

## **СРАВНЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО (HPGe) И СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО (CeBr<sub>3</sub>) ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГАММА-СПЕКТРОВ, ИНИЦИИРОВАННЫХ НЕЙТРОНАМИ В МОДЕЛИ ПЛАНЕТАРНОГО ГРУНТА**

*Д. В. Головин<sup>a, 1</sup>, М. Л. Литвак<sup>a</sup>, И. Г. Митрофанов<sup>a</sup>,  
А. А. Вострухин<sup>a</sup>, П. В. Дубасов<sup>b</sup>, А. О. Зонтиков<sup>b</sup>,  
А. С. Козырев<sup>a</sup>, А. Р. Крылов<sup>b</sup>, В. А. Крылов<sup>b</sup>,  
М. И. Мокроусов<sup>a</sup>, А. Н. Репкин<sup>b</sup>, А. Б. Санин<sup>a</sup>,  
Г. Н. Тимошенко<sup>b, e</sup>, К. В. Удовиченко<sup>b</sup>, В. Н. Швецов<sup>b</sup>*

<sup>a</sup> Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>b</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>e</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Представлены результаты физических измерений на модели планетного вещества, полученные с помощью детекторов на основе высокочистого германия (HPGe) и бромида церия (CeBr<sub>3</sub>) методом нейтронно-активационного анализа. Проведено сравнение двух типов детекторов по регистрируемым  $\gamma$ -линиям в диапазоне 200 кэВ – 8 МэВ в условиях облучения модели планетного вещества быстрыми нейтронами с энергией 14 МэВ от импульсного нейтронного генератора. Результаты исследований будут использованы при разработке научной аппаратуры для проведения экспериментов по активной нейтронной и  $\gamma$ -спектроскопии поверхности планет в будущих российских и международных посадочных миссиях «Луна-Глоб», «Луна-Ресурс» и «ЭкзоМарс-2020».

The paper presents the results of physical measurements on the model of planetary soil which were obtained using detectors based on High Purity Germanium (HPGe) and cerium bromide crystal (CeBr<sub>3</sub>). Method of Neutron Activation Analysis (NAA) was used. Two types of detectors were compared for gamma lines in the energy range of 200 keV – 8 MeV during irradiation of thick target with 14-MeV neutrons from pulse neutron generator. These results will be used for designing scientific instruments to perform experiments of active neutron and gamma-ray spectroscopy on the surface of the planets during Russian and international missions “Luna-Glob”, “Luna-Resource” and “ExoMars-2020” using NAA.

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

---

<sup>1</sup>E-mail: golovin@np.cosmos.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Определение элементного состава поверхностей небесных тел является одной из важных задач планетных исследований. Информация о химическом составе грунта, полученная с помощью космической  $\gamma$ -спектрометрии, позволяет судить о процессах образования планет, геологических и геохимических процессах, формировавших поверхность планет и их спутников в разные периоды времени их эволюции [1–3]. Также эти данные необходимы для подготовки будущих космических миссий в контексте создания условий для длительного нахождения человека в космосе (обитаемая лунная база) и добычи полезных ископаемых на ближайших планетах, в первую очередь на Луне и Марсе.

Примером орбитальных экспериментов, выполненных за последние два десятилетия, могут служить измерения  $\gamma$ -излучения поверхности Марса с орбиты высотой 400 км, выполненные прибором GRS (Mars Odyssey 2001, NASA) на основе HPGe [1], аналогичные лунные эксперименты на орбитальном аппарате NASA Lunar Prospector ( $\gamma$ -детектор на основе кристалла BGO [3]), на японском орбитальном аппарате KAGUYA (с помощью детектора на основе высокочистого германия, см. [4]) и китайском спутнике Chang E2 с использованием  $\gamma$ -спектрометра на основе бромида лантана LaBr<sub>3</sub>(Ce) [5]. Данные, полученные в ходе этих миссий, позволили построить карты распространенности элементов в поверхностном слое Луны и Марса [1–4].

В Институте космических исследований РАН в рамках подготовки экспериментов по определению состава поверхности Луны и Марса (миссии «Луна-Глоб», «Луна-Ресурс» и «ЭкзоМарс») создан опытный образец прибора АДРОН (Активный Детектор нейтронных и  $\gamma$ -лучей) [6, 7]. Результаты, полученные в ходе первых физических измерений в полевых условиях [8], подтвердили возможность проводить с его помощью космические эксперименты по  $\gamma$ -спектроскопии поверхности планет и получать ценные научные знания по геологии и эволюции небесных тел.

Как уже упоминалось выше, для решения задачи по определению элементного состава могут быть использованы различные типы  $\gamma$ -детекторов. Как правило, это либо сцинтилляционные детекторы (NaI, CsI, BGO, LaBr<sub>3</sub>(Ce), CeBr<sub>3</sub>), либо полупроводниковые детекторы на основе высокочистого германия. Выбор детектора зависит не только от научных задач (иначе использовались бы только германиевые детекторы, имеющие наивысшее спектральное разрешение), но и от инженерных ограничений на массу и энергопотребление космического аппарата (КА) и требований максимально уменьшить риски в ходе реализации космического эксперимента. Поэтому в данной работе проводится сравнительный анализ обнаружения различных элементов в модели планетного вещества полупроводниковым и сцинтилляционным детекторами. Для этого был использован HPGe  $\gamma$ -спектрометр фирмы ORTEC и наиболее перспективный на данный момент сцинтилляционный  $\gamma$ -детектор на основе кристалла CeBr<sub>3</sub>, который по совокупности своих свойств является альтернативой сцинтилляционному детектору на основе кристалла LaBr<sub>3</sub>(Ce) [9].

Существенным преимуществом  $\gamma$ -спектроскопии непосредственно на поверхности планеты по сравнению с орбитальными измерениями является возможность применения стационарных и импульсных источников излучения (ИИИ). Это позволяет расширить список идентифицируемых элементов и увеличить точность оценки их содержания в грунте за счет гораздо больших потоков частиц ИИИ на поверхности вокруг КА по сравнению с потоками частиц космического излучения. Использование в качестве

ИИИ нейтронного генератора дает возможность применить в космических исследованиях метод нейтронного активационного анализа, аналогичный нейтронному каротажу в геофизических исследованиях. Примером такого ИИИ является импульсный нейтронный генератор (ИНГ), разработанный для российского прибора ДАН (Динамическое Альbedo Нейтронов) на борту марсохода «Кьюриосити» [10, 11]. Генератор излучает с частотой 10 Гц короткие ( $\sim 2$  мкс) импульсы нейтронов с энергией 14 МэВ, которые проникают в грунт на глубину до 1 м и взаимодействуют с ядрами составляющих его элементов. В результате ядерных реакций образуются характеристические  $\gamma$ -кванты, часть из которых может выходить из грунта без рассеяния и быть идентифицированной методом  $\gamma$ -спектроскопии. В диапазоне от 100 до 1000 мкс после нейтронного импульса преобладают  $\gamma$ -кванты, рожденные в реакциях радиационного захвата замедлившихся до тепловых скоростей нейтронов. В диапазоне 10–100 мс можно выделить линии элементов, возникающие при распаде образовавшихся изотопов с относительно коротким временем жизни. После окончания работы генератора регистрируются линии от долгоживущих радиоизотопов с периодом полураспада до нескольких часов.

Приведенная методика измерений была успешно протестирована в приборе АДРОН [8] и будет применена в ходе выполнения космических экспериментов на поверхности Марса и Луны.

В данной работе представлены результаты измерений, основанных на нейтрон-индуцированной  $\gamma$ -спектроскопии. Все работы выполнены в Объединенном институте ядерных исследований на экспериментальном стенде с моделью-аналогом планетного вещества, специально созданной для такого типа измерений [12]. В эксперименте использовалась специальная измерительная установка, позволяющая работать с нейтронным генератором и различными типами детекторов. Определены основные порообразующие элементы в составе модели, которые можно зарегистрировать HPGe-детектором и сцинтилляционным детектором на основе кристалла  $\text{CeBr}_3$ , и проведен их сравнительный анализ. Полученные результаты позволили оценить возможности использованного метода нейтронно-индуцированной  $\gamma$ -спектроскопии для целей планетных исследований.

## ОПИСАНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ И УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения исследований использовались  $\gamma$ -детекторы двух типов: 1) сцинтилляционный на основе кристалла  $\text{CeBr}_3$  в виде цилиндра размером  $3 \times 3$  дюйма (производитель HELMA, Германия); 2) полупроводниковый коаксиальный детектор  $n$ -типа (GMX-60, производитель ORTEC, США) из высокочистого германия диаметром 66 мм и длиной 89 мм. Спектрометрические характеристики и условия применения подобных детекторов подробно описаны в различных источниках, в том числе в технической документации производителей (см., например, [13, 14]). Здесь лишь отметим принципиально важные для целей данной работы различия  $\text{CeBr}_3$  и HPGe (см. табл. 1), обуславливающие выбор конкретного типа детектора для решения определенных спектрометрических задач в ходе космического эксперимента.

Несмотря на худшие значения по многим параметрам, HPGe является предпочтительным для некоторых экспериментов ввиду исключительно высокого спектрального разрешения 0,15 % для энергии 1,33 МэВ в сравнении с 3 % для бромида церия. Данное обстоятельство значительно облегчает задачу разделения и идентификации близкорас-

Таблица 1. Сравнительные характеристики детекторов на основе  $\text{CeBr}_3$  и  $\text{HPGe}$  для космического приборостроения

Характеристика спектрометра	$\text{CeBr}_3$	$\text{HPGe}$
Масса, кг	3,5	30*
Энергопотребление, Вт	6	32*
Спектральное разрешение (FWHM) на 1,33 МэВ, %	3,0	0,15
Абсолютная эффективность регистрации $\gamma$ -квантов с энергией 6,13 МэВ, %	16	7,5

\* Взяты характеристики  $\text{HPGe}$ -спектрометра GRS (MarsOdyssey, NASA), включая электрическую систему охлаждения.

положенных спектральных линий, которая является достаточно сложной при анализе  $\gamma$ -спектров, зарегистрированных с помощью  $\text{CeBr}_3$ , от вещества со сложным химическим составом.

Использование импульсного генератора нейтронов предъявляет повышенные требования к нагрузочной способности  $\gamma$ -спектрометров и радиационной стойкости их детекторов. Первое требование связано с просчетами спектрометрического тракта из-за регистрации большого числа мгновенных  $\gamma$ -квантов сразу же после нейтронного импульса. Второе — связано с повреждением структуры кристалла германия и электроники спектрометров при облучении нейтронами. Это требование обеспечивалось использованием германиевого детектора  $n$ -типа с «дырочной» проводимостью, спектрометрические характеристики которого наиболее устойчивы к воздействию нейтронного излучения.

Схема расположения аппаратуры на модели-аналоге планетарного грунта внутри экспериментального стенда представлена на рис. 1.

Основой модели-аналога планетарного грунта является силикатное стекло с добавлением слоев различных недостающих веществ. Слои подобраны таким образом, чтобы средний элементный состав модели соответствовал среднему элементному составу марсианского грунта [15]. Внутри модели на глубине  $\sim 12$  см был добавлен слой полиэтилена

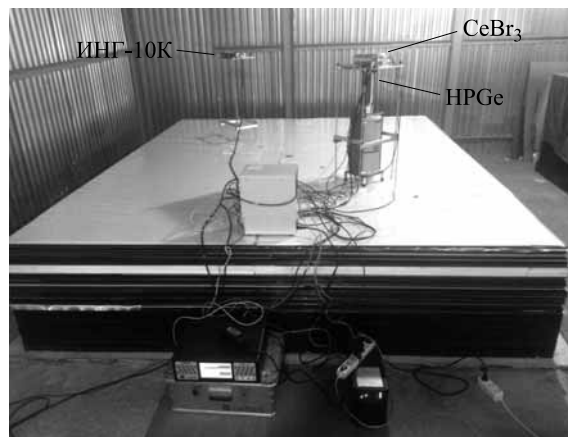


Рис. 1. Схема размещения аппаратуры на модели-аналоге планетарного вещества

толщиной 5 см, имитирующий водяной лед. Общая высота мишени составляла  $\sim 70$  см, что является достаточным с точки зрения глубины проникновения нейтронов с энергией 14 МэВ внутрь планетарного грунта [11].

В центре мишени на специально изготовленных механических оснастках из сплава АМГ6 на высоте 80 см над поверхностью мишени располагались блок нейтронного генератора ИНГ-10К (запасной летный образец генератора прибора ДАН с нейтронным выходом на момент измерений  $\sim 2 \cdot 10^6$  нейтронов в импульсе) и блок сцинтилляционного датчика с кристаллом  $\text{CeBr}_3$ . Расстояние между тритиевой мишенью генератора, изотропно излучающей нейтроны, и кристаллом  $\text{CeBr}_3$  составляло 200 см, что соответствует максимально возможному расположению блоков научной аппаратуры при проведении космических экспериментов на стационарных посадочных платформах «Луна-Глоб», «Луна-Ресурс» и «ЭкзоМарс». Блок питания с источником высокого напряжения и аналого-цифровым преобразователем сигналов с фотоэлектронного умножителя выполнен в виде моноблока и наряду со сцинтиллоком входит в состав экспериментальной установки [13], специально созданной в ИКИ РАН для проведения исследований в области ядерной планетологии.

Спектрометр из высокочистого германия был установлен под механической оснасткой для сцинтиллока  $\text{CeBr}_3$  в вертикальном положении. Таким образом, оба детектора располагались примерно в одном месте для корректного сопоставления их чувствительности. Эффективность регистрации детектора  $\text{HPGe}$ , согласно данным завода-изготовителя, составляет 63 % на линии 1,33 МэВ, соотношение пик/комpton равно 65. Кристаллы из высокочистого германия большого размера и, соответственно, высокими спектрометрическими характеристиками редко используются в классических задачах  $\gamma$ -спектроскопии ввиду высокой стоимости таких детекторов. Однако в нашем случае такой выбор оправдан ввиду сложности решаемых задач, включая необходимость регистрации  $\gamma$ -квантов высоких энергий для сравнения чувствительности детекторов в широком диапазоне энергий.

На детектор  $\text{HPGe}$  был одет экран из свинца толщиной 2 мм для поглощения низкоэнергетичного  $\gamma$ -излучения с энергией до 200 кэВ из модели грунта и генератора, вносящего существенный вклад в загрузку детектора, но не представляющего интерес в рамках решаемой задачи. Экран позволил существенно снизить импульсные загрузки в первый момент после импульса генератора и снизить просчеты спектрометра, увеличив статистическую обеспеченность измеряемых  $\gamma$ -спектров. В капсульной части  $\text{HPGe}$ -спектрометра также располагается специальный предусилитель с транзисторным сбросом, позволяющий существенно сократить время на обработку аналогового сигнала.  $\text{HPGe}$ -детектор смонтирован на торцевой части цилиндрической емкости, в которую заливается жидкий азот для охлаждения кристалла германия до рабочей температуры, не превышающей  $-170^\circ\text{C}$ . Высокое напряжение  $-4000$  В вырабатывается анализатором DSPec-50 (ORTEC, США), который совместно с персональным компьютером обеспечивает управление детектором и запись  $\gamma$ -спектра текущего измерения.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

При исследовании состава планетарного вещества важным аспектом является чувствительность применяемой методики, т. е. оценка минимальной массовой доли элементов, которые можно достоверно обнаружить. В табл. 2 приведено массовое содержание эле-

Таблица 2. Содержание основных породообразующих элементов в грунте Марса и в его модели

Элемент	Среднее содержание в марсианском грунте, %	Содержание в модели планетного вещества, %
H	<b>0,000*</b>	<b>0,743</b>
C	—	4,587
O	<b>43,886</b>	<b>35,929</b>
Na	<b>1,912</b>	<b>7,973</b>
Mg	<b>5,112</b>	<b>2,256</b>
Al	<b>4,968</b>	<b>4,793</b>
Si	<b>20,274</b>	<b>25,433</b>
P	0,537	0,004
S	3,777	0,005
Cl	<b>1,000</b>	<b>0,687</b>
K	0,384	0,194
Ca	4,306	5,287
Ti	0,578	0,007
Cr	0,200	0,012
Mn	0,231	0,061
Fe	<b>12,748</b>	<b>11,894</b>

\* Содержание воды в грунте Марса меняется в широких пределах, соответственно уменьшается вклад остальных элементов (кроме H и O).

ментов в модели грунта на стенде с учетом добавления слоя полиэтилена в сравнении с составом марсианского грунта.

В целом модель-аналог планетного вещества, на которой проводились измерения, адекватно воспроизводит реальную структуру приповерхностного слоя, например, в районе посадки KAPhoenix (NASA). В этой миссии под сухим слоем реголита толщиной от 5 до 18 см был обнаружен водяной лед [16].

Для решения поставленных задач проведены наборы  $\gamma$ -спектров суммарной длительностью по 60 мин обоими спектрометрами в разных временных интервалах (окнах) после нейтронного импульса ИНГ (частота генерации импульсов составляла 10 Гц):

— 100–1000 мкс для сепарации  $\gamma$ -линий, излучаемых ядрами вещества при радиационном захвате медленных нейтронов;

— 10–100 мс для регистрации активационных линий от короткоживущих изотопов, образовавшихся в мишени под воздействием облучения быстрыми нейтронами.

На рис. 2 представлены спектры первого измерения с линиями от радиационного захвата нейтронов.

В спектрах обоих детекторов хорошо видны линии водорода 2223 кэВ, кремния 3538 и 4934 кэВ, хлора 1165, 1951, 6108 и 7140 кэВ и железа 5919, 7627 и 7642 кэВ. Следует отметить, что все обнаруженные элементы имеют заметные концентрации в модели грунта, а также относительно большие значения сечений реакции радиационного захвата нейтрона.

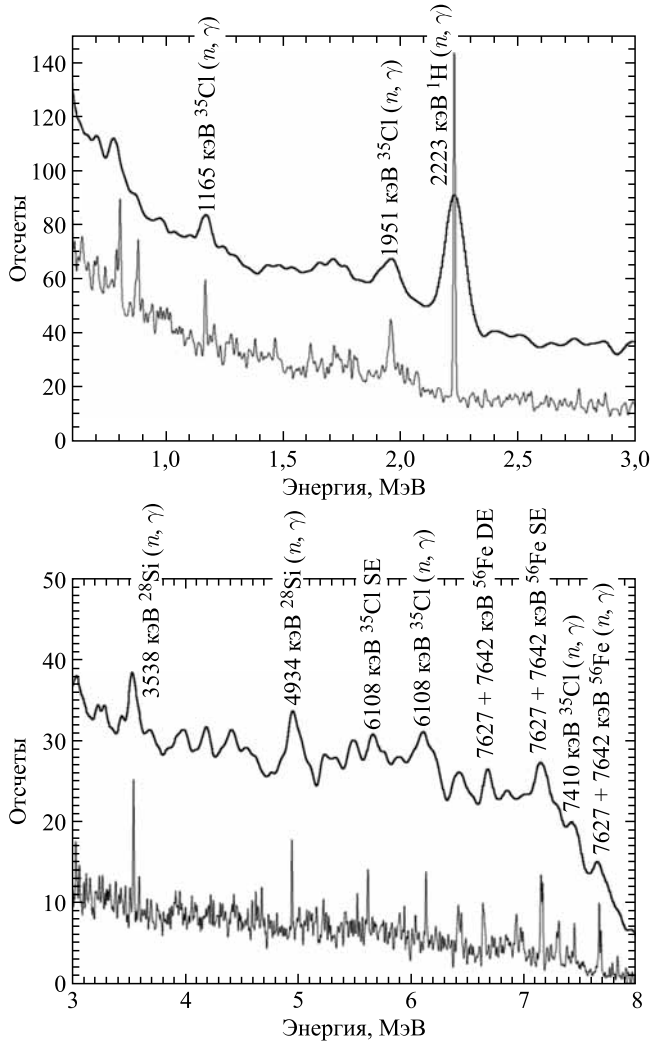


Рис. 2. Сравнение спектров с захватными  $\gamma$ -линиями, зарегистрированными детекторами HPGe (тонкая линия) и  $\text{CeBr}_3$  (толстая линия)

Активационные спектры, измеренные при работающем генераторе во временном промежутке 10–100 мс после нейтронного импульса, когда тепловые нейтроны внутри модели грунта практически исчезли из-за диффузии из нее и захвата, приведены на рис. 3.

При облучении модели грунта нейтронами с энергией 14 МэВ идентифицированы линии следующих элементов: кислорода (6130 и 7116 кэВ), натрия (472 и 1634 кэВ), алюминия и магния (843, 1014, 1369 и 2754 кэВ), кремния (1779 кэВ), железа (2114 кэВ). Большая часть линий возникает в результате реакции (*n, p*). Линия 2754 кэВ также содержит  $\gamma$ -кванты от реакции захвата тепловых нейтронов ядрами <sup>23</sup>Na, что необходимо учитывать при определении содержания магния в веществе мишени. Сильная линия 754 кэВ принадлежит церию, возникает в самом детекторе  $\text{CeBr}_3$  и в HPGe почти не

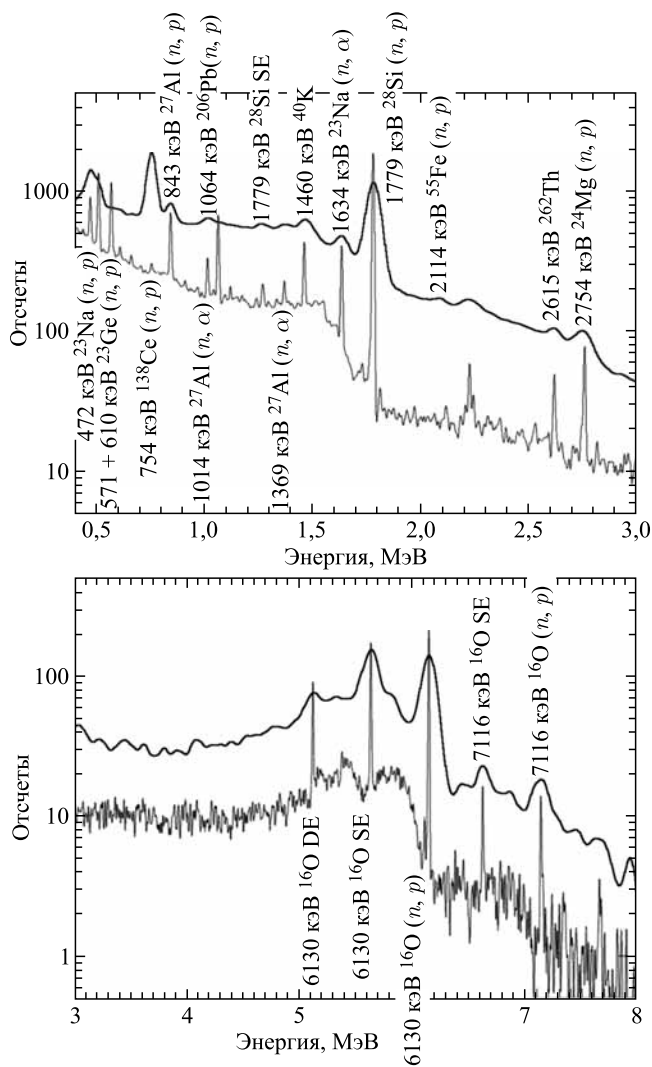


Рис. 3. Сравнение спектров с распадными  $\gamma$ -линиями от активации элементов модели быстрыми нейтронами, зарегистрированными детекторами HPGe (тонкая линия) и CeBr<sub>3</sub> (толстая линия)

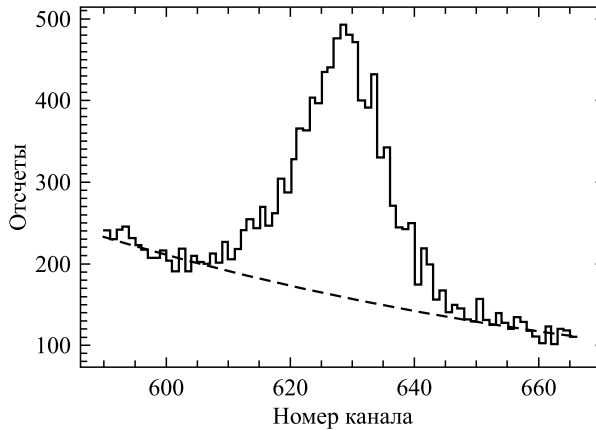
видна. Линия 1064 кэВ в германиевом спектрометре образуется в свинцовом экране, окружающем детектор. Также в спектрах обоих детекторов видны линии естественных радиоизотопов калия и тория с энергиями 1460 и 2615 кэВ соответственно, которые присутствуют повсюду на Земле, но непосредственно к измерениям с нейтронным генератором отношения не имеют.

В табл.3 приведены изотопы, идентифицированные в мишени в ходе измерений, с указанием статистической значимости ( $SS$ ) наиболее сильных линий (если данному изотопу соответствует несколько линий). Поскольку линии железа 7627 и 7642 кэВ не



Таблица 3. Идентифицированные изотопы и достоверность измерений

Начальный изотоп	Тип реакции	Энергия $\gamma$ -кванта, кэВ	Значимость линий для $\text{CeBr}_3$	Значимость линий для $\text{HPGe}$
$^1\text{H}$	$(n, \gamma)$	2223	36,1	20,1
$^{16}\text{O}$	$(n, p)$	6130	52,1	25,2
$^{23}\text{Na}$	$(n, \alpha)$	1634	43,1	27,6
$^{24}\text{Mg}$	$(n, p)$	2754	25,0	26,5
$^{27}\text{Al}$	$(n, \alpha)$	1369	27,4	8,2
$^{28}\text{Si}$	$(n, \gamma)$	3538	12,1	4,0
	$(n, p)$	1779	135,6	79,3
$^{35}\text{Cl}$	$(n, \gamma)$	1165	20,2	3,5
$^{56}\text{Fe}$	$(n, \gamma)$	7627, 7642	11,4	7,8
	$(n, p)$	847	58,2	28,5

Рис. 4. Гамма-линия кремния 1779 кэВ, измеренная детектором  $\text{CeBr}_3$ . Штриховой линией показана найденная модель фона

разрешаются в  $\text{CeBr}_3$  по отдельности, величина  $SS$  для них рассчитывалась в спектрах детектора  $\text{HPGe}$  также с учетом их вклада в совместную статистику.

Относительная интенсивность линий ( $S$ ) и ее погрешность ( $dS$ ) вычислялись следующим образом: на спектре выделялся энергетический интервал, где находится исследуемая  $\gamma$ -линия, справа и слева от нее назначались интервалы, по которым можно интерполировать фон под  $\gamma$ -линией. Следует отметить, что выбор участков спектра для определения фона субъективен, и вследствие более низкого спектрального разрешения  $\text{CeBr}_3$  систематическая ошибка при вычислении фона выше, чем для  $\text{HPGe}$ . Величина  $S$  определяется как разность между полным количеством отсчетов ( $C$ ) в выделенном энергетическом интервале и фоновыми отсчетами ( $B$ ) в этом интервале (рис. 4). Погрешность  $dS$  вычисляется как квадратный корень из  $C$ , т. е. исходя из полной статистики отсчетов. Значимость линии  $SS$  есть результат деления интенсивности  $\gamma$ -линии  $S$  на ее статистическую ошибку  $dS$ .

## ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов показал, что оба типа детекторов обнаруживают одинаковый набор элементов при измерении в различные интервалы времени после излучения импульса нейтронов. Возможность набора спектров в различных временных окнах повышает достоверность идентификации элементов за счет знания механизмов рождения  $\gamma$ -квантов. Из полученных значений значимости линий видно, что за исключением магния чувствительность детектора из бромида церия ко всем остальным обнаруженным элементам мишени выше, чем для высокочистого германия. В большей мере это связано с большим средним атомным номером вещества детектора  $\text{CeBr}_3$ .

Весовая доля элементов мишени, которые можно определить в марсианском грунте данной методикой, составляет около 90 %. Процентное содержание таких элементов в табл. 2 выделено жирным шрифтом. Также есть возможность при более длительных наблюдениях регистрировать последний из оставшихся необнаруженных породообразующих элементов — кальций по линии 1294 кэВ, что увеличит долю вещества, определяемую с помощью данной методики до 95 %. Таким образом, задача поиска и измерения концентрации основных породообразующих элементов поверхности Марса может быть решена за время работы  $\sim 1-2$  ч на поверхности планеты обоими детекторами. Однако, используя бромид церия, можно накопить приемлемую статистику в  $\gamma$ -спектрах быстрее, что имеет важное значение при исследовании поверхности планет с помощью подвижных планетарных аппаратов (роверов).

Недостатком детектора из бромида церия является сложность или невозможность разделения расположенных близко  $\gamma$ -линий, что вносит дополнительную систематическую ошибку в измерения. Для стационарных посадочных аппаратов, когда имеется возможность проведения длительных измерений, детектор из высокочистого германия может позволить обнаружить и измерить содержание еще нескольких элементов с невысоким содержанием в грунте планеты (например, Ti, S, Mn, Cr).

Применение детектора на основе бромида церия для проведения планируемых космических экспериментов («Луна-Глоб», «Луна-Ресурс» и «ЭкзоМарс-2020») является предпочтительным по совокупности измерительных, технических и эксплуатационных параметров, а также по их соответствию научным и инженерным требованиям указанных миссий.

**Благодарности.** Коллектив авторов выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (Грант РФФИ № 14-22-00249) при проведении исследований в области сопоставления спектрометрических свойств различных  $\gamma$ -детекторов и возможностей их применения в ядерной планетологии. Данные и результаты измерений, полученные в ходе работ, находятся в свободном доступе в базе данных по ядерной планетологии ([nr.cosmos.ru/rnf](http://nr.cosmos.ru/rnf)).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boynton W. V., Taylor G. J., Evans L. G., Reedy R. C., Starr R., Janes D. M., Kerry K. 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.* 2007. V. 112, Iss. E12. Cite ID E12S99; doi:10.1029/2007JE002887.
2. Taylor G. J., Boynton W., Brückner J., Wänke H., Dreibus G., Kerry K., Keller J., Reedy R., Evans L., Starr R., Squyres S., Karunatillake S., Gasnault O., Maurice S., d'Uston C., Englert P., Dohm J., Baker V., Hamara D., Janes D., Sprague A., Kim K., Drake D. Bulk Composition and Early Differentiation of Mars // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 111, Iss. E3. Cite ID E03S10; doi:10.1029/2005JE00264.
  3. 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. P. E12007.
  4. Hasebe N., Shibamura E., Miyachi T., Takashima T., Kobayashi M., Okudaira O., Yamashita N., Kobayashi S., Karouji Y., Hareyama M., Kodaira S., Hayatsu K., Iwabuchi K., Nemoto S., Sakurai K., Komatsu S., 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. 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. Ma T., Chang J., Zhang N., Jian W., Cai M. S., Gong Y. Z., Tang H. S., Zhag R. J., Wang N. S., Yu M., Mao J. P., Hu Y. M., Xu A. A., Zhu M. H. Gamma-Ray Spectrometer Onboard Chang'E-2 // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2012. V. 726. P. 113–115.
  6. Golovin D., Litvak M., Kozyrev A. S., Tretiyakov V., Sanin A., Vostrukhin A., Mitrofanov I., Malakhov A. Neutron Activation Analysis on the Surface of the Moon and Other Terrestrial Planets // 40th COSPAR Sci. Assembly, Moscow, Aug. 2–10, 2014. Abstract B0.1-43-14.
  7. Litvak M. L., Golovin D. V., Jun I., Kozyrev A. S., Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Shvetsov V. N., Timoshenko G. N., Zontikov A. Implementation of Gamma-Ray Instrumentation for Solid Solar System Bodies Using Neutron Activation Method // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 822. P. 112–124.
  8. Литвак М. Л., Головин Д. В., Колесников А. Б., Вострухин А. А., Дьячкова М. В., Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Мокроусов М. И., Санин А. Б. Наземные измерения с активным гамма- и нейтронным спектрометром «АДРОН», предназначенным для лунных и марсианских посадочных миссий // *Астрон. вестн.* 2017. Т. 51, вып. 3. С. 189–203.
  9. Козырев А. С., Митрофанов И. Г., Бенхофф Дж., Овенс А., Карати Ф., Литвак М. Л., Малахов А. В., Мокроусов М. И., Тимошенко Г. Н. Перспективный сцинтилляционный детектор на основе бромида церия для космического гамма-спектрометра МГНС // *ПТЭ.* 2016. № 4. С. 92–100.
  10. Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Barmakov Yu. N., Behar A., Bitulev A., Bobrovniksky 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., Tretiyakov 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.
  11. Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Lisov D. I., Starr R., Boynton W., Behar A., DeFlores L., Fedosov F., Golovin D., Hardgrove C., Harshman K., Jun I., Kozyrev A. S., Kuzmin R. O., Malakhov A., Milliken R., Mischna M., Moersch J., Mokrousov M. I., Nikiforov S., Shvetsov V. N., Tate C., Tret'yakov V. I., Vostrukhin A. Data Processing of the Active Neutron Experiment DAN for a Martian Regolith Investigation // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2015. V. 789. P. 114–127.
  12. Вострухин А. А., Головин Д. В., Дубасов П. В., Зонтиков А. О., Козырев А. С., Крылов А. Р., Крылов В. А., Литвак М. Л., Малахов А. В., Митрофанов И. Г., Мокроусов М. И., Пономарев И. Д.,

- Репкин А. Н., Санин А. Б., Тимошенко Г. Н., Удовиченко К. В., Швецов В. Н.* Экспериментальный стенд для испытания приборов ядерной планетологии // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 2(200). С. 354–367.
13. *Quarati F. G. A., Dorenbos P., van der Biezen J., Owens A., Selle M., Parthier L., Schotanus P.* Scintillation and Detection Characteristics of High-Sensitivity CeBr<sub>3</sub> Gamma-Ray Spectrometers // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 729. P. 596–604.
14. *Abt I., Caldwell A., Gutknecht D., Kröninger K., Lampert M., Liu X., Majorovits B., Quirion D., Stelzer F., Wendling P.* Characterization of the First True Coaxial 18-fold Segmented *n*-Type Prototype HPGе Detector for the GERDA Project // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 577, No. 3. P. 574–584.
15. *Litvak M. L., Golovin D. V., Jun I., Kozyrev A. S., Mitrofanov I. G., Sanin A. B., Shvetsov V. N., Timoshenko G. N., Zontikov A.* Implementation of Gamma-Ray Instrumentation for Solid Solar System Bodies Using Neutron Activation Method // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 822. P. 112–124.
16. *Smith P. H., Tamppari L. K., Arvidson R. E., Bass D., Blaney D., Boynton W. V., Carswell A., Catling D. C., Clark B. C., Duck T., DeJong E., Fisher D., Goetz W., Gunnlaugsson H. P., Hecht M. H., Hipkin V., Hoffman J., Hviid S. F., Keller H. U., Kounaves S. P., Lange C. F., Lemmon M. T., Madsen M. B., Markiewicz W. J., Marshall J., McKay C. P., Mellon M. T., Ming D. W., Morris R. V., Pike W. T., Renno N., Staufer U., Stoker C., Taylor P., Whiteway J. A., Zent A. P.* H<sub>2</sub>O at the Phoenix Landing Site // Science. V. 325, No. 5936. P. 58.

Получено 7 ноября 2017 г.