

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ: ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ В РЕАКЦИЯХ ЗАХВАТА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

© 2018 г. А. С. Козырев<sup>1)\*</sup>, А. А. Аникин<sup>1)</sup>, А. А. Вострухин<sup>1)</sup>, Д. В. Головин<sup>1)</sup>,  
К. Гранья<sup>2)</sup>, П. А. Дубасов<sup>3)</sup>, А. О. Зонтиков<sup>3)</sup>, Ф. Куарати<sup>4)</sup>, Д. И. Лисов<sup>1)</sup>,  
М. Л. Литвак<sup>1)</sup>, И. Г. Митрофанов<sup>1)</sup>, А. Оуэнс<sup>5)</sup>, С. Поспишил<sup>2)</sup>,  
А. Б. Санин<sup>1)</sup>, Т. Славичек<sup>2)</sup>, Г. Н. Тимошенко<sup>3),6)</sup>, В. Н. Швецов<sup>3)</sup>

Поступила в редакцию 30.01.2018 г.

Представлены результаты экспериментального изучения гамма-излучения монообразцов, аналогов планетного вещества, под воздействием потока тепловых нейтронов. Выполнено сопоставление интенсивностей спектральных линий гамма-лучей от монообразцов, аналогов планетного вещества, с различным химическим составом. Полученные результаты будут использоваться при обработке данных по гамма-спектроскопии Луны и Меркурия с борта космических аппаратов для изучения состава поверхности этих небесных тел.

DOI: 10.1134/S0044002718040098

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования с борта орбитальных космических аппаратов (КА) состава поверхности планет методом дистанционной спектроскопии нейтронного и гамма-излучения проводятся уже более 50 лет, см., например [1, 2]. В основу этого метода положено измерение энергетического спектра потока нейтронов в широком энергетическом диапазоне от тепловых энергий (доли электрон-вольт) вплоть до быстрых нейтронов с энергией около 5–10 МэВ, а также спектроскопия потока гамма-лучей в диапазоне энергий от 100 кэВ до 10 МэВ. Нейтроны и гамма-лучи генерируются в верхнем слое поверхности небесного тела с толщиной около 1–2 м под воздействием галактических космических лучей (ГКЛ) [3]. Родившиеся нейтроны замедляются вследствие столкновений с ядрами вещества и приобретают энергии в широком спектре от тепловых до нескольких десятков МэВ. Значительная доля

нейтронов выходит с поверхности и в условиях отсутствия атмосферы (как на Луне или Меркурии) или в условиях тонкой атмосферы (как на Марсе) может достигать высоты орбит КА. Гамма-лучи возникают в реакциях неупругого рассеяния или захвата нейтронов ядрами основных породообразующих элементов, и вклад в гамма-излучение вещества планет также вносят радиоактивные изотопы калия, тория и урана. Спектральный состав гамма-излучения с поверхности планеты определяется, главным образом, элементным составом основных породообразующих элементов верхнего слоя поверхности. Например, наличие в поверхностном слое железа приводит к излучению гамма-линий этого элемента с энергиями 5920, 7631 и 7645 кэВ. Присутствие в поверхностном слое ядер водорода приводит к эффективной термализации излучаемых нейтронов и к излучению фотонов с энергией 2223 кэВ, которые возникают в реакциях захвата нейтронов ядрами водорода [4].

Анализируя данные измерений нейтронного и гамма-излучения с поверхности планеты, можно по отождествленным гамма-линиям определить наличие того или иного элемента в составе приповерхностного слоя, а по их интенсивности — оценить массовую долю этих элементов в грунте. Регистрация гамма-линий от радиоактивных изотопов калия <sup>40</sup>K и продуктов распада тория <sup>232</sup>Th и урана <sup>238</sup>U позволяет оценить их концентрацию в веществе небесного тела, что, в свою очередь, предоставляет

<sup>1)</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.

<sup>2)</sup>Институт экспериментальной и прикладной физики, Чешский политехнический университет, Прага.

<sup>3)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

<sup>4)</sup>AP, RST, FAME, Delft University of Technology, Netherlands.

<sup>5)</sup>European Space Agency, ESTEC, Keplerlaan, Netherlands.

<sup>6)</sup>Государственный университет “Дубна”, Дубна, Россия.

\*E-mail: kozyrev@cosmos.ru

возможность выяснить условия его происхождения и эволюции [5].

Таким образом, применение метода ядерной планетологии для изучения состава поверхности небесного тела предполагает регистрацию гамма-лучей с достаточно высоким энергетическим разрешением, которое позволяет выполнить поиск и отождествление гамма-линий, характеризующих элементный состав вещества приповерхностного слоя. С применением этого метода были проведены измерения гамма-лучей на орбитах Марса, Луны и Меркурия с бортов космических аппаратов “Марс Одиссей”, “Лунар Проспектор” и “Мессенджер”, отождествлены основные порообразующие элементы (такие, как Si, Mg, Al, Fe, Ca, Cr, Ti и пр.) поверхности [6–8].

С точки зрения энергетического разрешения оптимальным гамма-спектрометром является прибор на основе детектора из высокочистого германия (HPGe). Его энергетическое разрешение составляет около 1.8 кэВ для линии  $^{137}\text{Cs}$  с энергией 662 кэВ. Такое энергетическое разрешение в 15–20 раз выше, чем у гамма-спектрометров на основе традиционных сцинтилляционных кристаллов NaI и CsI. На основе HPGe-спектрометров были реализованы космические эксперименты в проектах “Марс Одиссей”, “Мессенджер” и “Кагуя” для исследования элементного состава приповерхностного слоя Марса, Меркурия и Луны [3, 9, 10]. Однако HPGe-спектрометр имеет две существенные особенности, затрудняющие его применение в экспериментах на борту КА для исследований по ядерной планетологии. Во-первых, энергетическое разрешение кристалла германия постепенно ухудшается вследствие воздействия заряженных частиц космического излучения. Наиболее значительными эпизодами такого воздействия являются солнечные протонные события. Для восстановления энергетического разрешения детектора на основе HPGe нужно провести достаточно рискованную процедуру его отжига — нагрев кристалла до температур около 100°C. Во-вторых, физические измерения детектором на основе HPGe осуществляются только при температуре кристалла ниже чем –180°C. Такой тепловой режим должна обеспечивать пассивная или активная система криогенного охлаждения, которая также требует выделения дополнительной массы и энергопотребления.

Вследствие указанных особенностей детекторов на основе HPGe для большинства экспериментов по космической гамма-спектроскопии применялись детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов, таких как NaI, CsI и VGO с энергетическим разрешением на линии 662 кэВ изотопа  $^{137}\text{Cs}$  около 6–8%, 7.0–8.5% и 10–13% соответственно [11]. В настоящее время в распоряжении исследователей имеются более совершенные детекторы

на основе кристаллов  $\text{LaBr}_3$ ,  $\text{LaCl}_3$  или  $\text{CeBr}_3$ , разрешение которых на указанной линии составляет около 3–4%. Такие гамма-спектрометры все еще уступают детекторам на основе HPGe по своему энергетическому разрешению, но являются более предпочтительными в случаях космического применения, когда на первое место выходят требования надежности, минимизации массы и электрического потребления. Так, например, германиевый гамма-спектрометр на основе HPGe для КА “Мессенджер” весил около 9.2 кг и потреблял около 16.5 Вт (в режиме отжига около 23.0 Вт). Сцинтилляционный гамма-спектрометр на основе кристалла  $\text{CeBr}_3$  (или  $\text{LaBr}_3$ ) с сопоставимой эффективностью может иметь массу не более 4 кг и энергопотребление не более 3.5 Вт. Такой прибор позволяет сэкономить бортовые ресурсы в 2.3 раза по массе и в 6.5 раз по энергопотреблению, что зачастую является важным условием при создании автоматических межпланетных КА.

С учетом указанных обстоятельств в состав КА “БепиКоломбо” проекта ЕКА по изучению Меркурия был включен российский гамма-спектрометр МГНС (Меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр) на основе инновационного кристалла  $\text{CeBr}_3$  [12, 13]. В научные задачи этого эксперимента входит построение глобальной карты элементного состава приповерхностного слоя этой планеты. Для решения этой задачи будут проводиться измерения с орбиты спектров гамма-лучей от различных участков поверхности планеты. На основе их обработки будет проводиться отождествление спектральных линий, характерных для ядер основных порообразующих элементов, и определяться их массовая доля в планетном веществе.

Основными сложностями обработки спектров гамма-лучей, измеренных от поверхности небесного тела, являются относительно небольшое отношение сигнал/шум для многих гамма-линий, а также наложение профилей близких по энергии линий вследствие недостаточно высокого энергетического разрешения прибора.

Настоящая работа описывает лабораторный эксперимент на установке ЭУ-ЯП-03 по измерению реперных гамма-линий, возникающих в ядерных реакциях захвата тепловых нейтронов в монообразцах, аналогах планетного вещества, при помощи сцинтилляционного гамма-спектрометра с детектором на основе  $\text{CeBr}_3$ . Программа эксперимента ограничена только изучением линий от реакций нейтронного захвата в связи с тем, что в космических экспериментах по гамма-спектроскопии планет также достаточно достоверно измеряются потоки тепловых нейтронов с поверхности: сопоставляя данные по интенсивностям линий от конкретных ядер с данными по потоку тепловых

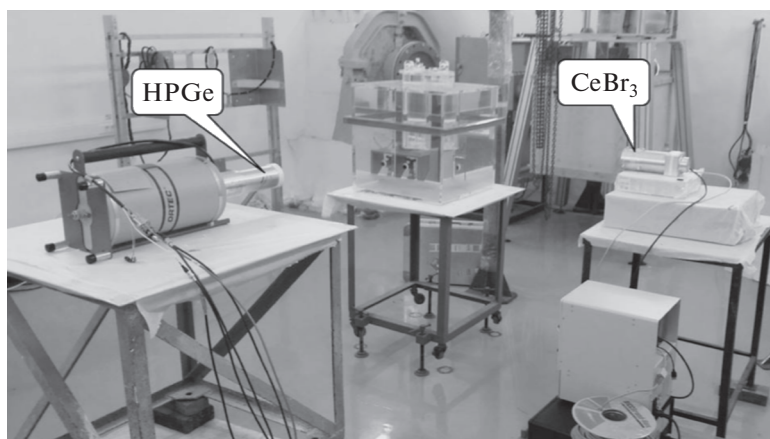


Рис. 1. Лабораторная установка ЭУ-ЯП-03.

нейтронов, можно оценить концентрацию этих ядер в веществе. Полученные в эксперименте ЭУ-ЯП-03 данные в будущем позволят отождествить и измерить интенсивности основных гамма-линий нейтронного захвата, зарегистрированных прибором МГНС с поверхности Меркурия, и определить содержание соответствующих им породообразующих элементов в меркурианском веществе.

В состав лабораторной установки ЭУ-ЯП-03 входят гамма-спектрометры на основе сцинтилляционного кристалла  $\text{CeBr}_3$  и на основе  $\text{HPGe}$ , а также специально сконструированная для цели этого исследования гамма-станция, которая, в свою очередь, является источником эпитепловых и тепловых нейтронов со спектром, аналогичным спектру вторичных нейтронов в верхнем слое поверхности безатмосферных небесных тел под воздействием ГКЛ [14]. В центральной области объема гамма-станции достигается максимальная плотность тепловых нейтронов. В эту область помещались различные образцы-аналоги планетного вещества с различным химическим составом. Включение в состав установки ЭУ-ЯП-03 спектрометра на основе  $\text{HPGe}$  позволяет обнаружить практически полный перечень спектральных линий гамма-лучей для каждого образца-аналога планетного вещества и провести его сопоставление со спектральными деталями, измеренными детектором на основе бромида церия. Для измерений были изготовлены монообразцы, аналоги планетного вещества, содержащие оксиды различных породообразующих элементов.

## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка ЭУ-ЯП-03 (экспериментальная установка для ядерной планетологии) была создана в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований

с участием Института космических исследований Российской академии наук и Института экспериментальной и прикладной физики (Чешский политехнический университет в Праге) в рамках исследовательского проекта Российского научного фонда (грант РНФ № 14-22-00249). Установка ЭУ-ЯП-03 состоит из источника гамма-излучения, выполненного на основе портативной гамма-станции [14], где в наполненном водой резервуаре происходит замедление первичных нейтронов от радиоактивного источника  $^{252}\text{Cf}$  до эпитепловых и тепловых энергий. Гамма-станция создает собственное гамма-излучение от радиоактивного источника и от реакций захвата нейтронов в воде и в элементах конструкции. В центральной области гамма-станции размещена кассета для образцов-аналогов планетного вещества. Детектирующая часть установки включает гамма-спектрометры на основе сцинтилляционного детектора  $\text{CeBr}_3$  и полупроводникового детектора на основе  $\text{HPGe}$  (рис. 1).

Гамма-станция представляет собой параллелепипед с внешними размерами  $50 \times 56 \times 56$  см, заполненный 110 л дистиллированной воды. Стенки параллелепипеда изготовлены из полиметилметакрилата (оргстекло). В геометрическом центре параллелепипеда помещена кассета, содержащая образец-аналог и изотопный источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  (рис. 2). Активность изотопного источника нейтронов в период измерений составляла  $1.95 \times 10^6$  нейтрон/с. Спектр нейтронов, излучаемых при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ , хорошо описывается распределением Максвелла со средним значением энергии, равным  $2.13 \pm 0.01$  МэВ [15].

Гамма-спектрометры установлены на двух взаимно перпендикулярных направлениях относительно гамма-станции на одинаковом расстоянии от ее центра около 1 м. Такая симметричная геометрия позволяет производить одновременные

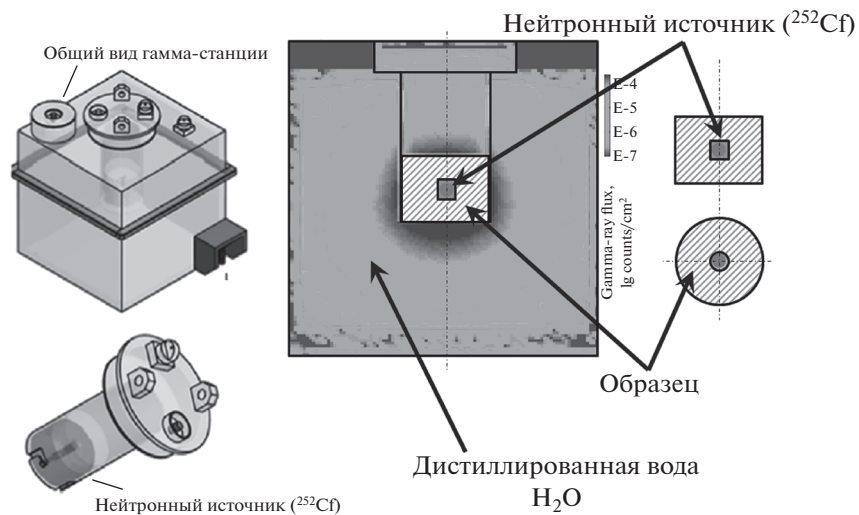


Рис. 2. Схема гамма-станции — источника вторичного гамма-излучения.

измерения гамма-излучения от одного образца-аналога двумя гамма-спектрометрами в условиях одинакового потока излучения, падающего на детекторы (рис. 1).

Сцинтиляционный гамма-спектрометр для установки ЭУ-ЯП-03 включает специально изготовленный для данного эксперимента детектор с кристаллом  $\text{CeBr}_3$  размером  $\varnothing 3 \times 3$  дюйма и ФЭУ R1307-13. Размер сцинтиляционного кристалла, электрические схемы высоковольтного делителя и внутренняя конструкция сцинтиляционного блока полностью воспроизводят конструкцию гамма-детектора прибора МГНС. Электроника гамма-спектрометра реализована на готовых промышленных узлах фирмы ORTEC. Логическая схема гамма-спектрометра позволяет накапливать аппаратный спектр в 4096 каналах. Энергетическое разрешение гамма-спектрометра составляет около 29 кэВ ( $\sim 4.4\%$ ) на линии  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ).

Для измерений гамма-лучей с высоким энергетическим разрешением в установке ЭУ-ЯП-03 применяется промышленный гамма-спектрометр на основе высокочистого германия HPGe производства фирмы ORTEC с размером кристалла  $\varnothing 66 \times 89$  мм. Энергетическое разрешение этого спектрометра составляет 1.8 кэВ ( $\sim 0.27\%$ ) на линии  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ) и 2.2 кэВ ( $\sim 0.17\%$ ) на линии  $^{60}\text{Co}$  (1332 кэВ). В состав лабораторного гамма-спектрометра также входит амплитудный анализатор на 16 384 канала.

Быстрые нейтроны от источника  $^{252}\text{Cf}$  испытывают многократное упругое рассеяние на ядрах водорода, содержащихся в молекулах воды. Эти столкновения приводят к относительно эффективному замедлению исходных нейтронов и к образованию в центре источника большой плотности

эпитепловых и тепловых нейтронов. Тепловые нейтроны эффективно захватываются ядрами вещества образца-аналога с излучением гамма-лучей с фиксированными значениями энергий (гамма-линий). Гамма-лучи выходят за пределы гамма-станции и регистрируются спектрометрами. Таким образом, каждому образцу-аналогу планетного вещества в ходе измерений был сопоставлен набор соответствующих ему гамма-линий.

Совместное применение сцинтиляционного и полупроводникового детекторов позволяет отождествить все основные особенности в спектрах, полученных с применением сцинтиллятора, и построить перечень основных детектируемых гамма-линий для каждого образца-аналога. Кроме этого, сопоставление данных измерений этих двух типов детекторов позволяет подтвердить достаточность чувствительности и спектрального разрешения сцинтиляционного детектора на основе  $\text{CeBr}_3$  для изучения состава планетного тела.

Следует учесть, что кроме характеристических гамма-линий от испытуемого образца-аналога измеренные спектры также содержали гамма-линии от облученных нейтронами элементов конструкции самой гамма-станции, всей экспериментальной установки и помещения, в котором проводились измерения. Для учета вклада таких гамма-линий в ходе эксперимента проводились измерения фона, при которых в кассете аналог-образец в гамма-станции отсутствовал. Самой яркой фоновой гамма-линией является линия 2223 кэВ (см. рис. 3–8), образующаяся в результате захвата нейтрона ядром водорода (протоном) с образованием ядра дейтерия. Высокая интенсивность этой гамма-линии обусловлена большим количеством воды, окружающей нейтронный источник.

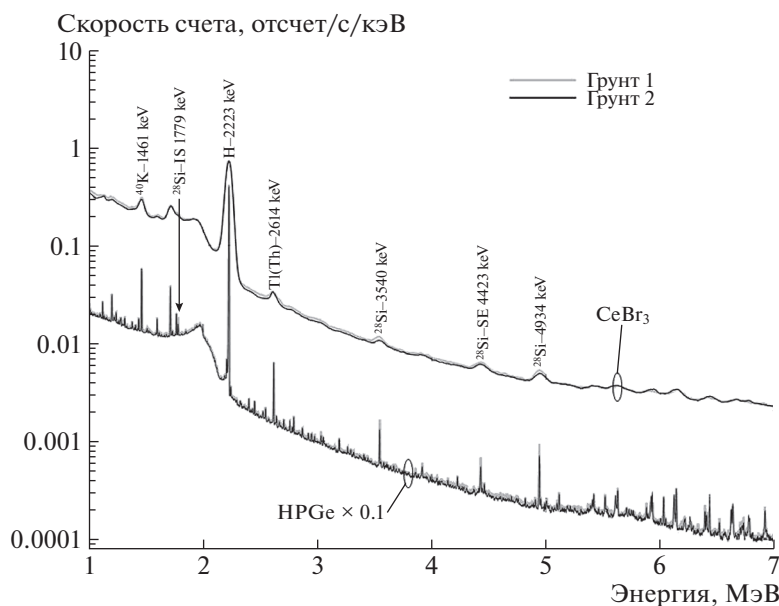


Рис. 3. Гамма-спектры от образцов “Грунт 1” и “Грунт 2”, измеренные гамма-спектрометрами на основе HPGe и кристалла CeBr<sub>3</sub>.

В качестве образцов-аналогов планетного вещества преимущественно использовались оксиды различных химических элементов с классом чистоты “Ч” (чистые) или “ЧДА” (чистые для анализа), где массовая доля основного вещества составляет не ниже 96%. Характерные массы образцов составляли 850–1600 г.

### 3. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе эксперимента на установке ЭУ-ЯП-03 были проведены тестовые измерения для двух образцов натурального грунта с известным элементным составом (см. рис. 3). Эти образцы были отобраны в полевых исследованиях на мерзлотных полигонах Института мерзлотоведения ИМЗ СО РАН [16]. Изучение состава образцов натурального грунта проводилось в лаборатории Института проблем технологии микроэлектроники и

особочистых материалов РАН масс-спектральным и атомно-эмиссионными методами. Состав этих образцов приведен в табл. 1. Для каждого исследуемого образца натурального грунта были проведены одновременные измерения спектров гамма-лучей обоими гамма-спектрометрами. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Основной оксид, входящий в состав образцов, — это SiO<sub>2</sub>, массовая доля которого составляет 64% и 83% для образцов “Грунт 1” и “Грунт 2” соответственно (см. табл. 1). Учитывая полную массу образцов 1605 и 1585 г, парциальная масса оксида кремния для образцов “Грунт 1” и “Грунт 2” составляла 1034 и 1314 г соответственно. Таким образом, образец “Грунт 2” был в 1.3 раза богаче оксидом кремния, чем образец “Грунт 1”. Наиболее интенсивные гамма-линии <sup>28</sup>Si с энергиями 3540, 4423 (SE) и 4934 кэВ были зарегистрированы в обоих гамма-спектрометрах (HPGe и CeBr<sub>3</sub>), и их интенсивности были выше для образца “Грунт 2” (см. рис. 3). Кроме линий кремния также была зарегистрирована гамма-линия оксида алюминия — это второй по массе оксид, входящий в состав грунта (см. табл. 1). Его парциальная масса в образцах составляет 209 и 168 г для “Грунт 1” и “Грунт 2” соответственно. Из-за небольшого количества ядер алюминия в образцах гамма-линия <sup>27</sup>Al с энергией 7724 кэВ от реакции радиационного захвата была зарегистрирована только в полупроводниковом гамма-спектрометре HPGe. Гамма-линии от остальных оксидов, входящих в состав образцов “Грунт 1” и “Грунт 2” (см. табл. 1), не

Таблица 1. Состав образцов “Грунт 1” (1605 г) и “Грунт 2” (1585 г)

Оксид	Грунт 1		Грунт 2	
	масса, %	масса, г	масса, %	масса, г
SiO <sub>2</sub>	64.4	1033.6	82.9	1314.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.0	208.7	10.6	168.0
Na <sub>2</sub> O, MgO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub> , MnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	22.6	362.7	6.5	103.0

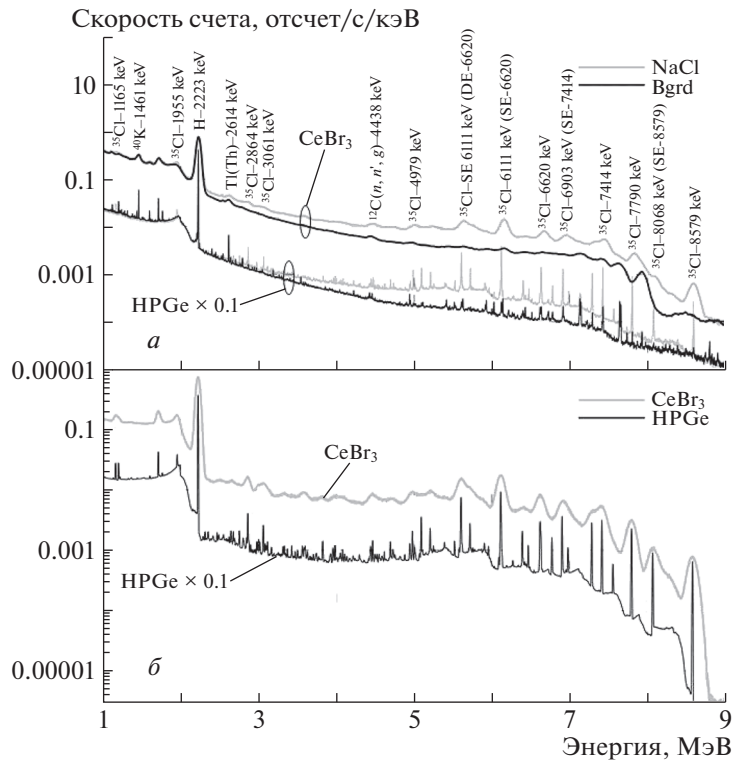


Рис. 4. Гамма-спектры от образца NaCl: измеренные гамма-спектрометрами на основе HPGe и кристалла CeBr<sub>3</sub> (а), смоделированные для гамма-спектрометров на основе HPGe и кристалла CeBr<sub>3</sub> (б).

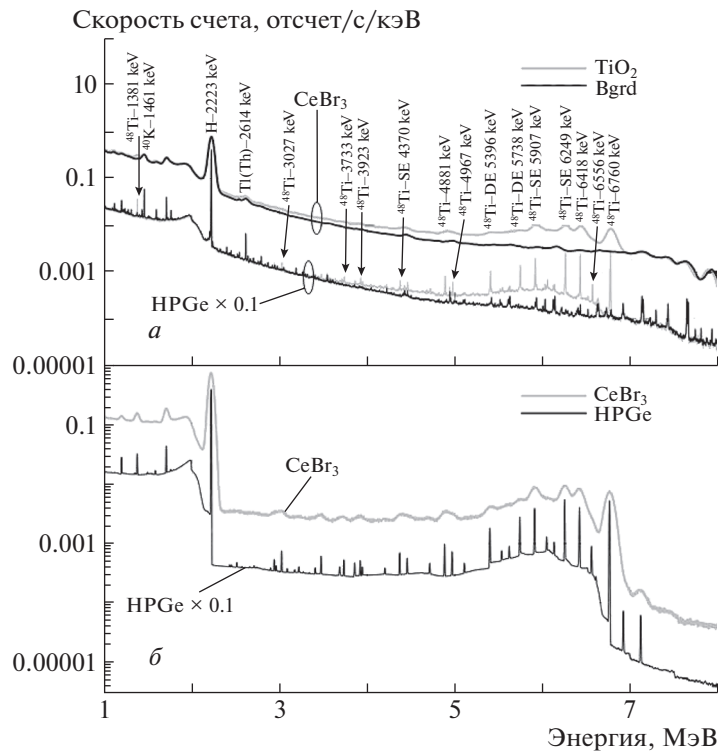


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для образца TiO<sub>2</sub>.

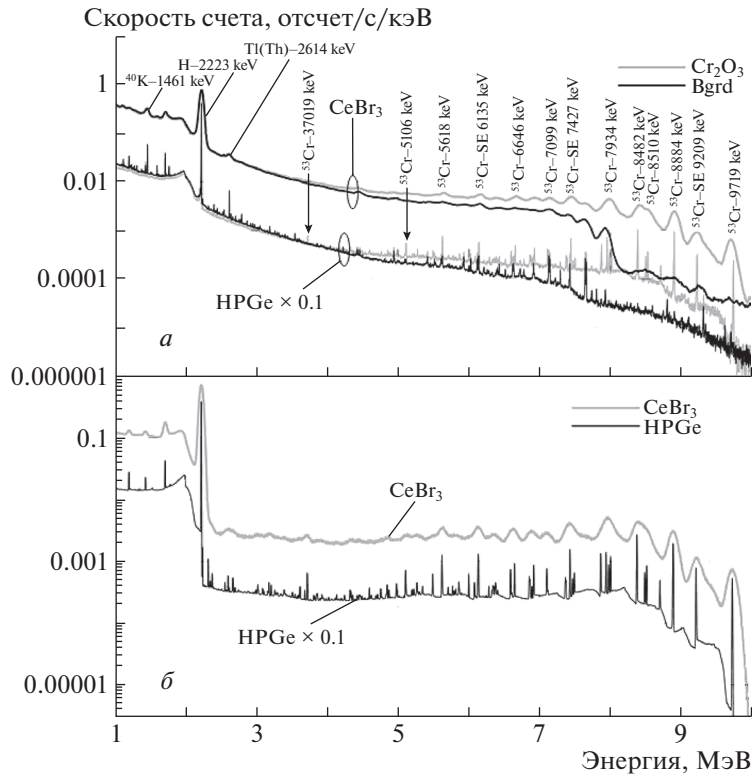


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но для образца Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

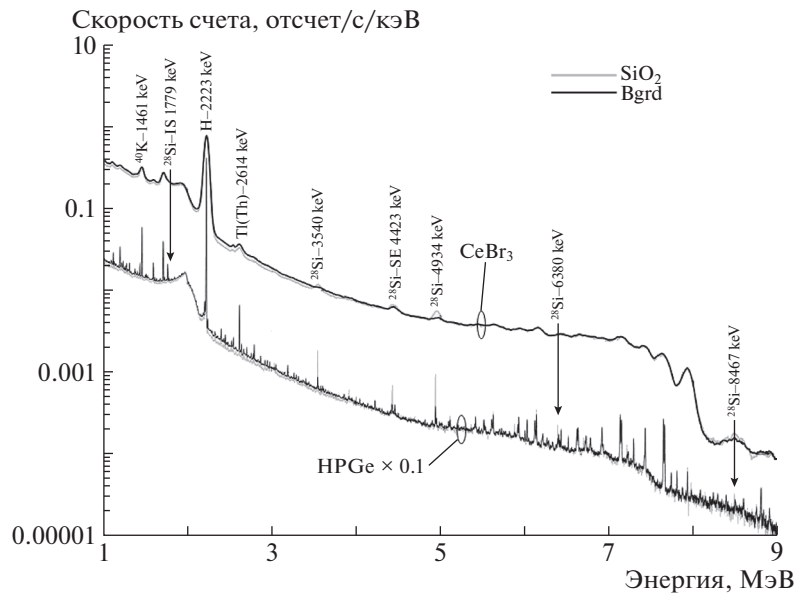


Рис. 7. Гамма-спектры от образца SiO<sub>2</sub>, измеренные гамма-спектрометрами на основе HPGe и кристалла CeBr<sub>3</sub>. Черным цветом приведены гамма-спектры, измеренные на гамма-источнике без образца.

были зарегистрированы, поскольку их интенсивности оказались слишком слабыми для регистрации в данной установке вследствие недостаточной массы оксидов в этих образцах. Поэтому последующие измерения выполнялись на образцах, состоящих из монооксидов.

Для второго этапа эксперимента были отобраны оксиды семи элементов, которые входят в состав реголита Марса [17] и Меркурия [18]: SiO<sub>2</sub>, CaO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub>. Кроме перечисленных оксидов особый интерес представляет

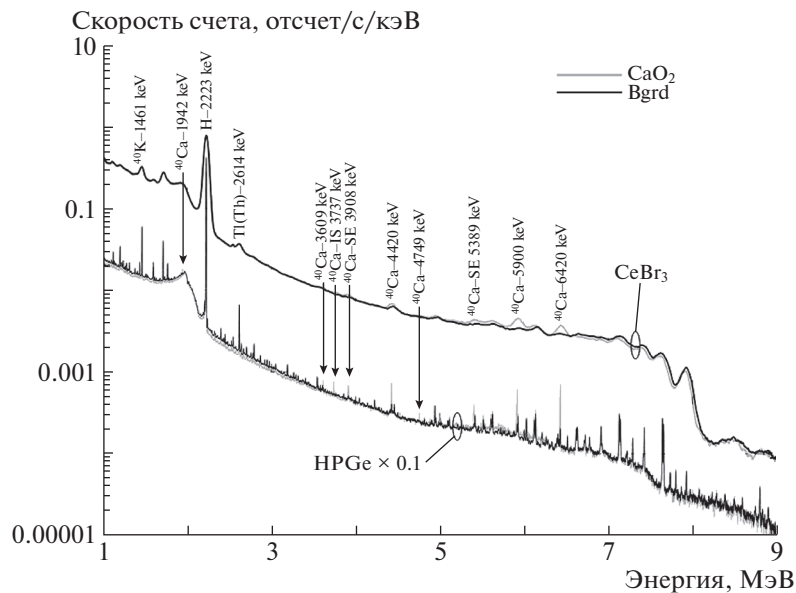


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, но для образца  $\text{CaO}_2$ .

хлор, который, как известно, также входит в состав марсианского грунта [17]. Для измерения гамма-линий от хлора был подготовлен образец-аналог на основе поваренной соли  $\text{NaCl}$ .

Примеры измеренных гамма-спектров приведены на рис. 3–8. Список гамма-линий для каждого гамма-спектрометра представлен в табл. 2. Большая часть представленных линий соответствует реакциям радиационного захвата нейтрона, но есть и несколько линий, которые являются продуктом реакции неупругого рассеяния быстрых нейтронов на  $^{47}\text{Ti}$  (984 кэВ),  $\text{Ca}$  (3737 кэВ) и  $^{28}\text{Si}$  (1779 кэВ). Всю совокупность измеренных гамма-линий от образцов-аналогов планетного грунта можно разделить на две группы: первая группа включает линии, присутствующие в спектрах обоих гамма-спектрометров (HPGe и  $\text{CeBr}_3$ ). Линии второй группы были обнаружены только в спектре, измеренном германиевым гамма-спектрометром.

Особый интерес представляет образец-аналог, состоящий из  $\text{NaCl}$ . Известно, что хлор имеет большое сечение захвата тепловых нейтронов и, как следствие, обладает целым набором интенсивных гамма-линий от возбужденных ядер — продуктов реакций нейтронного захвата, которые распределены в широком энергетическом диапазоне (см. рис. 4). Все гамма-линии (кроме линии 1165 кэВ) этого изотопа были зарегистрированы двумя гамма-спектрометрами. Набор зарегистрированных гамма-линий для образца  $\text{NaCl}$  полностью соответствует гамма-линиям, которые были получены в период калибровки гамма-станции, выполненной в Чешском политехническом университете г. Праги [14].

Мишень на основе оксида титана  $\text{TiO}_2$  также интересна с точки зрения будущих космических исследований по гамма-спектроскопии планет, поскольку титан может одновременно входить как в вещество поверхности планеты, так и в состав материалов космического аппарата. Среди цветных металлов ядра титана обладают одним из самых больших сечений захвата нейтронов и, как следствие, характеризуются интенсивными гамма-линиями. Очевидно, что гамма-линии ядер титана, входящих в конструкцию КА, идентичны гамма-линиям этого элемента в веществе небесного тела. Такое совпадение мешает прямому определению концентрации титана в грунте исследуемого тела, поскольку для этого необходимо измерить поток фотонов в гамма-линиях непосредственно от поверхности изучаемого небесного объекта. Поэтому из измеренного на борту КА спектра гамма-фотонов следует вычитать так называемый фоновый спектр, связанный с собственным излучением КА. Этот спектр должен быть измерен, когда КА находится в условиях облучения частицами ГКЛ вдали от небесного тела и затем поправлен с учетом ослабления суммарного потока ГКЛ в его непосредственной окрестности или на самой поверхности. В результате будет получен спектр гамма-излучения, соответствующий излучению от поверхности небесного тела, а интенсивность гамма-линий от титана будет отражать концентрацию в грунте ядер этого элемента. Пример модели фона гамма-излучения, созданной для гамма-спектрометра, установленного на КА “Лунар Проспектор”, приведен в публикации [7].

На рис. 5 представлены спектры с образцом-аналогом из оксида титана, содержащие в себе



**Таблица 2.** Список образцов и характеристических гамма-линий, зарегистрированных гамма-спектрометрами на основе  $\text{CeBr}_3$  и  $\text{HPGe}$ 

№	Образец	Масса, г	Основные гамма-линии (изотоп, энергия, кэВ)	$\text{CeBr}_3$	$\text{HPGe}$
1	$\text{NaCl}$	1345	$^{35}\text{Cl} - 1165$	—	+
			$^{35}\text{Cl} - 1955$	+	+
			$^{35}\text{Cl} - 2864$	+ сл.	+
			$^{35}\text{Cl} - 3062$	+ сл.	+
			$^{35}\text{Cl} - 5600 \text{ SE}$	+	+
			$^{35}\text{Cl} - 6111 \text{ SE}$	1.000	+
			$^{35}\text{Cl} - 6620$	+	+
			$^{35}\text{Cl} - 6903 \text{ SE}$	+	+
			$^{35}\text{Cl} - 7414$	+	+
			$^{35}\text{Cl} - 7790$	0.190	+
			$^{35}\text{Cl} - 8068 \text{ SE}$	+ сл.	+
			$^{35}\text{Cl} - 8579$	0.088	+
			2	$\text{Al}_3\text{O}_3$	1185
$^{27}\text{Al} - 4133$	—	+ сл.			
$^{27}\text{Al} - 4734$	—	+ сл.			
$^{27}\text{Al} - 7213 \text{ SE}$	+ сл.	+			
$^{27}\text{Al} - 7724$	+ сл.	+			
3	$\text{TiO}_2$	850	$^{47}\text{Ti} - 984 \text{ IS}$	+ сл.	+
			$^{48}\text{Ti} - 1382$	1.000	+
			$^{48}\text{Ti} - 1586$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 3027$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 3476$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 3734$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 3923$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 4370 \text{ SE}$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 4881$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 4967$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 5396 \text{ DE}$	+ сл.	+
			$^{48}\text{Ti} - 5738 \text{ DE}$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 5907 \text{ SE}$	0.272	+
			$^{48}\text{Ti} - 6249 \text{ SE}$	0.240	+
			$^{48}\text{Ti} - 6418$	0.265	+
			$^{48}\text{Ti} - 6556$	—	+
			$^{48}\text{Ti} - 6760$	0.572	+
4	$\text{MnO}_2$	1100	$^{55}\text{Mn} - 847$	+	+
			$^{55}\text{Mn} - 1810$	+ сл.	+
			$^{55}\text{Mn} - 21135$	—	+
			$^{55}\text{Mn} - 3409$	—	+
			$^{55}\text{Mn} - 5014$	+	+
			$^{55}\text{Mn} - 5181$	+	+
			$^{55}\text{Mn} - 5527$	+	+
			$^{55}\text{Mn} - 5920$	—	+
			$^{55}\text{Mn} - 6784$	—	+
			$^{55}\text{Mn} - 7058$	+	+
			$^{55}\text{Mn} - 7159$	—	+
			$^{55}\text{Mn} - 7244$	+	+
			$^{55}\text{Mn} - 7270$	—	+

Таблица 2. Окончание

№	Образец	Масса, г	Основные гамма-линии (изотоп, энергия, кэВ)	CeBr <sub>3</sub>	HPGe
5	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1440	<sup>50</sup> Cr – 749	–	+
			<sup>53</sup> Cr – 835	–	+
			<sup>53</sup> Cr – 1785	–	+
			<sup>53</sup> Cr – 2239	–	+
			<sup>53</sup> Cr – 3720	–	+
			<sup>53</sup> Cr – 5107 SE	–	+
			<sup>53</sup> Cr – 5618	+	+
			<sup>53</sup> Cr – 6589	+	+
			<sup>53</sup> Cr – 6646	+	+
			<sup>53</sup> Cr – 7100	–	+
			<sup>53</sup> Cr – 7427 SE	+	+
			<sup>53</sup> Cr – 7938	+	+
			<sup>53</sup> Cr – 8483	+	+
			<sup>53</sup> Cr – 8511	+	+
			<sup>53</sup> Cr – 8884	1.000	+
6	CaO <sub>2</sub>	1000	<sup>53</sup> Cr – 9208 SE	0.317	+
			<sup>53</sup> Cr – 9719	0.339	+
			<sup>40</sup> Ca – 1943	–	+
			<sup>40</sup> Ca – 3610	–	+
			<sup>40</sup> Ca – 3737 IS	–	+
			<sup>40</sup> Ca – 3908 SE	+ сл.	+
			<sup>40</sup> Ca – 4419	0.500	+
			<sup>40</sup> Ca – 4749	–	+
			<sup>40</sup> Ca – 5900	0.809	+
			<sup>40</sup> Ca – 6420	1.000	+
7	SiO <sub>2</sub>	1390	<sup>28</sup> Si – 1779 IS	–	+
			<sup>28</sup> Si – 3540	1.000	+
			<sup>28</sup> Si – 4423 SE	0.340	+
			<sup>28</sup> Si – 4934	0.628	+
			<sup>28</sup> Si – 6380	–	–
			<sup>28</sup> Si – 8467	–	–
8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	940	<sup>31</sup> P – 3523	–	+ сл.
			<sup>31</sup> P – 3900	–	+
			<sup>31</sup> P – 4671	–	+
			<sup>31</sup> P – 6786	–	+
10	Грунт 1	1605	<sup>28</sup> Si – 1779	+ сл.	+
			<sup>28</sup> Si – 3540	+	+
			<sup>28</sup> Si – 4423 SE	+	+
			<sup>28</sup> Si – 4934	+	+
11	Грунт 2	1585	<sup>27</sup> Al – 7724	–	+
			<sup>28</sup> Si – 1779	+ сл.	+
			<sup>28</sup> Si – 3540	+	+
			<sup>28</sup> Si – 4423 SE	–	+
			<sup>28</sup> Si – 4934	+	+
			<sup>27</sup> Al – 7724	–	+

Примечание. Сл. — слабая линия.

основные захватные гамма-линии титана. Большею частью они были зарегистрированы в обоих гамма-спектрометрах. Набор наиболее сильных линий от реакций нейтронного захвата титаном лежит в энергетическом диапазоне от 5 до 7 МэВ.

Одним из основных порообразующих элементов поверхности планет земной группы является кремний  $^{28}\text{Si}$ . Измерения, выполненные с образцом-аналогом из оксида кремния, показали, что три из четырех обнаруженных линий гамма-спектрометром на основе HPGe были также зарегистрированы в гамма-спектрометре на базе кристалла  $\text{CeBr}_3$ : 3540, 4423 (SE) и 4934 кэВ (рис. 7). Наиболее сильной среди них является линия с энергией 4934 кэВ. Она может быть основной реперной гамма-линией для оценки количества кремния в веществе поверхности небесных тел.

По данным сцинтилляционного гамма-спектрометра  $\text{CeBr}_3$  для пяти образцов-аналогов с оксидами  $\text{NaCl}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$  были отобраны наиболее сильные гамма-линии соответствующих элементов, на которые не налагаются ближайшие линии от других элементов (см. табл. 2). Такой набор может быть назван набором реперных гамма-линий для определения содержания соответствующих им элементов в планетном веществе.

Для отобранных реперных гамма-линий на основе измеренных отсчетов были выполнены оценки их физических интенсивностей (в единицах фотон  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ) в точке расположения детектора из бромида церия, в которых учитывались поглощение фотонов в веществе гамма-станции и эффективность их регистрации в детекторе. Для этих целей были использованы зависимости от энергии поглощения в воде и эффективности полного поглощения в бромиде церия, которые были вычислены при помощи кода Geant4 [19]. Потоки реперных гамма-линий для отобранных пяти образцов-аналогов в центре гамма-камеры нормировались на интенсивность наиболее сильной гамма-линии для данного элемента (см. табл. 2).

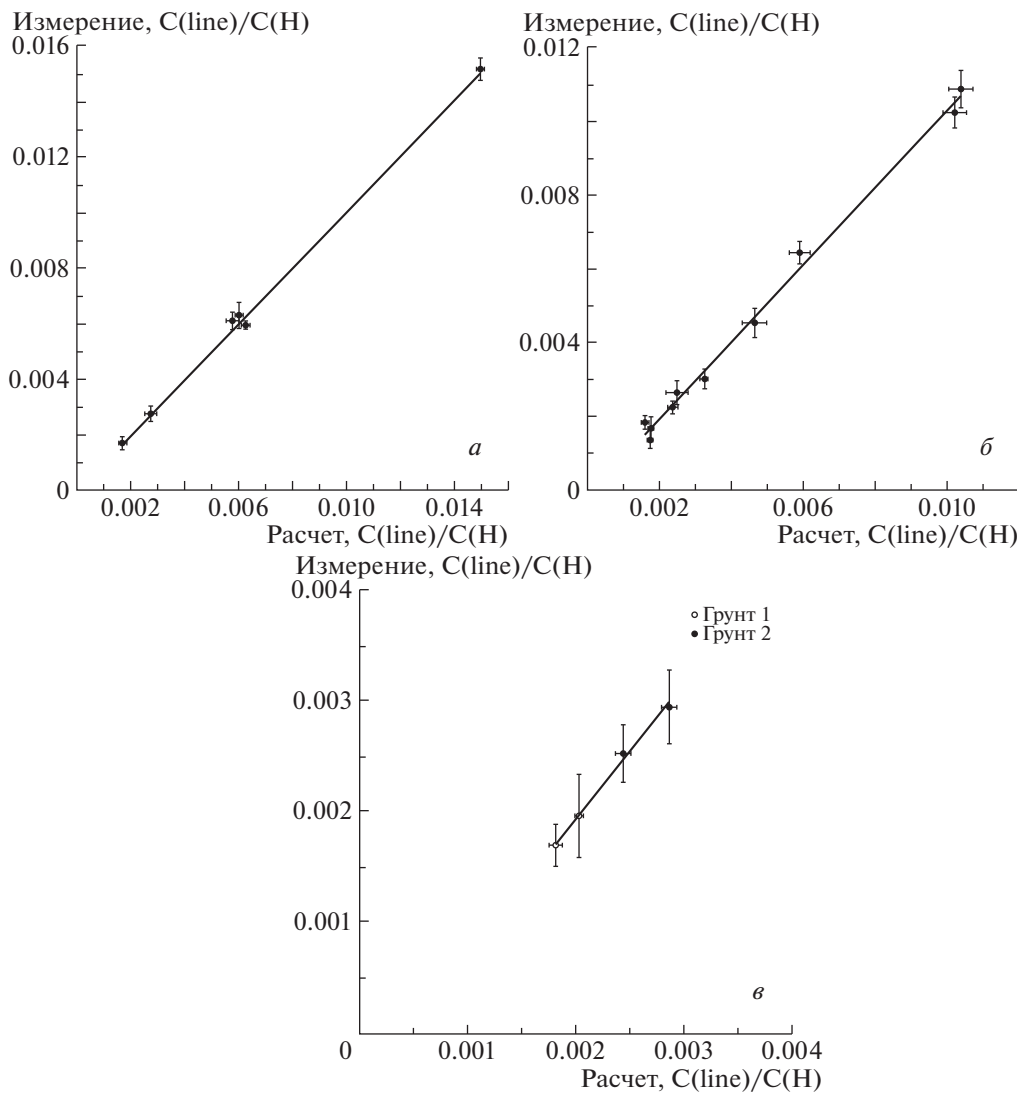
Значения относительных интенсивностей реперного набора гамма-линий для каждого элемента могут использоваться при определении его содержания в веществе небесного тела в ходе космического эксперимента (например, для анализа данных космических экспериментов МГНС и ЛГНС, в которых будет использоваться гамма-спектрометр на основе кристалла  $\text{CeBr}_3$  для изучения состава поверхности Меркурия и Луны соответственно). Измеренные интенсивности реперных линий отдельных элементов будут сопоставляться с соответствующими им численными оценками, полученными с учетом поглощения в планетном веществе и эффективности регистрации в детекторах. Массовая доля элемента должна быть свободным параметром, значение которого определяется на

основе критерия согласия измеренных и рассчитанных значений интенсивности.

Для получения достоверных оценок состава планетного вещества программы для численного моделирования интенсивностей гамма-линий должны быть надежно верифицированы, в частности, должны быть проверены сечения реакций нейтронного захвата и сечения рассеяния гамма-фотонов, на основе которых проводятся вычисления. Такая верификация программных кодов должна быть выполнена заранее, до начала проведения космического эксперимента. Для образцов с известными массовыми долями тестируемых элементов должны быть проведены численные расчеты интенсивностей основных реперных гамма-линий, которые должны быть подтвержденные физическими измерениями.

Для проведения численного моделирования результатов измерений на установке ЭУ-ЯП-03 был использован специально разработанный программный пакет АСПВ-ЛИ-03, предназначенный для моделирования спектральных свойств вторичного гамма-излучения от образцов-аналогов планетного вещества при их облучении стационарными потоками тепловых нейтронов. Данный программный пакет основан на коде для выполнения ядерно-физических расчетов MCNPX 2.7e с библиотеками ENDF/B-VII.0 и ENDF/B-VI нейтронных и фотоатомных процессов соответственно [20, 21]. Численная модель включала в себя описание параллелепипеда с размерами  $50 \times 56 \times 56$  см, заполненного 110 л  $\text{H}_2\text{O}$ , образец-аналог планетного вещества, помещенный внутри него изотопный источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , бетонные стены, пол и потолок лабораторного зала, а также модели детекторов на основе кристаллов  $\text{CeBr}_3$  и HPGe. Для упрощения описания геометрии задачи в нее не было включено вспомогательное лабораторное оборудование, находившееся в зале. Не были учтены и гамма-линии, возникающие в результате распада естественных радиоактивных элементов, так как это не является задачей данного моделирования. Численные модели спектров отсчетов были выполнены с учетом энергетического разрешения использовавшихся детекторов, полученного ранее во время специальных калибровочных измерений.

Таким образом, для каждого экспериментального измерения образцов-аналогов на установке ЭУ-ЯП-03 было проведено соответствующее численное моделирование потоков гамма-лучей и спектров отсчетов, которые регистрировались детекторами на основе кристаллов  $\text{CeBr}_3$  и HPGe на расстоянии 1 м от центра гамма-станции. Примеры модельных спектров для образцов-аналогов  $\text{NaCl}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  представлены на рис. 4–6 соответственно.



**Рис. 9.** Интенсивности измеренных гамма-линий в зависимости от интенсивности расчетных гамма-линий сцинтилляционного гамма-спектрометра  $\text{CeBr}_3$ , нормированных на линию водорода  $\text{H} - 2223$  кэВ. *а* — Мишень  $\text{TiO}_2$ , *б* — мишень  $\text{Sr}_2\text{O}_3$ , *в* — мишени “Грунт 1” и “Грунт 2”.

Для сопоставления результатов измерений и численного моделирования спектральных свойств вторичного гамма-излучения от тестируемых образцов-аналогов были построены графики сопоставления интенсивностей расчетных и измеренных реперных гамма-линий. Примеры такого сопоставления для образцов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Sr}_2\text{O}_3$  представлены на рис. 9. При построении этих зависимостей интенсивности гамма-линии в каждом спектре были нормированы на интенсивность гамма-линии водорода  $\text{H} - 2223$  кэВ, которая возникает при поглощении нейтронов в водном наполнении резервуара гамма-станции. Аналогичные графики сопоставления были построены для образцов “Грунт 1” и “Грунт 2” (рис. 9). Из этих графиков следует, что имеется практически полное (в пределах статистических погрешностей) согласие

результатов численного моделирования с данными экспериментальных измерений. Это означает, что разработанные пакеты программ численного моделирования потоков линий нейтронного захвата породообразующими элементами планетного вещества могут применяться для обработки и анализа данных космических экспериментов по гамма-спектроскопии планет и малых тел солнечной системы.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была создана лабораторная установка ЭУ-ЯП-03 с двумя независимыми гамма-спектрометрами для проведения измерений с монообразцами, аналогами планетного вещества. В их состав входят химические

элементы, являющиеся основными породообразующими элементами поверхности Луны и планет земной группы (Марс, Меркурий, Венера). По результатам лабораторных экспериментов была создана база данных реперных гамма-линий основных породообразующих элементов, которые могут быть отождествлены при помощи гамма-спектрометра на основе сцинтилляционного кристалла  $\text{CeBr}_3$ . База данных этих линий доступна по ссылке <https://np.cosmos.ru/rmf/>.

Кроме этого была создана численная модель экспериментальной установки на основе разработанного программного пакета АСПВ-ЛИ-03. Данная численная модель позволила рассчитать спектральные свойства вторичного гамма-излучения от монообразцов, аналогов планетного вещества. В работе было показано хорошее соответствие численных расчетов с данными эксперимента. На основе этого пакета будут разработаны специализированные пакеты программ АСПВ-Планета для моделирования условий проведения научных космических экспериментов.

Полученные результаты будут использоваться в будущем для анализа и интерпретации научных данных, полученных в космических экспериментах МГНС по орбитальному обзору поверхности планеты Меркурий в рамках проекта ЕКА “Бепи-Коломбо” [12] и ЛГНС по орбитальному обзору поверхности Луны в рамках российского проекта “Луна-26”.

Коллектив авторов выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (грант РФФ № 14-22-00249) при проведении данной научно-исследовательской работы. Работа специалистов Института экспериментальной и прикладной физики Чешского политехнического университета (г. Прага, Чешская республика) была поддержана грантом Европейского фонда регионального развития (№ CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_013/0001785).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. П. Виноградов, Ю. А. Сурков, Г. М. Чернов, *Космич. исслед.* **4**, 871 (1966).
2. А. Р. Vinogradov, Yu. A. Surkov, and L. P. Moskaleva, *Moon and Planets II*, Ed. by A. Dollfus (North-Holland, Amsterdam, 1968), p. 77.
3. W. V. Boynton, W. C. Feldman, I. G. Mitrofanov, L. G. Evans, R. C. Reedy, S. W. Squyres, R. Starr, J. I. Trombka, C. d’Uston, J. R. Arnold, P. A. J. Englert, A. E. Metzger, H. Wänke, J. Brückner, D. M. Drake, C. Shinohara, *et al.*, *Space Sci. Rev.* **110**, 37 (2004).
4. J. Masarik and R. C. Reedy, *J. Geophys. Res.* **101**, 18891 (1996).
5. Iu. A. Surkov, F. F. Kirnozov, V. N. Glazov, A. G. Dunchenko, L. P. Tatsy, and O. P. Sobornov, in *Proceedings of the 17th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, USA, Mar. 17–21, 1986*; *J. Geophys. Res.* **92**, E537 (1987).
6. L. G. Evans, R. C. Reedy, R. D. Starr, K. E. Kerry, and W. V. Boynton, *J. Geophys. Res.* **111**, E03S04 (2006).
7. T. H. Prettyman, J. J. Hagerty, R. C. Elphic, W. C. Feldman, D. J. Lawrence, G. W. McKinney, and D. T. Vaniman, *J. Geophys. Res.* **111**, E12007 (2006).
8. L. G. Evans, P. N. Peplowski, E. A. Rhodes, D. J. Lawrence, T. J. McCoy, L. R. Nittler, S. C. Solomon, A. L. Sprague, K. R. Stockstill-Cahill, R. D. Starr, S. Z. Weider, W. V. Boynton, D. K. Hamara, and J. O. Goldsten, *J. Geophys. Res.* **117**, E00L07 (2012).
9. J. O. Goldsten, E. A. Rhodes, W. V. Boynton, W. C. Feldman, D. J. Lawrence, J. I. Trombka, D. M. Smith, L. G. Evans, J. White, N. W. Madden, P. C. Berg, G. A. Murphy, R. S. Gurnee, K. Strohhahn, B. D. Williams, E. D. Schaefer, *et al.*, *Space Sci. Rev.* **131**, 339 (2007).
10. N. Hasebe, E. Shibamura, T. Miyachi, T. Takashima, M. Kobayashi, O. Okudaira, N. Yamashita, S. Kobayashi, Y. Karouji, M. Hareyama, S. Kodaira, K. Hayatsu, K. Iwabuchi, S. Nemoto, K. Sakurai, S. Komatsu, *et al.*, *Transact. Space Technol. Japan* **7**, Pk\_35 (2010).
11. I. V. Khodyuk, F. G. A. Quarati, M. S. Alekhin, and P. Dorenbos, arXiv: 1209.5278.
12. I. G. Mitrofanov, A. S. Kozyrev, A. Konovalov, M. L. Litvak, A. A. Malakhov, M. I. Mokrousov, A. B. Sanin, V. I. Tret’ykov, A. V. Vostrukhin, Yu. I. Bobrovnikskij, T. M. Tomilina, L. Gurvits, and A. Owens, *Planet. Space Sci.* **58**, 116 (2010).
13. A. Kozyrev, I. Mitrofanov, A. Owens, F. Quarati, J. Benkhoff, B. Bakhtin, F. Fedosov, D. Golovin, M. Litvak, A. Malakhov, M. Mokrousov, I. Nuzhdin, A. Sanin, V. Tret’yakov, A. Vostrukhin, G. Timoshenko, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 085112 (2016).
14. C. Granja, T. Slavicek, M. Kroupa, A. Owens, S. Pospisil, Z. Janout, M. Kralik, J. Solc, and O. Valach, *Nucl. Instrum. Methods A* **771**, 1 (2015).
15. Yu. A. Alexandrov, W. I. Furman, A. V. Ignatyuk, M. V. Kazarnovsky, V. Yu. Konovalov, N. V. Kornilov, L. B. Pikelner, V. I. Plyaskin, Yu. P. Popov, H. Rauch, W. Waschkowski, and Yu. S. Zamyatnin, *Low Energy Neutron Physics, Part 1*, Ed. by H. Schopper (Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York, 2000).
16. М. Л. Литвак, Д. В. Головин, А. Б. Колесников, А. А. Вострухин, М. В. Дьячкова, А. С. Козырев, И. Г. Митрофанов, М. И. Мокроусов, А. Б. Санин, *Астроном. вестн.* **51**, 189 (2017) [*Solar Syst. Res.* **51**, 171 (2017)].

17. R. Rieder, T. Economou, H. Wanke, A. Turkevich, J. Crisp, J. Breckner, G. Dreibus, and H. Y. McSween, Jr., *Science* **278**, 1771 (1997).
18. G. J. Taylor and E. R. D. Scott, in *Treatise on Geochemistry*, Ed. by H. D. Holland and K. K. Turekian (Elsevier, Amsterdam, 2004), p. 477.
19. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods* **506**, 250 (2003).
20. *MCNPX User's Manual, Version 2.7.0*, Ed. by D. B. Pelowitz, Los Alamos National Laboratory Report No. LA-CP-11-00438.
21. M. B. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, M. E. Dunn, Y. Danon, A. C. Kahler, D. L. Smith, B. Pritychenko, G. Arbanas, R. Arcilla, R. Brewer, D. A. Brown, R. Capote, A. D. Carlson, Y. S. Cho, H. Derrien, *et al.*, *Nucl. Data Sheets* **112**, 2887 (2011).

## **THE MODELING OF SPACE SCIENCE EXPERIMENTS FOR NUCLEAR PLANETOLOGY: MEASUREMENT OF RELATIVE INTENSITIES OF LINES OF GAMMA-RAYS PRODUCED IN THE NUCLEAR CAPTURE REACTIONS OF THERMAL NEUTRONS**

**A. S. Kozyrev, A. A. Anikin, A. A. Vostrukhin, D. V. Golovin, C. Granja, P. A. Dubasov,  
A. O. Zontikov, F. Quarati, D. I. Lisov, M. L. Litvak, I. G. Mitrofanov, A. Owens, S. Pospisil,  
A. B. Sanin, T. Slavicek, G. N. Timoshenko, V. N. Shvetsov**

The results are presented of experimental studies of gamma-ray radiation for sample-analogs of the planetary material under irradiation by fluxes of thermal neutrons. It was performed a comparison of the physical measurements for sample-analogs of planetary materials with measurements for soil samples with known composition. The obtained results will be used in gamma-ray spectra data processing for the Moon and Mercury gamma-ray measurements from gamma-spectrometers onboard the spacecraft to study the composition of the surface of these celestial bodies.