

ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ ОИЯИ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

*М. Л. Литвак^{a,1}, А. А. Вострухин^a,
Д. В. Головин^a, П. В. Дубасов^b, А. О. Зонтиков^b,
А. С. Козырев^a, А. Р. Крылов^b, В. А. Крылов^b,
И. Г. Митрофанов^a, М. И. Мокроусов^a, А. Н. Репкин^b,
Г. Н. Тимошенко^{b,e}, К. В. Удовиченко^b, В. Н. Швецов^b*

^a Институт космических исследований РАН, Москва

^b Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^e Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

В данной работе представлены результаты испытаний HPGe гамма-спектрометра на модели планетарного грунта в сочетании с различными типами импульсных нейтронных генераторов. Все измерения были выполнены на экспериментальном стенде ядерной планетологии, созданном в Объединенном институте ядерных исследований для физических калибровок активных гамма- и нейтронных спектрометров. Основной целью работы являлось моделирование космического эксперимента по измерению элементного состава планетного вещества Марса с помощью нейтронно-индуцированного метода гамма-спектроскопии. Были изучены преимущества и недостатки работы с газонаполненным нейтронным генератором в сравнении с нейтронным генератором с вакуумной трубкой.

Results are presented of testing an HPGe γ -spectrometer on a planetary soil model with different types of pulsed neutron generators. All measurements have been done at an experimental nuclear planetary science stand designed at the Joint Institute for Nuclear Research for physical calibrations of active gamma and neutron spectrometers. The main task is to model a space experiment on the evaluation of the elemental composition of Martian planetary matter with neutron-induced gamma spectroscopy. Advantages and imperfections are analyzed of using a gas-filled neutron generator compared with a vacuum tube neutron generator.

PACS: 29.30.Kv

¹E-mail: litvak@mx.iki.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

За время проведения планетных исследований, начиная с середины прошлого века и до настоящего времени, на борту космических аппаратов неоднократно устанавливались компактные гамма-спектрометры, предназначенные для исследования элементного состава поверхности планет и малых тел Солнечной системы. Например, на космических миссиях «Mars Odyssey» [1, 2], MESSENGER [3, 4], KAGUYA [5] были установлены гамма-спектрометры из высокочистого германия, а для космических миссий «Lunar Prospector» [6] и «VepiColombo» [7] использовались или будут использоваться сцинтилляционные детекторы гамма-излучения. В ходе этих исследований было проведено многолетнее картографирование поверхности планет, оценены вариации базовых породообразующих элементов, таких как Si, O, Fe, Al, Mg, Ti, Ca, Na, K и др., в приповерхностных слоях грунта (на глубине 0,5–1 м) и даже обнаружен водяной лед в полярных районах (см., например, [2, 4, 8–10]).

Нейтронное и гамма-излучение планет и их спутников (если на них отсутствует плотная атмосфера) возникает при взаимодействии с грунтом высокоэнергетичных заряженных частиц космических лучей, бомбардирующих поверхность небесных тел (см., например, [11]). Протоны и альфа-частицы космических лучей, сталкиваясь в приповерхностном слое вещества с ядрами основных породообразующих элементов, рождают нейтроны высоких энергий. Быстрые нейтроны распространяются в веществе и взаимодействуют с ядрами основных породообразующих элементов по каналам упругих и неупругих реакций, что приводит к их замедлению и перераспределению потока нейтронов в широком диапазоне энергии. Поскольку водород является эффективным замедлителем нейтронов, спектр выходящих из поверхности нейтронов существенно зависит от содержания воды в грунте, а его анализ и поиск пространственных вариаций позволяет судить о распределении воды/водяного льда в приповерхностном слое планет. Ядерные реакции в грунте вещества с нейтронами разных энергий сопровождаются возбуждением ядер, которое снимается излучением характеристических гамма-квантов, уникальных для каждого элемента. В результате облучения космическими лучами поверхность планеты испускает спектр гамма-излучения, состоящий из набора ядерных линий, по которым можно определить химический состав грунта.

В последнее время кроме орбитальных миссий широкое распространение получило использование посадочных стационарных или мобильных платформ (марсоходы, луноходы) для изучения условий непосредственно на поверхности исследуемой планеты в наиболее интересных районах, выбранных в ходе орбитальных наблюдений. Это касается современных и будущих исследований Марса, Луны, а также Венеры и даже спутников Юпитера. На посадочных космических аппаратах также могут устанавливаться гамма-спектрометры, причем их принцип действия может отличаться от работы орбитальных приборов. Это подразумевает применение так называемых активных гамма- и нейтронных спектрометров, совместно с которыми используются искусственные источники ионизирующего излучения для генерации вторичного нейтронного и гамма-излучения из грунта. Прежде всего речь идет о портативных импульсных нейтронных генераторах. В данном случае для планетных исследований ученые пытаются адаптировать методики, которые уже много лет успешно применяются на Земле в разных областях, включая геологоразведку полезных ископаемых, медицину, поиск наркотических и взрывчатых веществ в перевозимых грузах и т. д. Импульсный нейтронный генератор позволяет об-

лучать поверхность грунта короткими (1–300 мкс) и мощными (до 10^9 с⁻¹) импульсами нейтронов с энергией 14 МэВ. Частота импульсов может варьироваться от долей Гц до кГц, причем нейтронное облучение генерируется только по команде управления. По сравнению с естественным облучением космическими лучами такой подход, за счет большой интенсивности нейтронного излучения, позволяет на порядки увеличить статистику регистрируемых отсчетов в приборе, повысить точность измерений и сократить их продолжительность. Для таких планет, как Венера, где чрезвычайно плотная атмосфера полностью экранирует поверхность от космических лучей, а посадочный аппарат может прожить лишь несколько часов, подобная методика является единственно возможной, чтобы оценить средний элементный состав приповерхностного слоя грунта. Первый прототип из серии подобной научной аппаратуры (русский прибор ДАН) был специально разработан в 2005–2011 гг. по заказу Роскосмоса для марсианской исследовательской миссии НАСА и установлен на борту марсохода «Curiosity». Он представляет собой активный нейтронный радиометр, состоящий из блока пропорциональных газонаполненных (³He) счетчиков нейтронов, снабженных быстрой электроникой (блок создан в ИКИ РАН), и блока вакуумного импульсного нейтронного генератора (созданного во ВНИИА им. Н.Л. Духова) [12, 13]. Принцип работы прибора ДАН построен на том, что нейтронный генератор облучает поверхность короткими (1–2 мкс) нейтронными импульсами с частотой 10 Гц и энергией 14 МэВ, а нейтронные детекторы регистрируют в интервале 1–10⁵ мкс после каждого импульса временное распределение событий от нейтронного альbedo поверхности в тепловом и эпитепловом энергетических диапазонах. Форма и амплитуда полученных кривых затухания потока альбедных нейтронов сильно зависит от наличия в приповерхностном слое грунта воды, ее распределения по глубине, а также присутствия в грунте отдельных элементов, таких как Cl, Fe, Ti, S, Gd (элементов, имеющих большое сечение захвата тепловых нейтронов) [14, 15].

В ближайшем будущем планируется расширить линейку таких приборов применительно к исследованиям Луны, Марса и Венеры за счет использования нейтронных и гамма-спектрометров [16–20]. Многие из этих приборов разрабатываются в России и проходят наземную отработку, полевые испытания и калибровку в ОИЯИ. Для этого в ОИЯИ был создан специальный экспериментальный стенд, позволяющий моделировать аналоги планетного вещества и проводить на них испытания прототипов активных нейтронных и гамма-спектрометров [21–23]. В 2015 г. на нем проводились физические калибровки приборов ДАН и АДРОН (последний предназначен для лунных посадочных миссий [22, 23]). В 2016 г. планировалось изучить достоинства и недостатки различных активных гамма-спектрометров, предназначенных для будущих миссий и основанных на различных типах гамма-детекторов и нейтронных генераторов. В работе [24] исследованы возможности современных сцинтилляционных детекторов в сравнении с детекторами на основе высокочистого германия для целей ядерной планетологии. В настоящей работе представлены результаты работы с различными типами нейтронных генераторов, разработанных с использованием вакуумных и газонаполненных нейтронных трубок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Работы проводились в ОИЯИ на экспериментальном стенде ДАН, созданном в Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории радиационной биологии совместно с Институтом космических исследований РАН для экспериментальных отработок космических

нейтронных и гамма-спектрометров, предназначенных для работы с нейтронными генераторами [21]. Стенд размещен на открытой площадке в отдельном помещении (ангар из тонкой гофрированной стали для снижения фона многократно рассеянных от стен и потолка нейтронов) и состоит из модели планетарного вещества и системы управления измерениями, включает также автоматическую систему дозиметрического контроля и блокировки стенда. Массивная модель-аналог марсианского грунта имеет размер $3,21 \times 3,82$ м и высоту 0,6 м. Размеры модели грунта были выбраны исходя из чувствительности нейтронных и гамма-спектрометров приборов ДАН и АДРОН. Спектрометры и нейтронные генераторы устанавливаются на посадочных платформах или марсоходах/луноходах на небольшой высоте (20–80 см) над грунтом, а область эффективной регистрации альбедных нейтронов представляет собой окружность с радиусом примерно 1–1,5 м вокруг аппарата (см., например, [25]).

Модель грунта имеет сложную многослойную структуру. Основная часть собрана из листов силикатного стекла (толщина одного листа 1 см), перемежающихся слоями листовой стали, алюминия и поливинилхлорида. Укладка мишени производилась с использованием блочного алгоритма. Структура одного повторяющегося блока представлена в табл. 1. При создании модели-аналога учитывалось, что усредненный состав марсиан-

Таблица 1. Схема расположения слоев вещества внутри одного блока модели планетного вещества

Материал	Толщина листа, мм	Толщина сегмента, мм	Толщина блока, мм
ПВХ	0,7	33,7	112,8
Al	1		
Стекло	10		
Fe	1		
Стекло	10		
Al	1		
Стекло	10	22,7	
ПВХ	0,7		
Fe	1		
Стекло	10		
Al	1	33,7	
Стекло	10		
Fe	1		
Стекло	10		
Fe	1		
Стекло	10		22,7
ПВХ	0,7		
Al	1		
Стекло	10		
Fe	1	22,7	
Стекло	10		
Fe	1		
Стекло	10		

ского грунта (и многих других планетарных грунтов) можно представить как совокупность различных оксидов, таких как SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 . Так же как и марсианский грунт, силикатное стекло в основном состоит из оксида кремния с добавлением оксидов кальция, натрия, магния и титана, но в нем практически отсутствуют оксиды железа и алюминия, которые могут составлять до 25 % по массовой доле в марсианском грунте. Поэтому для улучшения соответствия между моделью и реальным планетарным грунтом к слоям стекла были добавлены в нужных пропорциях сталь (железо), алюминий и даже поливинилхлорид (необходимый для добавления хлора, который присутствует в марсианском грунте на уровне 1 %).

Среднее содержание элементов в марсианском грунте и его модели представлено в табл. 2. В таком виде состав модели имитирует абсолютно сухой грунт Марса (содержание водорода в модели пренебрежимо мало). В отдельных измерениях внутрь модели (например, [22] и [26]) или сверху на модель добавлялись слои полиэтилена низкого давления. Этим имитировались слои приповерхностной воды или водяного льда. Таким способом моделировалась двухслойная гетерогенная структура планетарного грунта,

Таблица 2. Сравнение среднего содержания элементов в марсианском грунте и составе модели

Элемент	Среднее содержание (массовая доля) в сухом марсианском грунте, %	Содержание (массовая доля) в сухой модели марсианского грунта, %
H	—	0,062*
C	—	0,499*
O	43,886	37,729
Na	1,912	8,372
Mg	5,112	2,369
Al	4,968	5,033
Si	20,274	26,707
P	0,537	0,004
S	3,777	0,005
Cl	1,000	0,721
K	0,384	0,204
Ca	4,306	5,552
Ti	0,578	0,007
Cr	0,200	0,013
Mn	0,231	0,064
Fe	12,748	12,490
Ni	0,049	0,038
Cu	—	0,040
Zn	0,027	0,004
Br	0,017	—
As	—	0,010
Sr	—	0,063
Zr	—	0,004
Ba	—	0,009

* В составе слоев поливинилхлорида $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$.

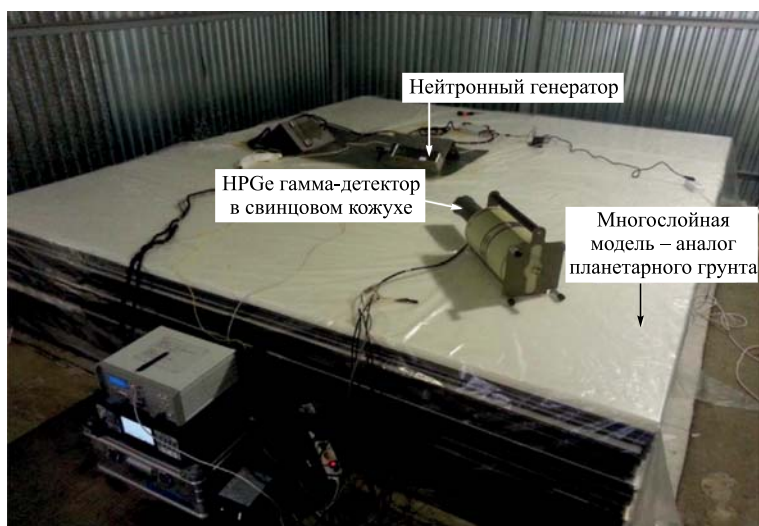


Рис. 1. Экспериментальная установка

в которой водяной лед/влажный грунт находится либо сверху, либо под слоем сухого песка или скальной породы на глубине от 5 до 50 см. Измерения с такими мишенями проводились, например, с запасным летным образцом прибора ДАН для оценки его чувствительности при обнаружении слоя воды или водяного льда, расположенного на разной глубине [26].

В нашем случае использовалась модель-аналог марсианского грунта, сверху которой был уложен 5-см слой полиэтилена. В качестве измерительной аппаратуры использовался переносной гамма-спектрометр GMX60P4-83-PL (ORTEC) на основе высокочистого германия (HPGe), детектор которого располагался на небольшой высоте над поверхностью модели (рис. 1). HPGe-детектор размером 66×89 мм обеспечивает спектральное разрешение 2,1 кэВ и эффективность регистрации квантов 60 % при энергии 1,33 МэВ и 11 % при энергии 6 МэВ.

Спектральные измерения с HPGe-спектрометром были синхронизованы по времени с работой нейтронного генератора и позволяли осуществлять набор аппаратурного спектра в заданных временных окнах после каждого импульса нейтронного генератора. Это дает возможность анализировать вклад различных процессов (неупругого рассеяния быстрых нейтронов, радиационного захвата медленных нейтронов, реакций активации) в формирование гамма-спектров и уточнить идентификацию различных характеристических линий в спектрах. Тем самым моделируется функциональная схема прототипа активного гамма-спектрометра, предназначенного для будущих посадочных миссий с высокоточным анализом химического состава грунта. Блок нейтронного генератора располагался примерно на расстоянии 1 м от блока гамма-спектрометра (см. рис. 1). В измерениях использовались два типа импульсных нейтронных генераторов с вакуумной и газонаполненной нейтронными трубками с различными временными характеристиками. Цель работы состояла в определении их сравнительной пригодности для планетных исследований с использованием нейтронно-индуцированного анализа с точки зрения улучшения надежности идентификации гамма-линий в аппаратурном спектре спектрометра.

НЕЙТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Импульсный нейтронный генератор использует ядерную реакцию $D + T = {}^4\text{He} + n$, в результате которой образуются быстрые нейтроны с энергией 14,1 МэВ и альфа-частицы с энергией 3,5 МэВ. Основной деталью генератора является нейтронная трубка, в которой ионы дейтерия, ускоренные электрическим потенциалом, сталкиваются с мишенью, включающей имплантированный тритий.

В настоящее время существуют различные виды нейтронных генераторов (см., например, [27]). Большая часть этих приборов разработана во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л.Духова (ВНИИА). ВНИИА в свое время был выбран в качестве основного подрядчика для разработки импульсного нейтронного генератора для проведения космического эксперимента ДАН на поверхности Марса. В этом эксперименте генератор в импульсном режиме облучает поверхность Марса потоками быстрых нейтронов, а блок детекторов после каждого нейтронного импульса регистрирует временной профиль нейтронного альbedo [12–15]. До летного образца ВНИИА доработал промышленный каротажный генератор ИНГ-101 на вакуумной нейтронной трубке. Особенность генераторов этого типа (на вакуумных трубках с искровым источником ионов) состоит в том, что они производят очень короткие (1–2 мкс) и мощные ($> 10^7$ нейтронов за импульс) импульсы нейтронов. Это во многом достигается за счет использования источника дейтронов, образующихся в дуговом разряде в вакууме. Для этого применяется трехэлектродный источник дейтронов, состоящий из управляющего электрода, катода и анода. При подаче импульса напряжения на управляющий электрод с амплитудой в несколько киловольт развивается разряд и происходит локальный разогрев катода с образованием катодного пятна, из которого десорбируется дейтерий [27]. К недостаткам такого типа нейтронных трубок относятся нестабильность нейтронного выхода (как от импульса к импульсу, так и его быстрое падение в ходе эксплуатации), небольшая частота генерации нейтронных импульсов (10–20 Гц) и меньший срок службы (количество часов непрерывной работы и время хранения в выключенном состоянии). Достоинствами такого генератора являются компактное исполнение, малое энергопотребление и адаптация к жестким требованиям космического эксперимента. Летный образец генератора на вакуумной трубке, созданный ВНИИА для прибора ДАН, успешно работает на поверхности Марса уже более 4 лет (с середины августа 2012 г.), а его нейтронный выход за время работы упал в 5–8 раз (до $2 \cdot 10^6$ нейтронов за импульс). В настоящей работе использовался запасной образец нейтронного генератора, абсолютно идентичный летному образцу.

Другой тип импульсных нейтронных генераторов основан на использовании газонаполненных трубок и в принципе имеет преимущества для нейтронно-индуцированного анализа. Нейтронная трубка такого типа, как правило, состоит из ионного источника Пеннинга с термокатодом, ионно-оптической системы, генератора рабочего газа (смесь газообразных дейтерия и трития) и газопоглотителя. При пропускании электрического тока термокатод ионного источника излучает термоэлектроны, которые управляются (двигаются по спиралеобразным траекториям) модуляционными электрическими импульсами и магнитным полем. Электроны, взаимодействуя с рабочим газом, ионизируют его, обеспечивая возникновение ионов трития и дейтерия, а термогазопоглотитель обеспечивает поглощение выделяемых при работе трубки остаточных газов [27]. На мишень прикладывается относительно корпуса отрицательное напряжение 100 кВ. Часть

ионизированных атомов газа через отверстие в катоде ускоряется и попадает на мишень. В результате нейтронный генератор может излучать импульсами с частотой до нескольких кГц поток нейтронов с выходом порядка 10^8-10^9 с^{-1} . К преимуществам данного типа нейтронных генераторов можно отнести большую длительность нейтронного импульса (до сотен микросекунд), что позволяет регистрировать: гамма-линии от неупругого рассеяния нейтронов (что невозможно для вакуумных трубок); существенно меньшую импульсную загрузку регистрирующей аппаратуры (и, соответственно, меньшее мертвое время); стабильность нейтронного выхода за время эксплуатации; большой срок эксплуатации; возможность гибкой смены параметров генерации нейтронных импульсов (ширина импульса, частота, нейтронный выход). К недостаткам относятся сложность системы, большая масса и энергопотребление (примерно в полтора-два раза больше, чем у генераторов с вакуумными нейтронными трубками) и сложная адаптация к условиям космического эксперимента. Примером данного типа нейтронного генератора, использованного в настоящей работе, является каротажный промышленный газонаполненный нейтронный генератор ИНГ-08, также разработанный во ВНИИА им. Н. Л. Духова.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Генерацию характеристического гамма-излучения в веществе под воздействием облучения нейтронами можно разделить на три категории. Во-первых, это пороговая реакция неупругого рассеяния быстрых нейтронов. Гамма-кванты от неупругого рассеяния регистрируются в очень короткое время в течение и после импульса нейтронов, поскольку нейтроны с такой энергией либо мгновенно улетают из близлежащего объема грунта, либо быстро сбрасывают энергию ниже порога реакции.

Вторая категория — это беспороговая реакция радиационного захвата нейтронов с сечением обратно пропорциональным скорости нейтрона. Регистрация гамма-квантов из реакции радиационного захвата происходит в течение существенно большего интервала времени после импульса нейтронов (до 1–2 мс), поскольку процесс замедления нейтронов в среде имеет многоступенчатый характер. В конечном счете тепловые нейтроны либо захватываются, либо диффундируют за пределы близлежащего объема грунта и процесс затухает. Из-за диффузии тепловых нейтронов гамма-кванты из реакций радиационного захвата могут приходиться с большей глубины грунта, чем кванты из реакций неупругого рассеяния. Возврат возбужденного ядра в основное состояние после захвата нейтрона происходит практически мгновенно (обычно за $10^{-12}-10^{-17} \text{ с}$). В редких случаях может образовываться метастабильное состояние ядра с достаточно большим временем жизни (10^{-6} и более секунд).

Третья категория включает пороговые реакции активации, в процессе которых возникают радиоактивные ядра, испускающие задержанное излучение. Как правило, это реакции (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$ и т. д.), имеющие период полураспада, варьирующийся в широком временном интервале. Продукты реакций образуются в возбужденном состоянии, которое затем снимается излучением характеристического гамма-кванта. Это означает, что активационные гамма-кванты регистрируются после квантов из реакций неупругого рассеяния и радиационного захвата и интенсивность этих линий снижается с течением времени в соответствии с периодом полураспада данного радионуклида.

Если гамма-спектрометр обладает достаточно высоким временным разрешением (быстрым детектором и малым временем регистрации события порядка 1 мкс), то указанные категории гамма-квантов можно отделить друг от друга, синхронизируя накопление гамма-спектра с моментом излучения нейтронного импульса. Это позволит повысить достоверность идентификации гамма-линий в измеренном аппаратурном спектре. На масштабе времен, сопоставимых с длительностью нейтронного импульса, можно наблюдать преимущественно неупругие реакции, так как здесь доминируют быстрые нейтроны. Однако при коротком импульсе генератора длительностью в несколько микросекунд с выходом нейтронов $\sim 10^7 \text{ с}^{-1}$ невозможно набрать аппаратурный спектр от гамма-квантов из реакции неупругого рассеяния из-за больших просчетов и наложений импульсов. В случае газонаполненного нейтронного генератора с длительностью импульса до нескольких сотен микросекунд это измерение можно осуществить, поскольку выход нейтронов за время импульса не превышает 10^4 – 10^5 . Набор спектра гамма-линий от реакций захвата происходит во временном окне, открывающемся спустя несколько сотен микросекунд после момента генерации нейтронного импульса и длящемся до 1–2 мс. Здесь также определенное преимущество имеет генератор на газонаполненной трубке, так как он создает меньшие мгновенные загрузки спектрометра.

Для сепарации активационных гамма-линий некоторые преимущества имеет вакуумный генератор. Низкая частота генерации нейтронных импульсов (около 10 Гц) и, соответственно, большой интервал между импульсами позволяют выделить большее временное окно (от единиц до сотен миллисекунд), где доминируют гамма-кванты из реакций активации и кванты естественного радиационного фона.

В ходе тестирования были опробованы разные режимы совместной работы нейтронных генераторов и спектрометра. В общей сложности длительность работы газонаполненного генератора во время одного зачетного измерения составляла от 15 до 30 мин, а нейтронного генератора с вакуумной трубкой — от 30 мин до 1 ч, поскольку последний имел меньший выход нейтронов. Нейтронный поток в ходе всех измерений мониторировался с помощью расположенного внутри ангара нейтронного детектора системы радиационного контроля стенда — датчика УДБН-01-03 производства ЗАО «Аспект» (Дубна) с блоком детектирования нейтронов типа БДН-01 на основе коронного счетчика медленных нейтронов в полиэтиленовом замедлителе. При работе с генераторами набиралась как интегральные гамма-спектры за весь период измерений, так и гамма-спектры в различных временных окнах между нейтронными импульсами.

Расстояние между детектором и нейтронным генератором составляло примерно 1 м (предельное расстояние, которое возможно на стационарных посадочных платформах или больших марсоходах и луноходах), чтобы максимально снизить загрузку детектора прямым нейтронным излучением. Для снижения загрузки детектора низкоэнергетичными гамма-квантами полупроводниковый детектор был закрыт кожухом из свинца с толщиной стенок 2 мм.

На рис. 2–4 представлены интегральные спектры, измеренные HPGe-спектрометром в разных энергетических диапазонах, при облучении модели планетного вещества двумя типами нейтронных генераторов. На рисунках хорошо видно, что при облучении модели грунта газонаполненным генератором в аппаратурном спектре наблюдается гораздо больше гамма-линий, чем в спектре, полученном от нейтронного генератора с вакуумной трубкой. В большинстве случаев это либо дополнительные линии от радиационного захвата нейтронов материалом детектора (германием) и конструкционными материалами

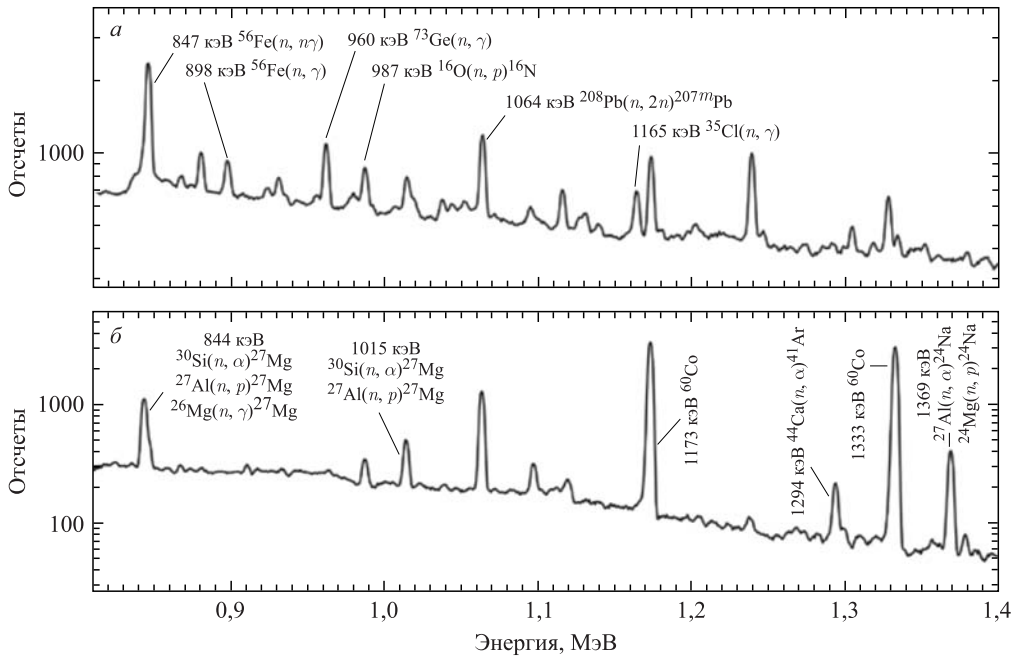


Рис. 2. Интегральные гамма-спектры, измеренные HPGe-спектрометром при работе газонаполненного нейтронного генератора (а) и нейтронного генератора с вакуумной трубкой (б) в диапазоне энергии 0,8–1,4 МэВ

спектрометра, либо линии, образовавшиеся в результате неупругого рассеяния нейтронов. Из таких гамма-линий, связанных с элементарным составом модели грунта, прежде всего можно выделить линии железа с энергией 847 кэВ (ее превышение над фоном составляет около 60 стандартных отклонений) и более слабую линию с энергией 1811 кэВ. В спектре наблюдается также слабая линия с энергией 2211 кэВ, связанная с неупругим рассеянием нейтронов на ядрах алюминия. Наиболее ярким результатом регистрации неупругого рассеяния нейтронов является сильная линия углерода с энергией 4439 кэВ (превышение над фоном составляет около 10 стандартных отклонений). Наличие в спектре последней гамма-линии обусловлено присутствием большого количества полиэтилена, имитирующего слой воды/водяного льда на поверхности грунта. Данная линия и ее сопутствующие линии однократной и двукратной утечки хорошо видны в спектре, набранном при работе газонаполненного генератора, и полностью отсутствуют в спектре, полученном от нейтронного генератора с вакуумной трубкой. Линии 847 и 1811 кэВ можно идентифицировать и в гамма-спектре от нейтронного генератора с вакуумной трубкой, но там они имеют другую природу и связаны с активацией железа быстрыми нейтронами.

В спектре, набранном при работе генератора с газонаполненной трубкой, наблюдается большое количество гамма-линий, связанных с радиационным захватом нейтронов ядрами элементов модели планетного вещества. Хорошо идентифицируются линии железа с энергиями 898, 7627 и 7642 кэВ, линии хлора с энергиями 1165, 6108, 7410 кэВ и очень сильная линия водорода с энергией 2223 кэВ (обусловлена слоем полиэтилена

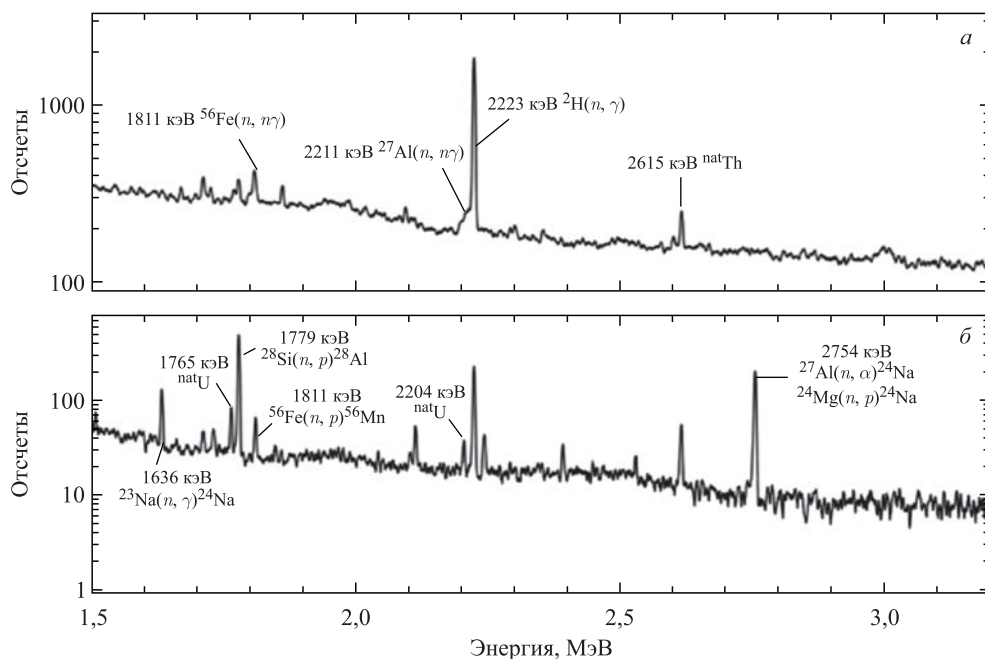


Рис. 3. Интегральные гамма-спектры, измеренные HPGe-спектрометром при работе газонаполненного нейтронного генератора (а) и нейтронного генератора с вакуумной трубкой (б) в диапазоне энергии 1,5–3,2 МэВ

на поверхности модели грунта). В спектре, полученном с нейтронным генератором с вакуумной трубкой, также выделяется сильная линия водорода и несколько слабых линий железа и хлора. В целом можно заключить, что линии от радиационного захвата нейтронов можно регистрировать при облучении планетного вещества нейтронами обоих типов нейтронных генераторов, но лучшая эффективность достигается в случае газонаполненного генератора. Например, линия водорода идентифицируется на уровне более 120 стандартных отклонений над фоном при газонаполненном генераторе и менее 40 стандартных отклонений при генераторе с вакуумной нейтронной трубкой. Основная причина этого — большие просчеты спектрометра при генерации коротких и интенсивных нейтронных импульсов.

Третья категория гамма-линий — активационные линии от радионуклидов, образовавшихся в модели грунта в реакциях с нейтронами. К таким линиям относятся: линия алюминия с энергией 843 кэВ (реакция $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$), линии кислорода с энергиями 987, 6130, 7116 кэВ (реакция $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$), линии железа с энергиями 847, 1811 и 2114 кэВ (реакция $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$), линия кремния с энергией 1779 кэВ (реакция $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$), линии алюминия и магния с энергиями 1369 и 2754 кэВ (реакции $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$), линия кальция с энергией 1294 кэВ (реакция $^{44}\text{Ca}(n, \alpha)^{41}\text{Ar}$). Лучше всего все эти линии видны в спектре при работе нейтронного генератора с вакуумной трубкой (почти все с превышением 3–5 стандартных отклонений над фоном) и гораздо хуже проявляются в спектре, набранном с газонаполненным генератором. Это связано с меньшим временем набора этих линий при работе с газонаполненным генератором.

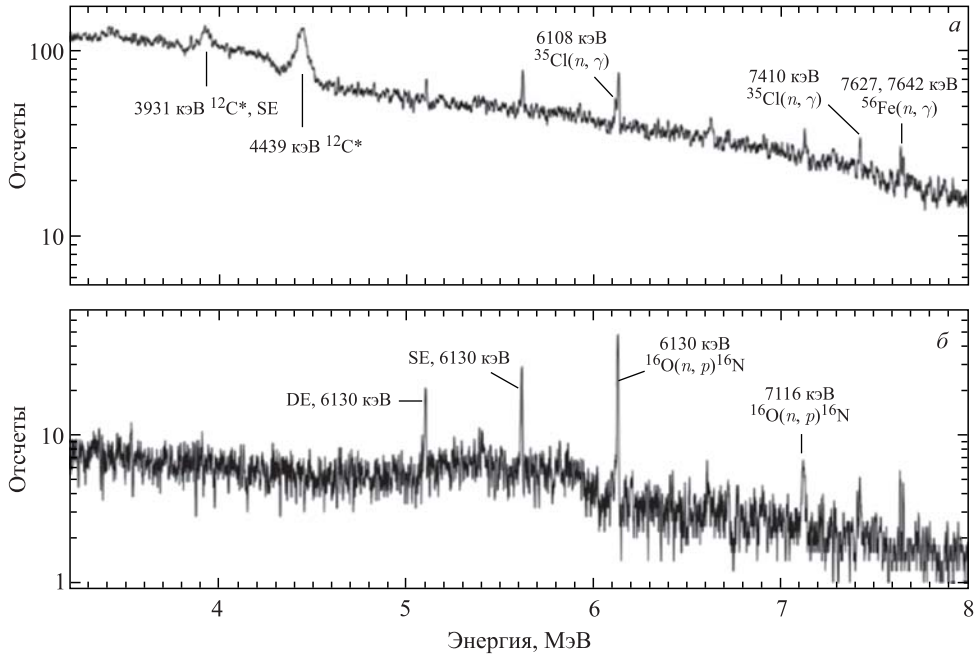


Рис. 4. Интегральные гамма-спектры, измеренные HPGe-спектрометром при работе газонаполненного нейтронного генератора (а) и нейтронного генератора с вакуумной трубкой (б) в диапазоне энергии 3,2–8 МэВ

В целом по активационным гамма-линиям также можно судить об элементном составе грунта (за исключением хлора, у которого нет сильных активационных линий), но для этого требуется длительная активация, а затем длительный период наблюдений за распадающимися нуклидами.

Последняя категория — линии, образованные при распаде естественных радионуклидов, таких как калий, торий и уран. Лучшие условия для их наблюдения достигаются во время фоновых измерений, когда искусственный источник ионизирующего излучения не используется (нейтронный генератор выключен). Во время длительных измерений с нейтронными генераторами эти линии также проявляются в спектре.

Дополнительно были выполнены исследования результатов прямой засветки детектора спектрометра нейтронами из генератора с вакуумной нейтронной трубкой. Эти исследования были обусловлены снижением эффективности регистрации гамма-квантов из реакций радиационного захвата при работе с нейтронным генератором с вакуумной трубкой в сравнении с газонаполненным генератором. Измерения гамма-спектров были проведены во временном окне 50–10000 мкс со свинцовой защитой детектора толщиной 2 мм и без нее при одной и той же экспозиции. В качестве тестового параметра использовалось детектирование захватной линии водорода с энергией 2223 кэВ. Результаты представлены на рис. 5. Можно достоверно констатировать существенное падение темпа счета (из-за увеличившегося мертвого времени) и подавление линий водорода (2223 кэВ) и натрия (1636 кэВ) при отсутствии свинцовой защиты детектора. Это означает, что из регистрируемого спектра с увеличением загрузки спектрометра исчезают гамма-линии,

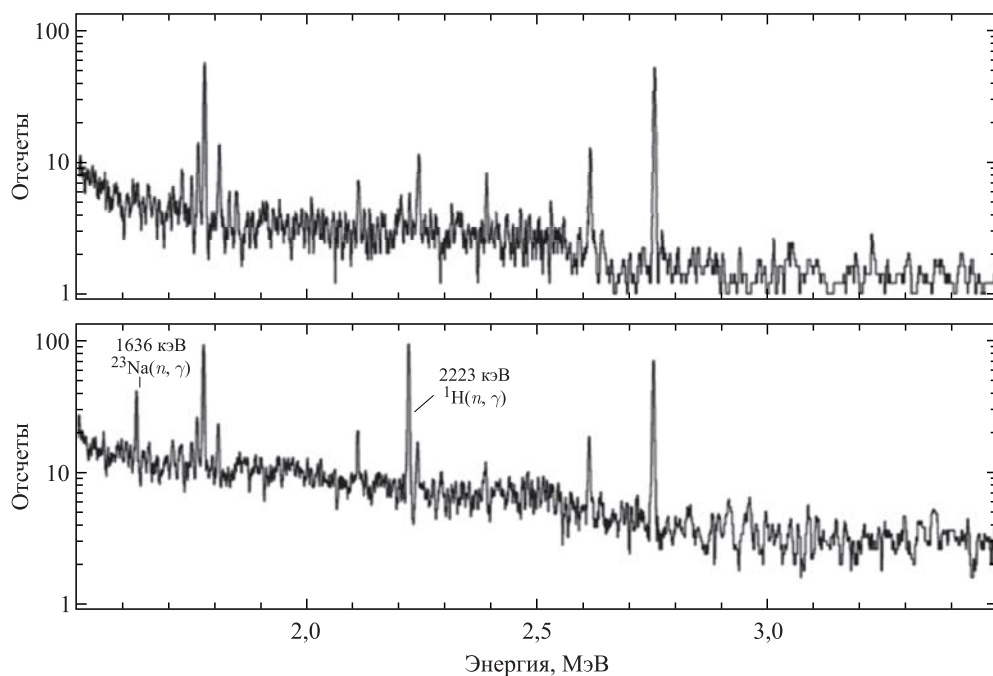


Рис. 5. Гамма-спектры, измеренные HPGe-спектрометром при работе нейтронного генератора с вакуумной трубкой во временных окнах 50–10000 мкс после каждого нейтронного импульса без (а) и со (б) свинцовым защитным кожухом вокруг германиевого гамма-детектора

которые регистрируются в течение короткого временного интервала после нейтронного импульса (от десятков до сотен микросекунд), и остаются только активационные гамма-линии, детектируемые в гораздо большем интервале времени (от долей секунд до часов). Таким образом, несмотря на увеличение массы прибора, применение свинцовой защиты детектора целесообразно с точки зрения увеличения информативности гамма-спектра при работе спектрометра даже со слабым нейтронным генератором (выход нейтронов менее $(2-3) \cdot 10^6$ в импульсе), находящимся на большом (по меркам размера космического аппарата) расстоянии (~ 1 м).

ВЫВОДЫ

Проведенные сравнительные исследования показали, что при работе HPGe-спектрометра с нейтронным генератором, с точки зрения повышения информативности измерений и достоверности идентификации элементов в планетарном грунте, преимущество имеет газонаполненный генератор нейтронов, который позволяет регистрировать также гамма-линии, связанные с реакциями неупругого рассеяния, обеспечивая при этом более равномерную загрузку детектора (уменьшение просчетов). В силу этого наиболее перспективным для будущих космических миссий является прибор, объединяющий в себе германиевый гамма-спектрометр и газонаполненный генератор нейтронов. В настоящее время в летном исполнении имеется только нейтронный генератор с вакуумной ней-

тронной трубкой. К тому же он имеет ряд преимуществ по инженерным параметрам в сравнении с газонаполненным генератором: меньшую массу, меньшее энергопотребление и большую надежность в условиях космического эксперимента. Поэтому исполнение нейтронного генератора газонаполненного типа в варианте, пригодном для космических экспериментов, является весьма актуальной и важной задачей.

При использовании в приборе генератора с вакуумной нейтронной трубкой основная информация об элементном составе грунта будет получена по активационным гамма-линиям радионуклидов, образовавшихся в грунте под действием быстрых нейтронов.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (грант РФФИ № 14-22-00249) при проведении экспериментальных измерений с гамма-детектором на основе высокочистого германия и нейтронными генераторами различного типа на моделях-аналогах планетного вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boynton W. V. et al.* The Mars Odyssey Gamma-Ray Spectrometer Instrument Suite // *Space Sci. Rev.* 2004. V. 110. P. 37–83.
2. *Boynton W. V. et al.* Concentration of H, Si, Cl, K, Fe, and Th in the Low- and Mid-Latitude Regions of Mars // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. E12S99; doi:10.1029/2007JE002887.
3. *Goldsten J. O. et al.* The MESSENGER Gamma-Ray and Neutron Spectrometer // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 131. P. 339–391.
4. *Evans L. G. et al.* Major-Element Abundances on the Surface of Mercury: Results from the MESSENGER Gamma-Ray Spectrometer // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. E00L07; doi:10.1029/2012JE004178.
5. *Hasebe N. et al.* High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer on Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA) // *Transactions of Space Technol. Japan*, 2010. V. 7. P. Pk₃₅–Pk₄₁.
6. *Prettyman T. H. et al.* Elemental Composition of the Lunar Surface: Analysis of Gamma Ray Spectroscopy Data from Lunar Prospector // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, Iss. E12. CitelD E12007.
7. *Mitrofanov I. G. et al.* The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) on Board the Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission // *Planetary and Space Science*. 2010. V. 58. P. 116–124.
8. *Lawrence D. J. et al.* Improved Modeling of Lunar Prospector Neutron Spectrometer Data: Implications for Hydrogen Deposits at the Lunar Poles // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. E08001; doi:10.1029/2005JE002637.
9. *Lawrence D. J. et al.* Evidence for Water Ice near Mercury's North Pole from MESSENGER Neutron Spectrometer Measurements // *Science*. 2013. V. 339. P. 292.
10. *Mitrofanov I. G. et al.* Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297. P. 78–81.
11. *Arnold J. R. et al.* Gamma Rays in Space, Ranger 3 // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67. P. 4878–4880.
12. *Litvak M. L. et al.* The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8, No. 3. P. 605–612.
13. *Mitrofanov I. G. et al.* Experiment for Measurements of Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170, No. 1–4. P. 559–582.

14. *Litvak M. L. et al.* Local Variations of Bulk Hydrogen and Chlorine Content Measured at the Contact between the Sheepbed and Gillespie Lake Units in Yellowknife Bay, Gale Crater, Using the DAN Instrument Onboard Curiosity // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119, No. 6. P. 1259–1275.
15. *Mitrofanov I. G. et al.* Water and Chlorine Content in the Martian Soil along the First 1900 m of the Curiosity Rover Traverse as Estimated by the DAN Instrument // *Ibid.* No. 7. P. 1579–1596.
16. *Mitrofanov I. G., Jun I.* Neutron-Activated Gamma Ray Spectrometer (NAGRS) for the Venus Surface and Atmosphere Geochemical Explorer (SAGE) Mission // *Eur. Planetary Sci. Congress, Rome, Sept. 20–24, 2010.* P. 264.
17. *Parsons A. et al.* Active Neutron and Gamma-Ray Instrumentation for *In Situ* Planetary Science Applications // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 652, No. 1. P. 674–679.
18. *Golovin D. V. et al.* 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.
19. *Jun I. et al.* A Study of Venus Surface Elemental Composition from 14 MeV Neutron Induced Gamma Ray Spectroscopy: Activation Analysis // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. V. 629. P. 140.
20. *Nikiforov S. U. et al.* Subsurface Water Observations on Mars: From DAN/Curiosity to Adron-RM/ExoMars // 40th COSPAR Sci. Assembly, Moscow, Aug. 2–10, 2014. Abstract B0.2-37-14.
21. *Вострухин А. А. и др.* Экспериментальный стенд для испытания приборов ядерной планетологии // *Письма в ЭЧАЯ.* 2016. Т. 13, № 2(200). С. 354–367.
22. *Litvak M. L. et al.* Ground Tests with Active Neutron Instrumentation for the Planetary Science Missions // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2015. V. 788. P. 194–202.
23. *Litvak M. L. et al.* Implementation of Gamma-Ray Instrumentation for Solid Solar System Bodies Using Neutron Activation Method // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 822. P. 112–124; 10.1016/j.nima.2016.03.087.
24. *Kozyrev A. S. et al.* A Comparative Study of $\text{LaBr}_3(\text{Ce}^{3+})$ and CeBr_3 Based Gamma-Ray Spectrometers for Planetary Remote Sensing Application // *Rev. Sci. Instr.* 2016. V. 87. P. 085112; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4958897>.
25. *Sanin A. B. et al.* Data Processing of the Active Neutron Experiment DAN for a Martian Regolith Investigation // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2015. V. 789. P. 114–127; doi:10.1016/j.nima.2015.03.085.
26. *Литвак М.Л. и др.* Наземные испытания научных приборов ядерной планетологии на экспериментальном стенде в ОИЯИ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2016. Т. 13, № 2(200). С. 368–381.
27. *Кирьянов Г.И.* Генераторы быстрых нейтронов. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Получено 23 сентября 2016 г.