вывод получен из численного анализа спектральной плотности потока гамма-лучей. Однако на практике всегда приходится анализировать экспериментальные данные регистрации фотонов тем или иным детектором со своим

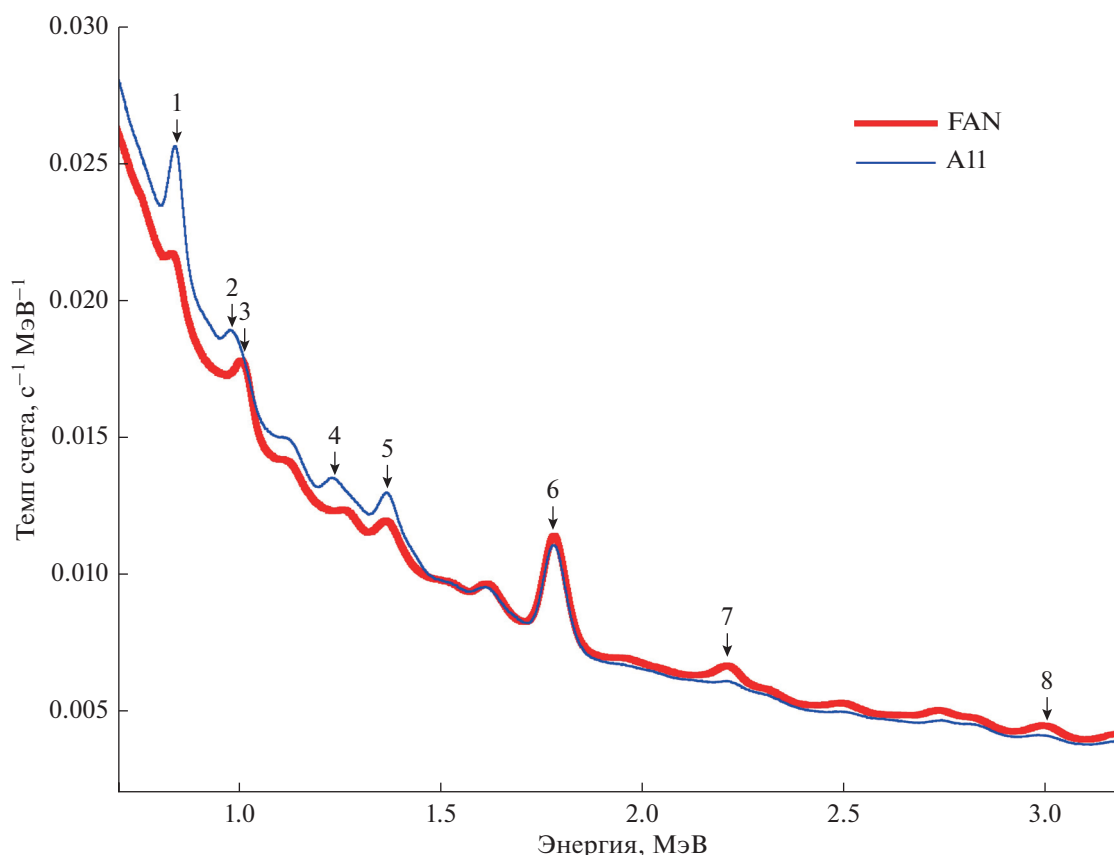


Рис. 6. Спектры скорости счета гамма-квантов в детекторе CeBr_3 в диапазоне 700 кэВ–3.2 МэВ, полученные в результате регистрации потоков гамма-излучения от грунтов FAN (толстая красная линия) и A11 (тонкая синяя линия), в “коротком” временном окне. Отмечены положения линий-“маркеров” (табл. 2), позволяющих идентифицировать грунт.

энергетическим разрешением и своей функцией чувствительности. Поэтому, было выполнено численное моделирование спектров отсчетов, возникающих в детекторе на основе сцинтилляционного кристалла CeBr_3 , при регистрации спектров полного потока гамма-лучей (рис. 5) и спектров гамма-лучей в “коротком” окне “запоздывания” от грунтов A11 и FAN. На рис. 6 показаны полученные спектры в энергетическом диапазоне 0.7–3.2 МэВ с указанием линий, позволяющих идентифицировать типы грунта. Несмотря на то, что детекторы, основанные на сцинтилляционных кристаллах CeBr_3 , обладают одним из самых высоких энергетических разрешений среди данного типа детекторов (~4% FWHM на энергии 662 кэВ), на рис. 5 и 6 хорошо заметны только наиболее интенсивные линии. Более того, анализ измеренных спектров осложняется тем, что существуют случаи, когда в пределах разрешающей способности детектора находятся несколько линий, образованных изотопами различных хими-

ческих элементов. Тем не менее, при условии хорошей статистической обеспеченности, спектры, экспериментально измеренные с помощью данного типа детекторов, вполне могут быть использованы не только для идентификации типа грунта, но и для определения содержания в них основных породообразующих химических элементов.

Ситуация существенно улучшается в случае использования детектора на основе высокочистого германия. Благодаря чрезвычайно высокому энергетическому разрешению, данный тип детекторов существенно облегчает идентификацию и анализ интенсивностей гамма-линий (рис. 7). Пример отношения рассчитанных спектров отсчетов, полученных в германиевом детекторе при регистрации гамма-излучения от грунтов A11 и FAN, показан на рис. 8. Очевидно, что благодаря высокому энергетическому разрешению детекторы этого типа предпочтительны для гамма-спектрометрии на борту КА на поверхности Луны. Однако их применение в космических условиях

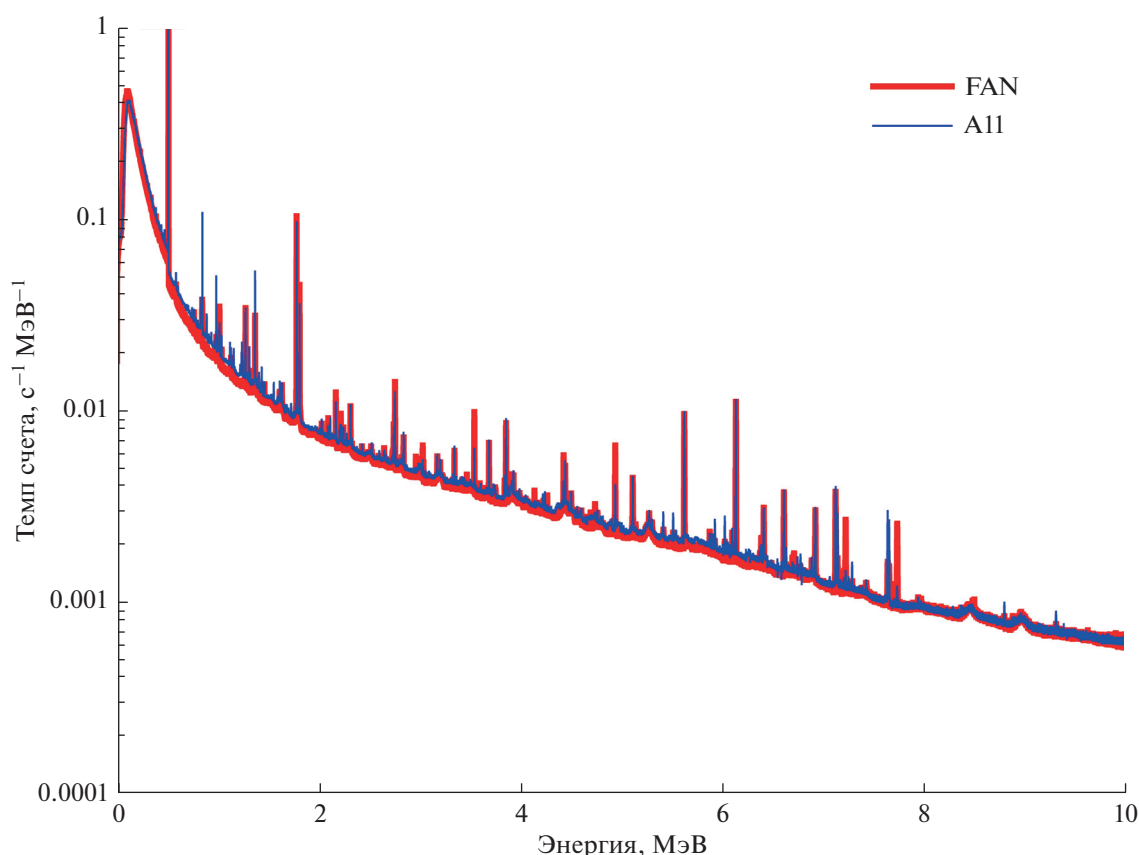


Рис. 7. Спектр скорости счета гамма-квантов в полупроводниковом детекторе на основе высокочистого германия, полученный в результате регистрации полных потоков гамма-излучения от грунтов FAN (толстая красная линия) и A11 (тонкая синяя линия).

осложнено тем фактом, что они требуют криогенной системы охлаждения, которая для условий космического применения оказывается дорогой, массивной и сложной в реализации.

ВЫВОДЫ

Предложен метод “меченых космических частиц”, использующий естественный поток высокоэнергичных частиц ГКЛ для изучения состава приповерхностного слоя грунта небесного тела с высоким пространственным разрешением порядка нескольких десятков см, намного превышающем разрешение обычного пассивного детектора гамма-излучения. При установке на борту мобильного КА на поверхности астероида или Луны научный прибор, реализующий этот метод, позволяет выделить для дальнейшего изучения другими инструментами отдельные объекты с отличным от окружающей поверхности внутренним элементным составом и построить профиль (или даже карту) локальной переменности элементного состава грунта. Причем данный научный при-

бор предоставляет информацию об элементном составе на глубину до нескольких десятков сантиметров. Показано, что для получения информации о составе грунта могут использоваться характеристические гамма-линии, возникающие в основном в реакциях неупругого рассеяния нейтронов на ядрах основных порообразующих элементов, таких как алюминий, железо, магний, титан и др. (табл. 2). Проверено, что указанных линий достаточно для отождествления элементов-“маркеров”, изменение количества которых позволяет определить тип изучаемого грунта.

Численное моделирование регистрации гамма-излучения в полном потоке и “коротком” временном окне “запаздывания” относительно моментов воздействия ГКЛ на вещество показало потенциальную возможность применения сцинтилляционных детекторов (например, на основе кристалла CeBr_3) для экспериментальной реализации предлагаемого метода. Полупроводниковые детекторы на основе высокочистого германия обладают значительно более высоким энергетиче-

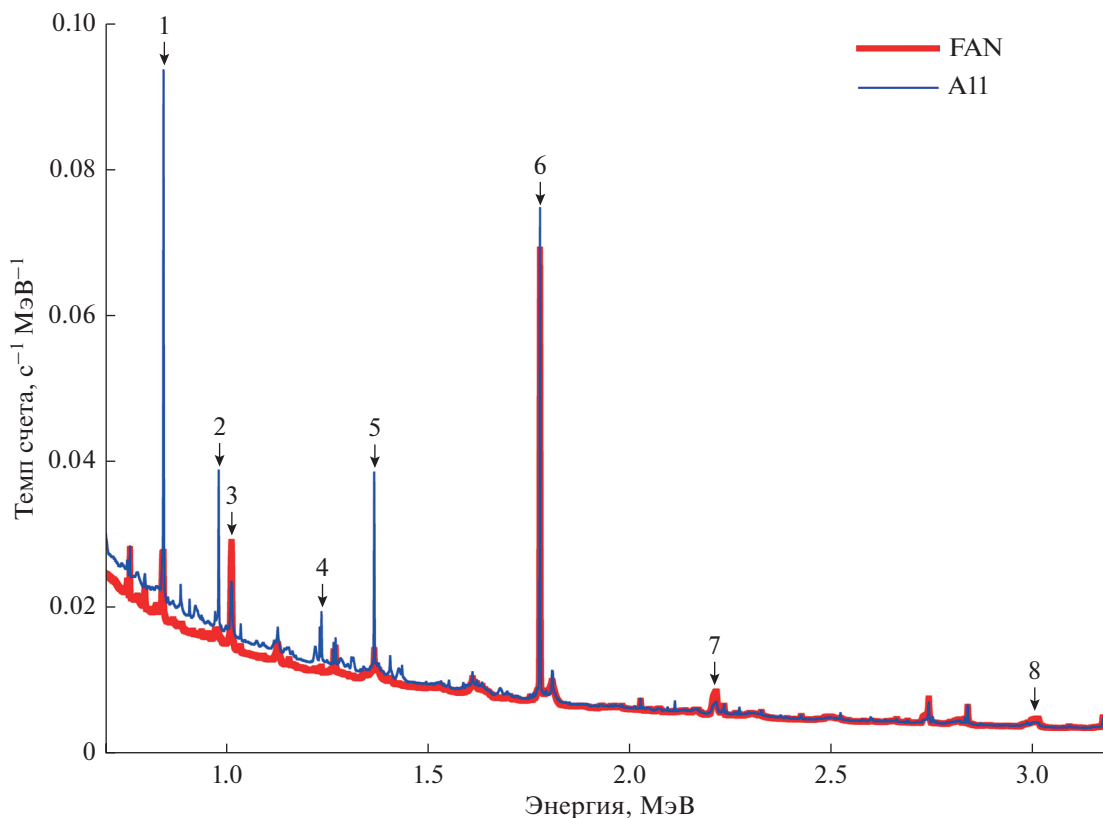


Рис. 8. Спектры скорости счета гамма-квантов в полупроводниковом детекторе на основе высокочистого германия в диапазоне 700 кэВ–3.2 МэВ, полученные в результате регистрации потоков гамма-излучения от грунтов FAN (толстая красная линия) и A11 (тонкая синяя линия), в “коротком” временном окне. Отмечены положения линий-“маркеров” (табл. 2), позволяющих идентифицировать грунт.

ским разрешением и позволяют существенно облегчить задачу по отождествлению зарегистрированных гамма-линий и идентификации соответствующих им элементов. Однако, для данный тип детекторов требует охлаждения до криогенных температур. Это серьезно увеличивает массу научного прибора, усложняет его изготовление и накладывает ограничения на возможности использования в конкретных космических миссиях. Можно предположить, что реализация ближайшей перспективной миссии с автоматическим “Луноходом-геологом” будет включать эксперимент с гамма-спектрометром с мечеными заряженными частицами ГКЛ, основанный на применении сцинтилляционного детектора на основе кристалла CeBr_3 и детектор заряженных частиц типа “протонного телескопа”.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов А.П., Сурков Ю.А., Чернов Г.М. Исследования интенсивности и спектрального состава гамма-излучения Луны на автоматической станции Луна-10 // Докл. АН СССР. 1966. Т. 170 № 3. С. 561–564.
- Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Головин Д.В. и др. Гамма-спектрометрия составных мишеней-аналогов планетного вещества на протонном пучке ускорителя ОИЯИ с использованием метода меченых протонов // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 3(228). С. 299–313
- Alexakhin V.Yu., Bystritsky V.M., Zamyatin N.I., Zubarev E.V., Krasnoperov A.V., Rapatsky V.L., Rogov Yu.N., Sadvovsky A.B., Salamatov A.V., Salmin R.A., Sapozhnikov M.G., Slepnev V.M., Khabarov S.V., Razinkov E.A., Tarasov O.G., Nikitin G.M. Detection of diamonds in kimberlite by the tagged neutron method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2015. V. 785. P. 9–13.
- 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., Mikhieva L., Taylor G.J., Tokar R., Shinohara C. Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: evi-

- dence for subsurface ice deposits // *Science*. 2002. V. 297. № 5578. P. 81–85.
- Boynton W.V., Taylor G.J., Evans L.G., Reedy R.C., Starr R., Janes D.M., Kerry R.E., Drake D.M., Kim K.J., Williams R.M.S., Crombie M.K., Dohm J.M., Baker V., Metzger A.E., Karunatillake S., Keller J.M., Newsom H.E., Arnold J.R., Brückner J., Englert P.A.J., Gasnault O., Sprague A.L., Mitrofanov I., Squyres S.W., Trombka J.I., d'Uston L., Wänke H., Hamara D.K. Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the low- and mid-latitude regions of Mars // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 112. № E12S99. P. 1–15.
- 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., Strohbehn 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.
- Hasebe N., Shibamura E., Miyachi T., Takashima T., Kobayashi M.-N., Okudaira O., Yamashita N., Kobayashi S., Karouji Y., Hareyama M., Kodaira S., Komatsu S., Hayatsu K., Iwabuchi K., Nemoto S., Sakurai K., Miyajima M., Ebihara M., Hihara T., Arai T., Sugihara T., Takeda H., d'Uston C., Gasnault O., Diez B., Forni O., Maurice S., Reedy R.C. High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer On Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA) // *Transactions of Space Technology Japan*. 2010. V. 7. P. Pk_35–Pk_41.
- Lawrence D.J., Feldman W.C., Elphic R.C., Hagerty J.J., Maurice S., McKinney G.W., Prettyman T.H. Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. E08001.
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Barmakov Yu.N., Behar A., Bitulev A., Bobrovnikitsky Yu., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Bragin S.I., Churin S., Grebennikov A.S., Konovalov 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 for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8. № 3. P. 605–612.
- Litvak M.L., Barmakov Y.N., Belichenko S.G., Bestaev R.R., Bogolubov E.P., Gavrychenkov A.V., Kozyrev A.S., Mitrofanov I.G., Nosov A.V., Sanin A.B., Shvetsov V.N., Yurkov D.I., Zverev V.I. Associated particle imaging instrumentation for future planetary surface missions // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Res. A*. 2019. V. 922. P. 19–27.
- Masarik J., Reedy R. Gamma ray production and transport in Mars // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № E8. P. 18891–18912.
- Metzger A.E., Trombka J.I., Peterson L.E., Reedy R.C., Arnold J.R. Lunar Surface Radioactivity: Preliminary Results of the Apollo 15 and Apollo 16 Gamma-Ray Spectrometer Experiments // *Science*. 1973. V. 179. № 4075. P. 800–803.
- Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazarico E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Nandikotkur G., Neumann G.A., Nuzhdin I., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Smith D.E., Starr R., Tretyakov V.I., Trombka J., Usikov D., Varenikov A., Vostrukhin A., Zuber M.T. Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // *Science*. 2010. V. 330. № 6003. P. 483–486.
- 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 // *Nuclear Inst. and Methods in Physics Res. A*. 2020. V. 953. P. 163148.
- Pesente S., Nebbia G., Visti G., Daniele F., Fabris D., Lunarodon M., Moretto S., Nad K., Sudac D., Valkovic V. Progress in tagged neutron beams for cargo inspections // *Nucl. Instrum. and Methods in Physics Res. B*. 2007. V. 261. P. 268–271.
- Prettyman T.H., Hagerty J.J., Elphic R.C., Feldman W.C., Lawrence D.J., McKinney G.W., Vaniman D.T. Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № E12. P. E12007.
- Prettyman T.H., Mittlefehldt D.W., Yamashita N., Lawrence D.J., Beck A.W., Feldman W.C., McCoy T.J., McSween H.Y., Toplis M.J., Titus T.N., Tricarico P., Reedy R.C., Hendricks J.S., Forni O., Le Corre L., Li J.-Y., Mizzon H., Reddy V., Raymond C.A., Russell C.H. T. Elemental Mapping by Dawn Reveals Exogenic H in Vesta's Regolith // *Science*. 2012. V. 338. № 6104. P. 242–246.
- Reedy R.C., Arnold J.R., Trombka J.I. Expected γ ray emission spectra from the Lunar surface as a function of chemical composition // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. № 26. P. 5847.
- Reedy R.C. Planetary gamma-ray spectroscopy // *Lunar and Planet. Sci. Conf. Proc.* 1978. V. 3. P. 2961–2984.
- Surkov Yu.A., Moskal'yova L.P., Moskaleva L.P., Kharyukova V.P., Dudin A.D., Smirnov G.G., Zaitseva S.Ye. Venus Rock Composition at the Vega 2 Landing Site // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. E215–E219.
- Usoskin I.G., Gil A., Kovaltsov G.A., Mishev A.L., Mikhailov V.V. Heliospheric modulation of cosmic rays during the neutron monitor era: Calibration using PAMELA data for 2006–2010 // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. P. 3875–3887.