

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЯДЕРНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ

© 2017 г. А. А. Вострухин<sup>1)\*</sup>, Д. В. Головин<sup>1)</sup>, П. В. Дубасов<sup>2)</sup>,  
А. О. Зонтиков<sup>2)</sup>, А. С. Козырев<sup>1)</sup>, А. Р. Крылов<sup>2)</sup>, В. А. Крылов<sup>2)</sup>,  
М. Л. Литвак<sup>1)</sup>, И. Г. Митрофанов<sup>1)</sup>, М. И. Мокроусов<sup>1)</sup>, А. Н. Репкин<sup>2)</sup>,  
Г. Н. Тимошенко<sup>2),3)</sup>, К. В. Удовиченко<sup>2)</sup>, В. Н. Швецов<sup>2)</sup>

Поступила в редакцию 12.10.2016 г.

Представлено описание экспериментальной лабораторной установки, объединяющей в себе различные типы гамма-спектрометров и нейтронных генераторов и предназначенной для работы на экспериментальном стенде ядерной планетологии, созданном в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия) для физических калибровок активных гамма- и нейтронных спектрометров.

DOI: 10.7868/S0044002717030254

### 1. АКТИВНАЯ ГАММА- И НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ПЛАНЕТ

Одной из задач при изучении планет и малых тел Солнечной системы является определение состава вещества поверхности. Базовым методом исследования элементного состава грунта является гамма-спектроскопия, см., например, [1–5]. Данный способ позволяет определить состав вещества поверхности небесного тела как с орбиты (при условии отсутствия атмосферы или ее достаточной “прозрачности”), так и с поверхности планеты. Спектр гамма-квантов из грунта определяется содержащимися в нем естественными радионуклидами и квантами, рождающимися в грунте при взаимодействии с ним космической радиации (в первую очередь, частиц галактического космического излучения (ГКИ)). Для посадочных аппаратов (роверов) возможно использование нового для космических применений метода зондирования грунта, когда грунт облучается энергетичными нейтронами из генератора, смонтированного на ровере. Данный метод позволяет значительно увеличить производительность измерений и сократить время экспозиции, необходимое для определения основных породообразующих элементов в грунте, поскольку

плотность потока нейтронов из генератора в близлежащих к аппарату слоях грунта много больше плотности потока ГКИ. В настоящей работе метод стимулированной гамма-спектроскопии грунта с применением импульсного источника нейтронов (генератора) называется активным, в отличие от пассивного метода с измерением естественного гамма-фона грунта.

В настоящее время в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) ведется разработка ряда перспективных космических приборов для изучения элементного состава поверхности космических тел методами активной гамма- и нейтронной спектроскопии, например активного гамма- и нейтронного спектрометра АДРОН-ЛР для российских лунных посадочных миссий “Луна-Глоб” и “Луна-Ресурс”, его уменьшенного аналога АДРОН-ЭМ для совместной европейско-российской марсианской миссии “ЭкзоМарс-2020”, а также компактного активного гамма-спектрометра для будущих венерианских миссий [6]. Данные представленной работы основаны на опыте, полученном при разработке активного нейтронного спектрометра ДАН (динамическое альbedo нейтронов) для марсохода NASA Curiosity (запуск которого состоялся в 2011 г., а посадка на поверхность Марса — в 2012 г.) и пассивного меркурианского орбитального гамма- и нейтронного спектрометра (МГНС) для европейского орбитального аппарата VeriColombo, запуск которого запланирован на 2018 г. [7–10].

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

<sup>2)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

<sup>3)</sup>Государственный университет “Дубна”, Дубна, Россия.

\*E-mail: [vostrukhin@np.cosmos.ru](mailto:vostrukhin@np.cosmos.ru)

Прибор ДАН предназначен для определения содержания и распределения по глубине связанной воды в приповерхностном грунте на пути следования марсохода. Прибор состоит из блоков импульсного нейтронного генератора (ДАН-ИНГ) и блока детекторов и электроники (ДАН-ДЭ). Блок ДАН-ИНГ (ИНГ-10К) был разработан во ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова и имеет следующие характеристики:

- энергия нейтронов 14 МэВ (реакция D–T);
- длительность нейтронных импульсов <2 мкс;
- выход нейтронов в импульсе не менее  $10^7$ ;
- максимальная частота работы 10 Гц.

Блок ДАН-ДЭ был разработан в ИКИ РАН и содержит два пропорциональных счетчика нейтронов на основе  $^3\text{He}$ , один из которых закрыт кадмиевым чехлом и, таким образом, регистрирует только эпитепловые нейтроны с энергией более 0.4 эВ. Второй счетчик покрыт тонким свинцовым экраном (защита от засветки рентгеновским излучением от блока ДАН-ИНГ) и регистрирует все нейтроны. Измеряется процесс затухания выхода альбедных тепловых и эпитепловых нейтронов из грунта, позволяющий судить о содержании в приповерхностном слое грунта водорода (воды/льда). Таким образом, в приборе ДАН впервые в мире реализован метод активной нейтронной спектроскопии для изучения поверхности планеты с использованием импульсного нейтронного генератора.

Прибор МГНС предназначен для орбитального картографирования потока альбедных нейтронов и гамма-излучения с поверхности Меркурия для поиска залежей водяного льда в постоянно затененных полярных кратерах и определения элементного состава вещества планеты. Для этого прибор содержит следующий набор детекторов:

гамма-спектрометр на основе сцинтилляционного кристалла  $\text{CeBr}_3$  для регистрации гамма-квантов с энергетической шкалой 200 кэВ–10 МэВ;

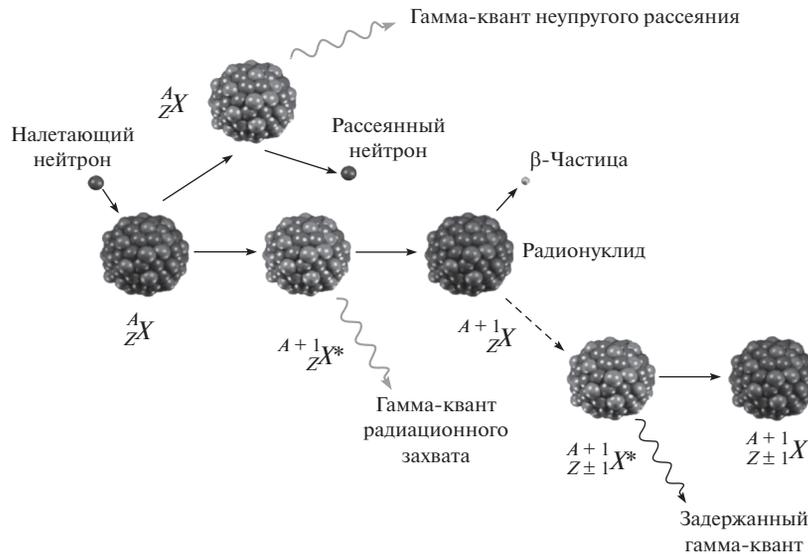
три газонаполненных  $^3\text{He}$ -детектора – неэкранированный, экранированный кадмиевой фольгой толщиной 1 мм (для регистрации нейтронов с энергией 0.4 эВ–1 кэВ) и экранированный кадмиевой фольгой толщиной 1 мм и полиэтиленом (для регистрации нейтронов с энергией 0.1–500 кэВ);

однокристалльный стильбеновый спектрометр со схемой  $n-\gamma$ -разделения для регистрации нейтронов с энергиями выше 500 кэВ, детектор которого окружен охранным пластическим сцинтиллятором. Датчик охранный сцинтиллятора включен на антисовпадения со стильбеновым датчиком для запрета регистрации заряженных частиц.

Для будущих посадочных аппаратов одним из логических продолжений накопленного опыта является развитие методики нейтронно-индуцированной гамма-спектроскопии, в рамках которой предполагается создание прибора, использующего возможности гамма-детектора на основе кристалла  $\text{CeBr}_3$  для измерения гамма-излучения поверхности от высокоэнергетичных нейтронов. Таким прибором является разрабатываемый в ИКИ РАН прибор АДРОН-ЛР, предназначенный для российских космических проектов “Луна-Глоб” и “Луна-Ресурс” в соответствии с государственными контрактами между ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина” и Федеральным космическим агентством. Запуски аппаратов запланированы в 2019 и 2021 гг. Прибор АДРОН-ЛР создается для определения содержания основных породообразующих элементов лунного грунта (Si, Al, O, Mg, Na, Fe, Ti, K, H), а также для изучения слоистой структуры лунного грунта на глубине до 1 м в районе посадки космического аппарата [6, 11].

Аппаратура АДРОН-ЛР предназначена для работы в активном и пассивном режимах. В активном режиме (основной режим работы) блок нейтронного генератора импульсно излучает нейтроны с энергиями 14 МэВ (в каждом импульсе продолжительностью до 2 мкс испускается около  $10^7$  нейтронов). Значительная часть этих нейтронов (около 30–40%) проникает в вещество Луны в непосредственной близости от космического аппарата (КА) на глубину около 1 м. Эти нейтроны взаимодействуют с ядрами грунта по различным каналам ядерных реакций, в результате чего их энергия и скорость снижаются, стремясь в конечном счете к тепловому равновесию со средой. Для быстрых нейтронов превалирующим каналом является неупругое рассеяние, а по мере их замедления возрастает роль реакций захвата. В результате ядерных реакций ядра вещества грунта переходят в возбужденное состояние, которое практически мгновенно снимается испусканием характеристического гамма-кванта (рис. 1). В результате ядерной реакции может образоваться и нестабильный изотоп, при распаде которого также испускаются характеристические гамма-кванты. Регистрация гамма-спектрометром пиков полного поглощения характеристических гамма-квантов (спектральных линий) из грунта позволяет идентифицировать элементы вещества и оценить их количество в приповерхностном слое грунта.

Преимуществом использования импульсного нейтронного генератора для стимулирования альбедного гамма-излучения грунта является возможность регистрации спектрометром гамма-квантов в различных временных интервалах после нейтронного импульса. Таким образом, появляется



**Рис. 1.** Физическая схема, иллюстрирующая нейтронное зондирование вещества для определения его состава методом гамма-спектроскопии.

возможность разделять гамма-линии по типам реакций: от неупругого рассеяния быстрого нейтрона и от захвата теплового нейтрона, поскольку эти реакции имеют разные характерные времена протекания. Это повышает информативность гамма-спектроскопии и достоверность расшифровки набранных аппаратурных спектров.

Часть замедлившихся тепловых и эпитепловых нейтронов выходит из грунта, создавая нейтронное альbedo поверхности. Соотношение потоков альбедных тепловых и эпитепловых нейтронов заметно зависит от содержания в грунте водорода — наиболее эффективного замедлителя нейтронов. Чем больше в веществе водорода, тем меньше в потоке альбедных нейтронов эпитепловых нейтронов и тем больше в нем тепловых нейтронов. Использование пары детекторов медленных нейтронов, один из которых покрыт слоем материала с большим сечением поглощения тепловых нейтронов (например, кадмия), является простым и надежным методом оценки содержания в веществе водорода в форме связанной или свободной воды/водяного льда по соотношению показаний детекторов. Импульсный характер нейтронного облучения грунта делает возможным использование еще одного способа оценки содержания в нем водорода, а именно по форме кривой затухания потока альбедных нейтронов в промежутках между короткими импульсами нейтронов генератора. Наличие в грунте большого количества тепловых нейтронов затягивает процесс их диффузии, и альбедные тепловые нейтроны достигают поверхности с глубины около 1 м в течение длительного времени (до 1 мс). Если же тепловых нейтронов сравнительно мало, то поток

альбедных нейтронов затухает быстрее. Необходимо, однако, заметить, что слоистость залегания водорода в грунте и присутствие в нем элементов с большим сечением поглощения медленных нейтронов (хлора, железа и др.) существенно влияют на профиль временного распределения потока альбедных нейтронов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ОИЯИ

При разработке космических приборов используется как математическое моделирование эксперимента, так и физические калибровки для определения реальных характеристик прибора и проверки математических моделей. Причем физические испытания начинаются уже на этапе первых прототипов и лабораторных образцов, чтобы проверить концепцию прибора в целом или работу отдельных элементов его конструкции и сопоставить первые измерения с результатами расчетов. В рамках работ по тематике ядерной планетологии, осуществляемых по гранту РНФ, в Объединенном институте ядерных исследований был создан специальный стенд для проведения калибровок и физических измерений разработанных ранее и новых перспективных приборов по изучению состава поверхности небесных тел.

Созданный стенд представляет собой отдельно стоящее легкое помещение, в котором размещена модель планетарного грунта, и окружающую его зону радиационного контроля. В настоящий момент используется мишень-аналог элементного состава усредненного грунта Марса. Основой модели грунта является массив из листового силикатного стекла толщиной 10 мм, имитирующий основное

породообразующее вещество — диоксид кремния. Листы стекла перемежаются с листами стали, алюминиевого сплава и поливинилхлорида, чтобы соответствовать содержанию железа, алюминия, магния и хлора в марсианском грунте. Такая гетерогенная модель имитирует абсолютно сухой марсианский грунт. В экспериментах, моделирующих наличие воды/льда в грунте, используются листы полиэтилена, которые могут помещаться внутри мишени на различной глубине.

Высота модели грунта может меняться от эксперимента к эксперименту и составляет около одного метра, что диктуется глубиной проникновения в нее нейтронов от генератора (важно, чтобы в экспериментах не чувствовалась земная почва под моделью). Размер модели составляет  $3.8 \times 3.5$  м, что примерно соответствует размеру области эффективной регистрации альбедных нейтронов приборами при их размещении на посадочных аппаратах. Общий вес модели достигает 35 т. Стенд оборудован средствами радиационного контроля и блокировки работы нейтронного генератора и сертифицирован как радиационный источник. Более подробное описание стенда представлено в работе [12].

При проведении работ и калибровок по созданным приборам стенд уже зарекомендовал себя с положительной стороны, однако для экспериментов по проработке будущих проектов, а также оптимизации параметров работы будущих активных гамма- и нейтронных спектрометров было решено создать дополнительную лабораторную установку для активной нейтронной и гамма-спектроскопии, возможности которой превосходят возможности имеющихся приборов, позволяя одновременно работать с различными типами детекторов и нейтронных генераторов.

В первых приборах с нейтронным генератором использовался нейтронный генератор с вакуумной трубкой типа ИНГ-10К, разработанный во ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова. Такой генератор работает в настоящее время на Марсе в составе российского прибора ДАН на борту ровера Curiosity. Однако значительный интерес для целей космических исследований представляет также другой тип импульсного нейтронного генератора, а именно газонаполненный генератор ИНГ-08. Его отличительной чертой является иная форма нейтронного импульса — длительность импульса может составлять до 200 мкс при частоте 600 Гц, а интегральный выход нейтронов в секунду соответствует вакуумному генератору ИНГ-10К (до  $10^8$  нейтронов/с). Данные особенности позволяют значительно уменьшить мгновенную загрузку детекторов во

время нейтронного импульса и получить дополнительную информацию о составе облучаемого вещества благодаря возможности регистрации гамма-линий из реакций неупругого рассеяния нейтронов. В настоящее время на стенде проводятся интенсивные работы по сравнительному изучению возможностей работы приборов с генераторами обоих типов для целей активной гамма- и нейтронной спектроскопии.

### 3. ОПИСАНИЕ И РАБОТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На основании анализа результатов наземных измерений и измерений на борту космических аппаратов к лабораторной установке для проведения тестовых испытаний на стенде были сформулированы следующие требования по измерениям нейтронного и гамма-излучения:

- регистрация тепловых нейтронов в диапазоне  $<0.4$  эВ;

- регистрация эпитепловых нейтронов в диапазоне  $0.4$ – $500$  эВ;

- регистрация высокоэнергетичных нейтронов в диапазоне  $0.1$ – $15$  МэВ;

- регистрация и спектральный анализ гамма-излучения в диапазоне  $0.1$ – $10$  МэВ;

- регистрация нейтронов и гамма-квантов в условиях высоких загрузок во время и после генерации нейтронного импульса от импульсного нейтронного генератора;

- регистрация нейтронов и гамма-квантов с записью времени прихода с точностью до  $1$  мкс;

- одновременное управление работой нейтронных и гамма-детекторов и импульсного нейтронного генератора на вакуумной трубке (тип ИНГ-10К);

- синхронное управление работой нейтронных и гамма-детекторов и импульсного нейтронного генератора на газонаполненной трубке (тип ИНГ-08);

- синхронизация всех измерений с момента начала генерации нейтронного импульса (от обоих типов нейтронных генераторов);

- блочная архитектура установки с возможностью применения различных типов гамма- и нейтронных детекторов;

- синхронизация работы лабораторной установки с отдельным детектором из высокочистого германия (HPGe) для регистрации гамма-квантов в выбранном временном интервале, отсчитываемом с момента начала генерации нейтронного импульса (от обоих типов нейтронных генераторов);

- удаленное управление установкой для соответствия правилам радиационной безопасности.

Установка состоит из нескольких отдельных частей и допускает различные конфигурации.

Полный состав включает: блок электроники, блок  $^3\text{He}$ -детекторов, нейтронный генератор на вакуумной трубке ИНГ-10К, нейтронный генератор на газонаполненной трубке ИНГ-08, сцинтилляционный спектрометр быстрых нейтронов на основе стильбена с защитным датчиком и схемой  $n-\gamma$ -разделения, сцинтилляционный гамма-спектрометр на основе кристалла  $\text{CeBr}_3$ ,  $\text{HPGe}$ -гамма-спектрометр и управляющий персональный компьютер.

На рис. 2 представлены общий вид установки и поверхность модели марсианского грунта. На рис. 3 показан блок детекторов, собранный в полном объеме: гамма-спектрометры  $\text{CeBr}_3$  и  $\text{HPGe}$ , спектрометр быстрых нейтронов на основе стильбена и гелиевые пропорциональные счетчики тепловых и эпитепловых нейтронов.

Для регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов используются гелиевые пропорциональные счетчики фирмы LND диаметром 0.5 дюйма, размером чувствительной области 6 см и давлением 20 атм. Детектор эпитепловых нейтронов закрыт кадмиевой фольгой для регистрации нейтронов с энергией более 0.4 эВ. Основная задача блока детектирования связана с измерением временного профиля нейтронного альbedo модели грунта, облучаемой быстрыми нейтронами от импульсного нейтронного генератора. При этом используется опыт, полученный при разработке активного нейтронного спектрометра ДАН. Этот прибор был откалиброван в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ [13, 14] и успешно используется в настоящее время для определения содержания воды в марсианском грунте вдоль трассы движения марсохода [15, 16]. Кроме задачи измерения содержания воды, данные по величине потоков тепловых и эпитепловых нейтронов целесообразно использовать при обработке результатов измерений альбедного гамма-излучения, поскольку информация о нейтронном поле внутри грунта полезна при анализе характеристических линий от квантов, возникающих в нем в реакциях неупругого рассеяния, радиационного захвата нейтронов и реакциях активации.

По сравнению с прибором ДАН в лабораторной установке применен более гибкий подход к детектированию времени прихода нейтронов в детектор и увеличен объем регистрируемой информации. Для каждого зарегистрированного нейтрона фиксируются время прихода (отсчитываемое от момента нейтронного импульса), признак и канал амплитудного спектра сработавшего пропорционального счетчика. В зависимости от типа измерений это позволяет подбирать временные интервалы и амплитудные каналы, в которых строится временной профиль нейтронного альbedo. В случае с прибором ДАН эти интервалы были фиксированы.

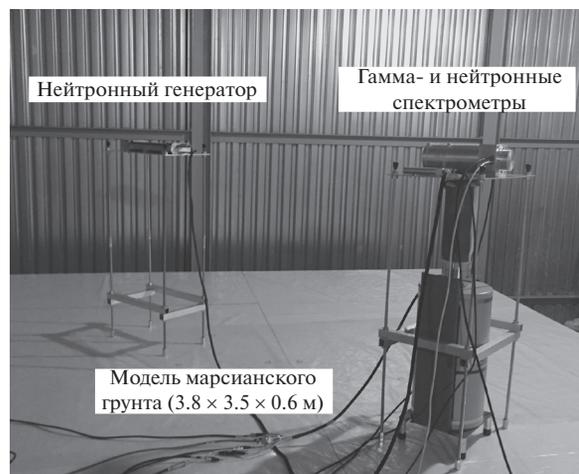


Рис. 2. Размещение экспериментальной установки на поверхности модели марсианского грунта.

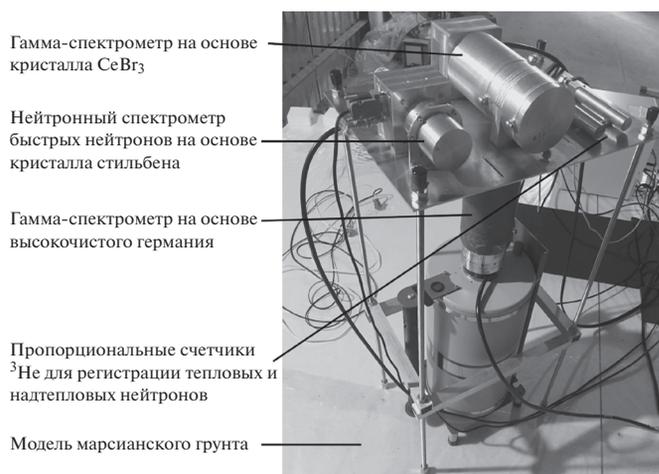
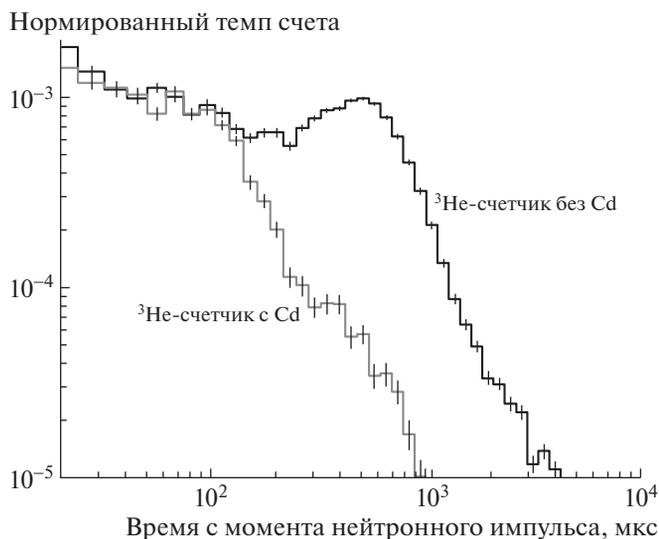
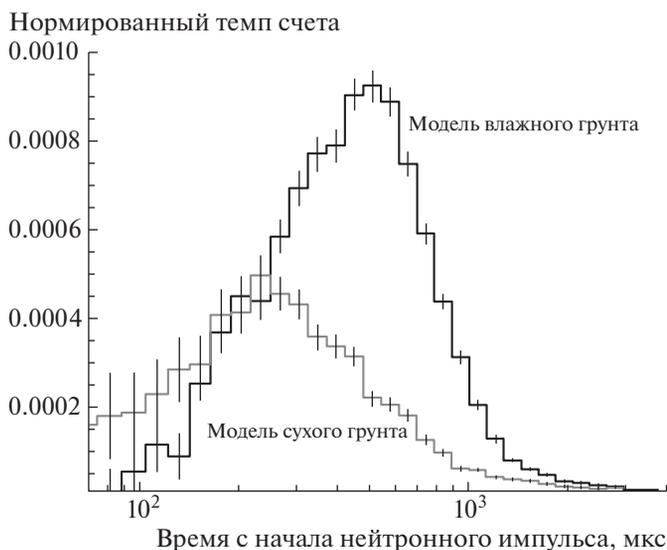


Рис. 3. Конфигурация блока детекторов экспериментальной установки.

На рис. 4 в качестве иллюстрации работы блока пропорциональных счетчиков представлены временные профили нейтронного альbedo, зарегистрированные с помощью пропорциональных счетчиков тепловых и эпитепловых нейтронов. Измерения выполнены на стенде в ОИЯИ для модели марсианского грунта с добавлением тонкого (5 см) слоя полиэтилена, имитирующего слой воды/льда в марсианском грунте на глубине 12 см. Эта модель представляет собой одну из возможных реализаций марсианского грунта на высоких и умеренных широтах, где тонкий слой льда присыпан сверху слоем песка. Максимум во временном распределении нейтронов, измеренных счетчиком без кадмиевой оболочки, соответствует детектированию прихода тепловых нейтронов, образовавшихся в слое полиэтилена. Наиболее ярко пик тепловых нейтронов проявляется при построении распределения разно-



**Рис. 4.** Временные распределения нейтронного альbedo из модели марсианского грунта, измеренные пропорциональными счетчиками в кадмиевом чехле и без него.



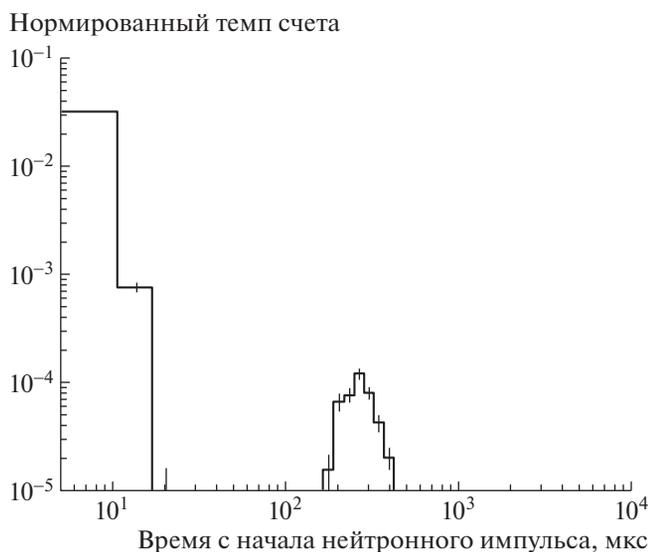
**Рис. 5.** Временные распределения тепловых нейтронов, зарегистрированные для разных моделей грунта. Серая гистограмма — модель сухого грунта, черная — модель грунта, в которой имитировался тонкий слой воды/льда на глубине 12 см.

сти темпов счета двух счетчиков — рис. 5. На этом рисунке показано сравнение временных профилей тепловых нейтронов (разницы темпов счета двух пропорциональных счетчиков), полученных в измерениях с моделью влажного марсианского грунта с добавлением слоя полиэтилена и с моделью сухого грунта без полиэтилена. Видно существенное раз-

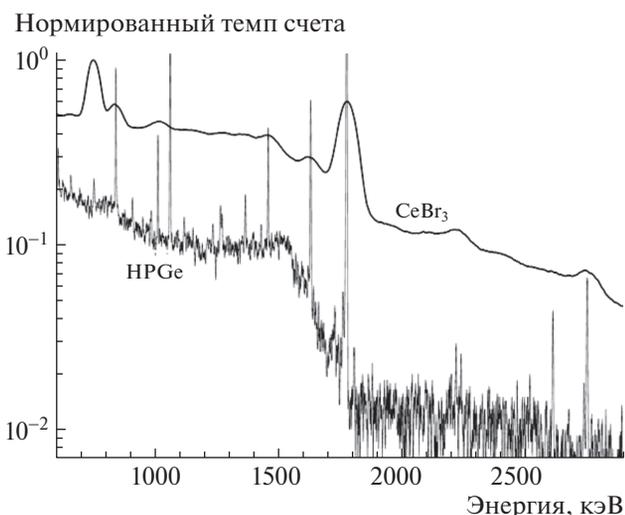
личие в форме и амплитуде временных профилей в зависимости от наличия воды/льда в грунте.

Для регистрации нейтронов высоких энергий в экспериментальной установке используется однокристалльный спектрометр на основе стильбена. Конструкция сцинтилляционного блока идентична конструкции, созданной ранее для прибора МГНС [9, 10]. В состав спектрометра входят: сцинтилляционный датчик с кристаллом стильбена, сцинтилляционный датчик с детектором из пластического сцинтиллятора в форме стакана, окружающего стильбеновый детектор спектрометра для режекции заряженных частиц, электроника предусилителей датчиков, схема  $n-\gamma$ -разделения для спектрометра и схема антисовпадений сигналов спектрометра с сигналами защитного датчика. Данный спектрометр измеряет потоки быстрых нейтронов от нейтронных генераторов и альбедных быстрых нейтронов из верхнего слоя грунта. Это позволяет, во-первых, мониторировать вариации нейтронного выхода генератора от импульса к импульсу, а во-вторых, использовать полученные данные в нейтронно-индуцированной гамма-спектрометрии при идентификации гамма-линий от неупругого рассеяния быстрых нейтронов в грунте с целью определения его элементного состава. Эти функции датчика быстрых нейтронов демонстрирует рисунок 6, на котором показано временное распределение его сигналов с момента импульса нейтронного генератора ИНГ-10К с вакуумной нейтронной трубкой (длительность нейтронного импульса несколько микросекунд). На рисунке хорошо видно разделение событий, связанных с регистрацией нейтронов из генератора (в начале шкалы) и альбедных нейтронов из модели грунта.

Блок детектирования альбедного гамма-излучения, использованный в лабораторной установке, представляет собой сцинтилляционный спектрометр на основе кристалла  $\text{CeBr}_3$  ( $\varnothing 3 \times 3$  дюйма). Конструкция сцинтилляционного блока аналогична блоку прибора МГНС. Энергетическое разрешение кристалла на линии 662 кэВ не более 4.5%, а эффективность регистрации жестких гамма-квантов составляет 20% на энергии 6 МэВ. В отличие от прибора МГНС в блоке реализована также быстрая электроника, позволяющая регистрировать гамма-кванты с высоким временным разрешением. Так же как в нейтронных детекторах, для каждого зарегистрированного гамма-кванта записывается время регистрации, отсчитываемое от момента генерации нейтронного импульса. Данная методика позволяет набирать гамма-спектры в различных временных окнах, синхронизированных с нейтронными импульсами. Таким образом, можно производить селекцию между реакциями неупругого рассеяния (в основном во время нейтронного импульса), реакциями



**Рис. 6.** Временное распределение событий, зарегистрированное датчиком быстрых нейтронов для модели марсианского грунта с использованием нейтронного генератора ИНГ-10К.



**Рис. 7.** Гамма-спектры, измеренные сцинтилляционным спектрометром с  $CeBr_3$  и  $HPGe$ -спектрометром во время облучения модели грунта нейтронным генератором ИНГ-10К.

радиационного захвата тепловых нейтронов (от нескольких сотен до тысячи микросекунд от момента генерации нейтронного импульса) и активационными реакциями (до нескольких часов после окончания нейтронного облучения). Основная задача этого сцинтилляционного блока связана с измерением элементного состава грунта путем регистрации характеристических гамма-квантов, индуцированных реакциями нейтронов с ядрами вещества.

Экспериментальная установка допускает подключение также и переносного  $HPGe$ -гамма-спектрометра для сравнения со сцинтилляционным детектором. Целью такого сравнения является проверка возможностей сцинтилляционного спектрометра с  $CeBr_3$ -детектором для идентификации слабых гамма-линий, поскольку использование полупроводникового спектрометра в космических экспериментах весьма затруднительно. В установке используется гамма-спектрометр фирмы ORTEC с объемом кристалла  $\varnothing 66 \times 89$  мм и спектральным разрешением 2.1 кэВ на энергии 1.33 МэВ и чувствительностью 11% на энергии 6 МэВ. Для работы с ним используется амплитудный анализатор DSPEC 50 (ORTEC), который имеет на входе линейные ворота, позволяющие синхронизировать накопление гамма-спектров с моментом генерации нейтронных импульсов. На германиевый детектор надевался свинцовый кожух толщиной 2 мм для снижения импульсной загрузки спектрометра рентгеновским излучением трубки в момент генерации нейтронного импульса.

Сравнительные возможности распознавания характеристических гамма-линий спектрометрами установки показаны на рис. 7. На спектрах хорошо видны активационные линии алюминия и магния (843 и 1015 кэВ), натрия (1369, 2754, 1636 кэВ), кремния (1779 кэВ), а также гамма-линии естественных изотопов калия (1461 кэВ) и тория (2615 кэВ). Имеются и несовпадающие линии, связанные с реакциями нейтронов в самих детекторах и материалах конструкций (линия 750 кэВ из  $CeBr_3$ -детектора и линия 1068 кэВ из свинцового кожуха  $HPGe$ -детектора). Таким образом, несмотря на огромное различие в энергетическом разрешении, большинство линий надежно идентифицируется сцинтилляционным спектрометром.

Электроника экспериментальной установки реализована на базе стандартного мини-крейта ORTEC со встроенным блоком питания и шестью модулями стандарта NIM. В состав крейта входят:

- сдвоенный источник высокого напряжения для питания ФЭУ сцинтилляционного спектрометра с детектором  $CeBr_3$ ;

- сдвоенный источник высокого напряжения для питания ФЭУ сцинтилляционного детектора на основе стильбена и пропорциональных счетчиков  $^3He$ ;

- формирователь сигналов;

- блок электроники гамма-спектрометра  $CeBr_3$ ;

- блок электроники сцинтилляционного детектора нейтронов и счетчиков  $^3He$ ;

- блок синхронизации и управления нейтронным генератором.

Блок электроники гамма-спектрометра  $\text{CeBr}_3$  включает в себя процессорный модуль, блок питания процессорного модуля, плату с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) и плату кодировщика спектрометра. Плата кодировщика спектрометра основана на аналого-цифровом преобразователе (АЦП) и операционном усилителе фирмы Analog Devices. Плата ПЛИС обеспечивает АЦП всеми необходимыми управляющими сигналами, осуществляет чтение данных и их буферизацию перед отправкой данных через шину USB в процессорный модуль. Непосредственно на плате ПЛИС накопление гамма-спектра не производится, вместо этого формируется “фотонное слово”, состоящее из номера канала гамма-кванта и времени его регистрации. Формирователь сигнала реализован на микросборке РН300 фирмы АМРТЕК. Конструкция платы позволяет осуществлять быструю (до 2 мкс) оцифровку входного сигнала. Для синхронизации с импульсами нейтронного генератора на плату поступает сигнал от блока синхронизации и управления нейтронным генератором. Для управления использован процессорный модуль Adlink Cool SpaceRunner-LX800 в формате РС-104 на базе процессора AMD Geode LX800, который обеспечивает прием данных по шине USB от платы ПЛИС, буферизацию данных и отправку по сети в управляющий персональный компьютер.

Блок электроники сцинтилляционного детектора на основе стильбена и счетчиков  $^3\text{He}$  использует электронику, идентичную блоку электроники гамма-спектрометра, за исключением платы спектрометра. В ней используются АЦП Analog Devices и формирователи сигнала АМРТЕК А225. Для нейтронного сцинтилляционного блока ведется регистрация логического сигнала признака регистрируемой частицы — нейтрон или гамма-квант.

Блок синхронизации и управления нейтронным генератором содержит процессорный модуль, модуль ПЛИС и коммутатор Ethernet. Модуль ПЛИС реализует управление генератором ИНГ-10К или ИНГ-08, управление питанием, выдачу синхросигналов для НРGe-спектрометра и сцинтилляционных спектрометров и  $^3\text{He}$ -счетчиков.

Управление работой установки осуществляется с удаленного персонального компьютера. Программное обеспечение использует сервис приема данных, веб-интерфейс блока синхронизации и блока управления нейтронным генератором и программу визуализации данных.

#### 4. ВЫВОДЫ

С учетом успешного многолетнего опыта совместной работы ИКИ РАН и ОИЯИ были созданы

экспериментальный стенд, оснащенный моделью марсианского грунта, и многофункциональная экспериментальная измерительная установка для наземных испытаний космических гамма- и нейтронных спектрометров. Данная установка позволяет проводить измерения с датчиками тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов, а также с разными спектрометрами гамма-излучения. Измерения со всеми детекторами синхронизированы с работой импульсных нейтронных генераторов разных типов, также включенных в состав лабораторной установки. При работе генератора осуществляется регистрация нейтронов и гамма-квантов с записью времени их детектирования и амплитуды сигналов в датчиках и спектрометрах. Это позволяет анализировать временные распределения нейтронного альbedo от облучаемой модели грунта в разных энергетических диапазонах и осуществлять набор гамма-спектров в разных временных окнах по отношению к моменту генерации нейтронного импульса.

Созданная экспериментальная установка позволяет применять различные методы нейтронно-индуцированной гамма-спектроскопии для измерения элементного состава грунта, а также определять содержание и распределение воды в тестируемых моделях-аналогах планетного вещества. Полученные результаты предполагается использовать для подготовки космических экспериментов по ядерной планетологии, разработке новых гамма- и нейтронных спектрометров, сочетающих в себе гамма- и нейтронные детекторы с импульсными нейтронными генераторами.

Исследования выполнены при поддержке гранта № 14-22-00249 Российского научного фонда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. А. Сурков, *Космохимические исследования планет и спутников* (Наука, Москва, 1985).
2. W. V. Boynton *et al.*, *Science* **297**, 81 (2002).
3. W. V. Boynton *et al.*, *Space Sci. Rev.* **110**, 37 (2004).
4. L. G. Evans *et al.*, *J. Geophys. Res.* **117**, E00L07 (2012).
5. J. O. Goldsten *et al.*, *Space Sci. Rev.* **131**, 339 (2007).
6. D. Golovin *et al.*, in *Proceedings of the 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, 2014*, Abstract B0.1-43-14.
7. M. L. Litvak *et al.*, *Astrobiology* **8**, 605 (2008).
8. I. G. Mitrofanov *et al.*, *Space Sci. Rev.* **170**, 559 (2012).
9. I. G. Mitrofanov *et al.*, *Planet. Space Sci.* **58**, 116 (2010).
10. A. Kozyrev *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 085112 (2016).

11. M. L. Litvak *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **822**, 112 (2016).
12. А. А. Вострухин и др., Письма в ЭЧАЯ **13**, 354 (2016) [Phys. Part. Nucl. Lett. **13**, 224 (2016)].
13. М. Л. Литвак, Письма в ЭЧАЯ **13**, 368 (2016) [Phys. Part. Nucl. Lett. **13**, 234 (2016)].
14. M. L. Litvak *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **788**, 194 (2015).
15. M. L. Litvak *et al.*, J. Geophys. Res. **119**, 1259 (2014).
16. M. L. Litvak *et al.*, J. Geophys. Res. **121**, 836 (2016).

## **GROUND MEASUREMENTS EXPERIMENTAL SETUP FOR NUCLEAR PLANETOLOGY SPACE INSTRUMENTS DESIGN EVALUATION**

**A. A. Vostrukhin, D. V. Golovin, P. V. Dubasov, A. O. Zontikov, A. S. Kozyrev, A. R. Krylov,  
V. A. Krylov, M. L. Litvak, I. G. Mitrofanov, M. I. Mokrousov, A. N. Repkin,  
G. N. Timoshenko, K. V. Udovichenko, V. N. Shvetsov**

The article describes the laboratory ground measurements experimental setup that combines a various number of gamma spectrometers and neutron generators designed to operate at nuclear planetology facility at Joint Institute for Nuclear Research and provides physical calibrations for active gamma and neutron spectrometers.