

НАЗЕМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НАУЧНЫХ ПРИБОРОВ ЯДЕРНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ В ОИЯИ

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

^а Институт космических исследований РАН, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В данной работе представлены результаты первых испытаний активного нейтронного спектрометра ДАН (динамическое альbedo нейтронов), выполненных в Объединенном институте ядерных исследований с целью моделирования условий космических экспериментов на поверхности Марса или Луны и проверки возможностей методов нейтронного зондирования грунта для детектирования слоев водяного льда или воды, залегающих на различных глубинах в диапазоне 0–40 см. Для проведения испытаний были созданы массивные модели планетарного грунта из сухого материала с элементным составом, похожим на состав реголита Марса или Луны. Слои воды (льда) имитировались внутри моделей слоями полиэтилена на различной глубине.

In this work the results of ground tests with active neutron spectrometer DAN (Dynamic Albedo of Neutrons) are presented, which have been performed at the Joint Institute for Nuclear Research to simulate space experiments on Martian or Lunar surfaces and to test ability of active neutron methods to detect layers of subsurface water ice or water at depths in range 0–40 cm. For this experiment we assembled thick models of soil (20–30 metric tons) from a dry material similar in the elemental composition to Martian and Lunar regolith and have added polyethylene buried inside the target at different depths as a simulant of thin water/water ice layer.

PACS: 96.12.Kz; 96.12.Ma

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних двух десятилетий (начиная с середины 1990-х гг.) было подготовлено и запущено в космос около десятка научно-исследовательских миссий, посвященных исследованию планет и малых тел Солнечной системы, на борту которых были установлены ядерно-физические приборы. В основном это нейтронные и гамма-спектрометры, применяемые для исследования поверхности планет и определения элементного состава.

¹E-mail: litvak@mx.iki.rssi.ru

Прежде всего необходимо упомянуть комплекс научной аппаратуры, установленный на борту космического аппарата (КА) НАСА «Mars Odyssey», в состав которого входит гамма-спектрометр из высокочистого германия GRS, нейтронный спектрометр NS, а также российский детектор нейтронов высоких энергий ХЕНД [1]. КА «Mars Odyssey» работает на орбите Марса с 2001 г. и используется для глобального мониторинга и картографирования поверхности планеты. За это время нейтронные и гамма-спектрометры, установленные на его борту, обнаружили огромные залежи водяного льда в полярных районах Марса, получили данные о составе поверхности и провели многолетние наблюдения за сезонными шапками Марса, см., например, [2–7].

В настоящее время в космосе также работает российский коллимированный нейтронный спектрометр ЛЕНД, установленный на борту КА НАСА LRO, который с 2009 г. проводит поиск водяного льда в глубоких и вечно затененных кратерах на полюсах Луны [8–12].

На поверхности Марса в составе марсохода НАСА «Curiosity» работает российский активный нейтронный спектрометр ДАН, в задачи которого входит определение содержания подповерхностной воды по ходу движения марсохода [13–16].

На орбите Меркурия до недавнего времени работали КА с нейтронными и гамма-спектрометрами, которые помогли отождествить основные породообразующие элементы в приповерхностном слое планеты и обнаружить лед в вечно затененных кратерах на северном полюсе [17–19]. В исследованиях малых планет (Церера и Веста) участвует миссия DAWN с гамма- и нейтронным спектрометрами [20, 21]. На околоземной орбите в составе Международной космической станции (МКС) работает российский прибор БТН, который мониторирует вариации нейтронного фона в окрестности российского служебного модуля «Звезда» [22, 23].

В данное время российскими специалистами готовятся к запуску гамма- и нейтронный спектрометр МГНС, разработанный для миссии Европейского космического агентства VeriColombo; коллимированный нейтронный спектрометр ФРЕНД для орбитальной миссии ЕКА ExoMars, а также активный гамма- и нейтронный спектрометры для российских лунных посадочных миссий «Луна-25» и «Луна-27» и посадочной миссии ЕКА ExoMars [24–27]. Их запуск планируется в 2016–2020 гг.

В основе большинства представленных научных приборов и связанных с ними космических экспериментов лежат принципы нейтронной и гамма-спектроскопии поверхности исследуемых планет. Нейтронное и гамма-излучение планет и их спутников, на которых отсутствует совсем или есть только тонкая атмосфера (таких как Марс, Меркурий или Луна), возникает под действием высокоэнергетичных космических лучей, бомбардирующих поверхность небесных тел, см., например, [28]. Заряженные частицы космических лучей взаимодействуют с ядрами основных породообразующих элементов и порождают потоки нейтронов широкого спектра энергий на глубине до нескольких метров. Распространяясь в приповерхностном слое грунта, нейтроны испытывают множественные упругие и неупругие реакции с ядрами грунта, постепенно замедляются, а часть из них выходит из грунта. Ядерные реакции с участием нейтронов сопровождаются образованием моноэнергетических гамма-квантов, характерных для содержащихся в грунте элементов. В результате поверхность грунта испускает сложный спектр гамма-излучения, в котором присутствует большое количество ядерных линий, свидетельствующих о химическом составе грунта сравнительно небольшой толщины (до полуметра).

В свою очередь, наблюдение за вариациями потока выходящих из грунта альбедных нейтронов в разных энергетических диапазонах также позволяет судить об элементном составе исследуемого грунта, и прежде всего о наличии в нем водорода как наиболее эффективного замедлителя быстрых нейтронов. Присутствие в грунте даже нескольких долей процента водорода по массовой доле явственно меняет картину замедления быстрых нейтронов, приводит к существенному ослаблению выходящего с поверхности потока быстрых и эпитепловых нейтронов и возрастанию потока тепловых нейтронов. Содержание водорода в грунте обусловлено, главным образом, наличием в нем воды или водяного льда. Таким образом, орбитальное картографирование поверхности исследуемой планеты в гамма-лучах позволяет выявить распространенность основных породообразующих элементов (таких как Si, O, Fe, Al, Mg, Ti, Ca, Na, K), а мониторинг за пространственными изменениями потока эпитепловых и быстрых нейтронов используется для оценки содержания воды или водяного льда в приповерхностном слое грунта.

Для посадочных миссий предоставляется возможность не только работать в пассивном режиме и изучать нейтронный и гамма-фон, создаваемый космическими лучами, но также использовать методы активного нейтронного зондирования, которые уже много лет успешно применяются на Земле, например в геологоразведке, медицине или при идентификации наркотических и взрывчатых веществ в перевозимых грузах (см., например, [29–35]). В состав таких научных приборов входит импульсный нейтронный генератор, который по команде управления может облучать поверхность сериями коротких и мощных импульсов быстрых нейтронов с энергией 14,1 МэВ и индуцировать альбедное нейтронное и гамма-излучение из небольшого района поверхности вблизи прибора (см. более подробно разд. 2). К преимуществам активного метода по сравнению с пассивными измерениями относится возможность за счет мощности источника нейтронов существенно увеличить статистику измерений (т.е. сократить время, требуемое для получения необходимой точности), а также возможность изучать временной профиль зарегистрированного нейтронного и гамма-излучения в зависимости от времени, прошедшего с момента генерации нейтронного импульса. Последнее дает возможность получить информацию о неоднородностях распределения отдельных элементов в приповерхностном слое исследуемого вещества.

Активные методы предполагалось применять на посадочных миссиях еще несколько десятилетий назад, но только сейчас уровень развития современных технологий позволил создать компактную, надежную и стойкую к экстремальным внешним воздействиям научную аппаратуру, пригодную для использования в космосе и исследования таких небесных тел, как Марс, Венера и Луна [36, 13, 37–39, 25]. Так, в августе 2012 г. в составе марсохода «Curiosity», впервые за все всю историю планетных исследований, на поверхности Марса начал работать российский активный нейтронный спектрометр ДАН, состоящий из блоков импульсного нейтронного генератора и нейтронных детекторов. За два года наблюдений с его помощью удалось получить опыт нейтронного зондирования поверхности в условиях космического эксперимента и добыть первые данные о распределении подповерхностной воды в экваториальных широтах Марса в окрестности места посадки марсохода «Curiosity» [14, 16].

Все указанные выше российские научные приборы, в том числе и ДАН, проходили предполетную калибровку в ОИЯИ. С использованием накопленного за многие годы опыта для поддержки текущего эксперимента ДАН, а также с учетом дальнейших перспектив применения методов активной нейтронной и гамма-спектроскопии и разработки

соответствующей научной аппаратуры для исследования Марса, Луны и Венеры было решено создать на территории ОИЯИ специальный экспериментальный стенд, позволяющий моделировать и производить аналоги планетного вещества и проводить на них испытания прототипов активных нейтронных и гамма-спектрометров, см. [40]. В качестве первого шага в проведении наземных испытаний научной аппаратуры было решено использовать запасной летный образец прибора ДАН (как прототип будущих активных спектрометров) и провести с ним серию измерений на аналоге планетного вещества для определения чувствительности научной аппаратуры к обнаружению слоя воды/водяного льда на разной глубине. В данной работе представлены результаты этого эксперимента.

1. ОПИСАНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДАН

Научная аппаратура (НА) динамическое альbedo нейтронов (ДАН) была разработана в ИКИ РАН и установлена на борт марсохода НАСА «Curiosity» для проведения измерений содержания воды в марсианском грунте вдоль трассы движения марсохода, включая оценку среднего содержания физически (абсорбированной из атмосферы) и химически (в составе гидратированных минералов) связанной воды, а также изучения ее распределения по глубине в марсианском реголите. НА ДАН представляет собой активный нейтронный спектрометр, использующий методы импульсного нейтронного каротажа и состоящий из блока нейтронных детекторов и управляющей электроники ДАН-ДЭ (для регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов) и блока импульсного нейтронного генератора ДАН-ИНГ. При работе в активном режиме измерений блок ДАН-ИНГ облучает поверхность Марса короткими (длительность менее 2 мкс) импульсами нейтронов (выход генератора составляет 10^7 нейтронов/импульс, частота 10 Гц) с энергией 14,1 МэВ. Блок детектирования ДАН-ДЭ регистрирует временной профиль нейтронов, вышедших из поверхности, после того как они испытали многократное рассеяние и замедление в веществе грунта до тепловых и эпитепловых энергий, к которым очувствлен блок ДАН-ДЭ. Основным элементом, который влияет на замедление быстрых нейтронов в грунте является водород, поэтому по характеру (форма и амплитуда) зарегистрированного временного профиля выходящего из поверхности нейтронного потока можно восстановить распределение связанной воды в самом грунте. Характерный временной масштаб при регистрации времени прихода перерассеянных и замедленных в грунте нейтронов составляет десятки микросекунд для эпитепловых нейтронов и сотни (до нескольких тысяч) микросекунд для тепловых нейтронов.

Блок ДАН-ДЭ (рис. 1) включает два нейтронных детектора на основе ^3He пропорциональных счетчиков и управляющую электронику. Один из детекторов окружен кадмиевой оболочкой, чтобы исключить регистрацию тепловых нейтронов. В такой конфигурации детектор регистрирует эпитепловые нейтроны с энергиями выше кадмиевой отсечки (от $\sim 0,4$ эВ). Второй детектор окружен тонкой свинцовой оболочкой, которая защищает его от рентгеновского излучения импульсного нейтронного генератора, но при этом позволяет детектировать как тепловые, так и эпитепловые нейтроны. По разнице в темпах счета между двумя детекторами можно определить поток тепловых нейтронов от поверхности Марса.

Для каждого детектора электроника позволяет накапливать 16-канальные аппаратурные спектры (в пассивном и активном режимах работы прибора) и строить временные



Рис. 1. Блок ДАН-ДЭ



Рис. 2. Блок ДАН-ИНГ

распределения потоков событий (кривые затухания) в активном режиме работы прибора ДАН при включенном блоке ДАН-ИНГ в 64 логнормальных временных интервалах между импульсами генератора. Длина самого короткого интервала, отсчитываемого с момента генерации нейтронного импульса, равна 2 мкс и возрастает далее по геометрической прогрессии с фактором $\sim 1,1$.

Блок ДАН-ИНГ (рис. 2) представляет собой отдельное устройство, соединенное с блоком ДАН-ДЭ с помощью межблочного кабеля. Блок ДАН-ИНГ включает нейтронную трубку и высоковольтную электронику для выработки импульса ускоряющего напряжения ~ 120 кВ. Ускоренные ионы дейтерия сталкиваются с мишенью, насыщенной тритием, производя поток быстрых нейтронов с энергией 14,1 МэВ в результате ядерной реакции $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$.

По мере истощения содержащей тритий мишени выход нейтронов снижается. Гарантийная наработка блока — не менее 10^7 импульсов, при этом выход нейтронов уменьшится в 2,5 раза.

Одним из ключевых вопросов при анализе научных данных с НА ДАН является создание методики оценки содержания воды в марсианском грунте на основе детальных наземных калибровок с различными источниками излучения полевых испытаний и точного учета различных инструментальных эффектов. Это обусловило создание в ОИЯИ специального стенда для исследования характеристик НА ДАН и проведение наземных испытаний НА ДАН в активном режиме для изучения чувствительности прибора при различном распределении водосодержащего слоя по глубине.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ОИЯИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ ЯДЕРНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ

Экспериментальный стенд НА ДАН состоит из калибровочного полигона, который размещается на открытой площадке вдали от ядерно-физических установок ОИЯИ, а также систем управления НА ДАН и обеспечения дозиметрического контроля. Полигон представляет собой ангар общей площадью около 62 м² и высотой примерно 3,5 м. Стены и крыша ангара выполнены из тонкой (1,5 мм) листовой стали, что, с одной стороны, изолирует НА от внешней среды и непогоды, а с другой, позволяет свести к минимуму фон многократно рассеянных во внешней среде нейтронов при работе с нейтронным генератором. Внутри ангара в настоящее время собрана массивная модель марсианского грунта из листового силикатного стекла размерами 3,21 × 3,82 м, в толще которого располагается слой полиэтилена, имитирующего лед. Более подробное описание экспериментальной установки и модели планетарного грунта можно найти в работе [40].

Научная аппаратура ДАН (запасной летный образец прибора ДАН) была специально предоставлена ИКИ РАН в ОИЯИ на время проведения экспериментальных работ. Все измерения выполнялись в конфигурации, когда научная аппаратура ДАН устанавливалась на механическую оснастку, расположенную прямо над центром модели аналога планетного вещества (рис. 3). Высота расположения блоков прибора над поверхностью мишени составляла 80 см, а расстояние между блоками ДАН-ДЭ и ДАН-ИНГ равнялось 105 см, что соответствует конфигурации прибора ДАН на борту марсохода «Curiosity».

При планировании экспериментальных работ в первую очередь рассматривался аналог усредненного марсианского грунта и лунного полярного реголита, поскольку именно



Рис. 3. Механическая оснастка с научной аппаратурой ДАН, установленная над моделью марсианского грунта

Средний элементный состав различных грунтов и их модели

Элемент	Массовая доля в марсианском реголите, %	Массовая доля в лунном полярном реголите, %	Массовая доля в модели планетарного вещества, %
O	44	45,6	45,7
Si	24	20,7	33
Fe	12,5	1,5	0,1
Al	4,9	17,6	1
Mg	5,0	0,5	3
Ca	4,2	13,6	6,5
Ti	0,6	0,08	0,02
Na	1,9	0,5	10
K	0,4	0,4	0,3
C	1,0	0	0

на лунных полюсах были обнаружены возможные залежи подповерхностного водяного льда, см., например, [41–43; 9–10, 12]. Известно, что усредненный состав марсианского и лунного грунта можно представить как смесь различных оксидов, таких как SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 . При создании прототипа планетарного вещества было решено использовать упрощенные модели, в рамках которых можно создать массивную модель, размеры которой определяются размерами чувствительной области прибора ДАН в конфигурации марсохода «Curiosity». Основными требованиями к материалу модели были доминирующее содержание оксида SiO_2 и минимальное количество связанной воды. В качестве основного материала было выбрано листовое силикатное стекло толщиной 10 мм ($\rho = 2,55 \text{ г/см}^3$) как аналог абсолютно сухого грунта. В таблице представлено сравнение среднего элементного состава марсианского грунта (получен по данным прибора APXS, установленного на различных марсоходах, см., например, [44]), среднего элементного состава лунного полярного реголита (см., например, [42]) и элементного состава стекла модели планетарного грунта на экспериментальном стенде ДАН.

Элементный анализ стекла был выполнен во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья (Москва). Результаты анализа представлены в таблице в последнем столбце.

Из листового стекла была сложена базовая модель высотой 0,6 м. Поверх этой сборки выложен слой полиэтилена низкого давления с плотностью $0,95 \text{ г/см}^3$ и толщиной 5 см для имитации слоя воды или водяного льда. Далее в экспериментах поверх полиэтилена вновь укладывались слои стекла разной толщины. Таким образом моделировалась двухслойная гетерогенная структура планетарного грунта, в которой сверху, как правило, находится сухой слой песка или скальной породы, а на небольшой глубине (5–50 см) может находиться более влажный слой грунта (и даже слой водяного льда). Выбранный для испытаний на стенде аналог планетарного грунта мало пригоден для имитации планетарного грунта с равномерно распределенным в нем содержанием водяного льда, например, в виде вечной мерзлоты (гомогенная однородная структура). Тем не менее, приближенную гомогенную модель можно, в принципе, собрать на стенде, прослаивая каждый слой стекла тонким слоем полиэтилена (с шагом 1 см).

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ С НА ДАН В АКТИВНОМ РЕЖИМЕ

В ходе миссии на поверхности Марса марсоход «Curiosity» с установленным прибором ДАН проехал уже более 11 км от места посадки внутри кратера Гейл. Измерения профиля содержания связанной воды в грунте Марса с помощью прибора ДАН вдоль трассы движения марсохода показали, что количество воды в приповерхностном слое может колебаться в диапазоне от 0,5 до 10 %, составляя в среднем около 3 % [16]. Это немного, но в целом такого результата можно было ожидать, исходя из того, что марсоход движется в достаточной сухой экваториальных областях. С другой стороны, больший интерес вызывают полярные области Марса, где было доказано присутствие большого количества водяного льда. Впервые это было сделано с помощью орбитальных наблюдений на борту КА «Mars Odyssey» [2, 4, 5], а уже затем подтверждено посадочным аппаратом «Phoenix» [45–47]. Место посадки КА «Phoenix» было специально выбрано на основании анализа и численного моделирования данных нейтронной и гамма-спектроскопии с борта КА «Mars Odyssey». В итоге наземных измерений экскавация грунта в районе места посадки с помощью механической руки манипулятора подтвердила, что под слоем сухого грунта на глубине 5–10 см находится слой грязного водяного льда.

Исследование полярных районов Луны (в том числе и как возможного места для развертывания постоянной лунной базы) также показало наличие мест, где водяной лед может находиться либо на поверхности в глубине постоянно затененных кратеров, либо в их частично освещенной окрестности под толстым слоем сухого реголита с толщиной до 40–50 см [41–43, 9, 10, 12, 48–50]. Поэтому первоочередное внимание в наземных испытаниях на стенде было уделено двуслойной гетерогенной структуре грунта, т. е. имитации гипотетической ситуации, когда марсоход/луноход проезжает или останавливается над слоем грунта, в котором на разной глубине может находиться тонкая прослойка водяного льда или воды.

Основная цель испытаний НА ДАН на стенде заключалась в том, чтобы использовать научную аппаратуру ДАН как прототип будущих активных нейтронных спектрометров и оценить чувствительность методов активного дистанционного нейтронного зондирования для обнаружения залегания тонкого слоя воды/водяного льда на глубинах до 0,5 м в ходе проведения космических исследований. Для этой цели были проведены измерения с НА ДАН 13 различных вариантов сборки стекла и полиэтилена, при которых слой водяного льда/воды толщиной 5 см находился на глубинах от 5 до 40 см под поверхностью (ниже слоя воды/льда моделировалось еще 60 см грунта). Для каждой конфигурации модели грунта получены временные профили затухания нейтронного потока (затухание потока перерассеянных нейтронов в облученном веществе, начиная с момента генерации нейтронного импульса) в эпитепловом и тепловом диапазонах энергий. В каждом измерении блоком ДАН-ИНГ излучено 18 000 импульсов нейтронов. Кривые затухания нейтронного потока нейтронов всех энергий, выходящего из мишени после облучения импульсным нейтронным генератором, представлены на рис. 4.

Анализ полученных временных профилей показал существенное различие между мишенями грунта с различным заглублением слоя полиэтилена. В наибольшей степени это касается временного профиля затухания, измеренного пропорциональным счетчиком без кадмиевой оболочки. Этот детектор наиболее чувствителен к величине потока альбедных нейтронов, т. е. к распределению воды в приповерхностном слое. На рис. 4 видно, что

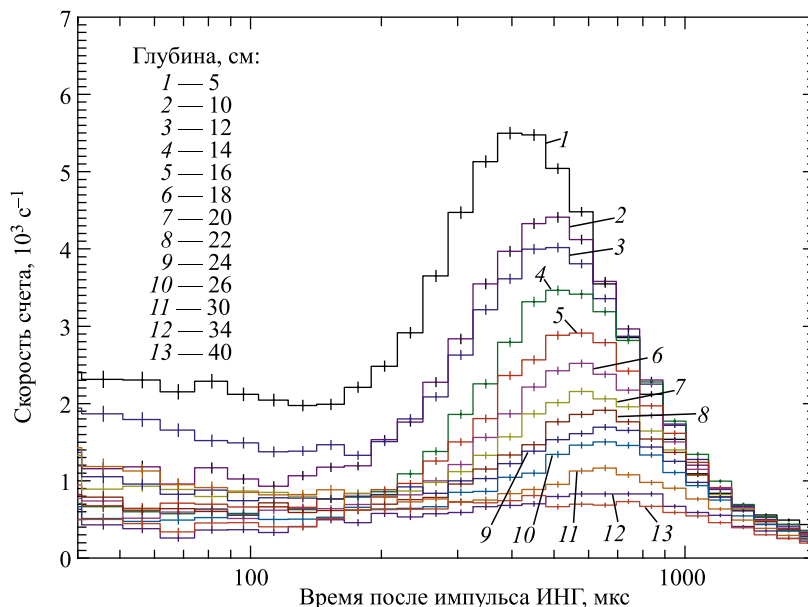


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Кривые затухания потока альбедных нейтронов при различной глубине залегания слоя полиэтилена внутри модели, измеренные детектором без кадмиевой оболочки

форма и амплитуда полученных кривых затухания существенно зависят от заглубления полиэтилена в модели планетного вещества. Альбедные тепловые нейтроны приходят в детектор во временном окне от 100 до 1000 мкс, начиная с момента генерации нейтронного импульса. При увеличении глубины залегания полиэтилена амплитуда пика снижается, а его максимум сдвигается в сторону больших времен, что объясняется как уменьшением вероятности выхода тепловых нейтронов из глубины массива, так и затягиванием процесса выхода в результате их диффузии в большом количестве материала над местом рождения. Видно, что пределом чувствительности ДАН-ДЭ по детектированию слоя воды/льда толщиной несколько сантиметров является глубина $\sim 35\text{--}40$ см.

Стандартный подход к обработке данных космического ядерно-физического эксперимента, как правило, не дает прямых измерений содержания воды. Он основан на модельно-зависимом восстановлении, при котором данные измерений сопоставляются с модельными предсказаниями для определения наилучших параметров модели (в данном случае содержания воды или ее распределения по глубине). Это потребовало затратного численного моделирования и создания библиотеки различных численных моделей с несколькими свободными параметрами. К настоящему времени метод, обеспечивающий наилучшее согласие между экспериментальными данными и численными расчетами, сформулирован и используется при обработке данных с марсохода (см., например [14, 16, 51]).

Рис. 5 дает для примера сравнение экспериментального результата, полученного на стенде, и результата численного моделирования кривой затухания потока нейтронов при заглублении слоя полиэтилена на 5 см (ситуация, вероятная в полярных областях Марса).

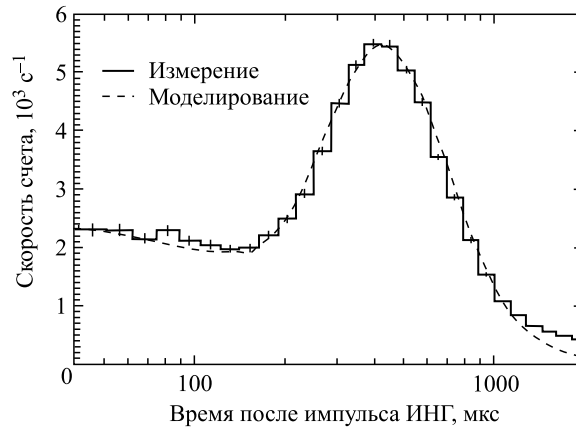


Рис. 5. Измеренная (гистограмма) и полученные в результате численного моделирования (штриховая кривая) кривые затухания потока альбедных нейтронов, выходящего из стеклянной модели с заглубленным на 5 см слоем полиэтилена

Наблюдается хорошее согласие между данными эксперимента и предсказанием численной модели. Однако в ходе проведения космического эксперимента часто требуется быстро и просто получить количественную оценку сравнения разных типов грунтов, по которым проехал марсоход, чтобы не пропустить участок поверхности с нестандартным элементным составом или повышенным содержанием воды/водяного льда, на котором необходимо провести дополнительные или более детальные измерения. Для этих случаев на основе экспериментального опыта разработаны различные эмпирические параметры, которые служат для предварительных оценок содержания воды в грунте. Такие параметры могут описывать изменения амплитуды и формы временных профилей событий детекторов как функцию распределения воды в грунте.

В качестве первого параметра $P1$ используется скорость счета пропорционального счетчика без кадмиевой оболочки во временном окне 100–1000 мкс. Этот параметр наиболее сильно зависит от процентного содержания воды в грунте. Однако со временем происходит старение нейтронной трубки генератора и падает выход нейтронов в импульсе (см., например, [14, 51]). Чтобы учесть систематические изменения нейтронного выхода блока ДАН-ИНГ, проводится нормировка параметра $P1$ на скорость счета, измеренную во временном окне 1000–3000 мкс. В данном временном диапазоне в детекторе все еще доминируют тепловые нейтроны, пришедшие из грунта и обусловленные импульсом генератора, но при этом на кривой затухания альбедных нейтронов это окно находится за основным пиком, обусловленным присутствием водяного льда (см. рис. 4 и 5). На рис. 6 представлены значения параметра $P1$ в зависимости от заглу-

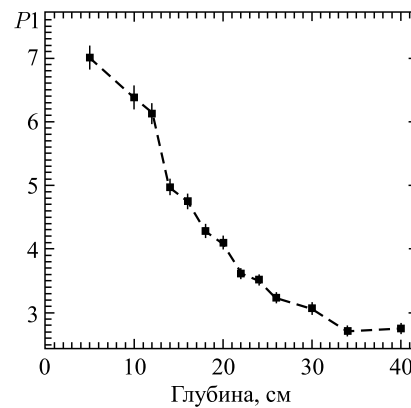


Рис. 6. Зависимость эмпирического параметра $P1$ от заглубления слоя полиэтилена внутри облучаемой модели грунта

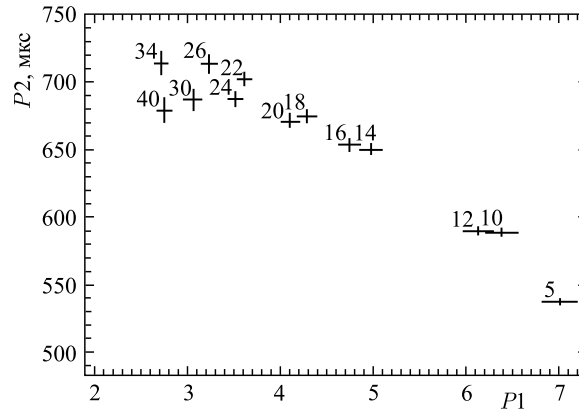


Рис. 7. Взаимосвязь эмпирических параметров $P1$ и $P2$ при различном заглублении слоя полиэтилена (в см) внутри облучаемой модели грунта

блечения слоя полиэтилена, полученные в испытаниях на стенде. Самые высокие значения этого параметра соответствуют распределению водяного льда близко к поверхности, а самые низкие — сухому реголиту или конфигурации мишени, когда слой полиэтилена находится на большой глубине под поверхностью. Из рис. 6 видно, что амплитуда вариаций величины параметра $P1$ при переходе от глубин 5 см к глубинам до 0,4 м трехкратная.

Второй параметр $P2$, который используется в экспресс-анализе, указывает на среднее время прибытия тепловых нейтронов и тем самым характеризует форму теплового пика и положение его максимума на временной шкале. Он рассчитывается по формуле

$$P2 = \frac{\sum(C_i \times T_i)}{\sum C_i}, \quad (1)$$

где C_i — скорость счета за все время измерений во временном бине T_i . Параметр $P2$ оценивается во временном окне 100–3000 мкс и так же, как и параметр $P1$, зависит от глубины залегания слоя воды/льда. Чем глубже залегает слой воды/льда, тем позже на временном профиле возникает тепловой пик (см. рис. 4). В силу своего определения параметр $P2$ также не зависит от систематических вариаций нейтронного выхода импульсного нейтронного генератора. Для оценки глубины залегания слоя водяного льда предлагается использовать взаимосвязь параметров $P1$ и $P2$, которая представлена на рис. 7.

ВЫВОДЫ

Проведена первая серия опытов на экспериментальном стенде ОИЯИ, предназначенном для испытаний и калибровки активных нейтронных и гамма-спектрометров в целях их будущего использования в различных космических экспериментах для исследования поверхности планет и малых тел Солнечной системы.

В ходе подготовки экспериментальных работ были разработаны и созданы модели-аналоги планетного вещества (с химическим составом, приближенным к марсианскому

или лунному грунту) с разным заглублением слоя воды/льда. В качестве имитатора водяного слоя использовался полиэтилен, а качестве основной абсолютно сухой породы — силикатное стекло. В экспериментах на стенде применялся запасной летный образец активного нейтронного спектрометра ДАН (его первый летный образец сейчас установлен и успешно работает на борту марсохода НАСА «Curiosity»).

По результатам измерений установлено, что на основании измерения временного профиля затухания потока нейтронов, выходящих из грунта после его облучения импульсным нейтронным генератором, можно построить эмпирические зависимости, позволяющие оценить глубину залегания тонкого водяного слоя/льда (~ 5 см) в сухом грунте в диапазоне глубин 0–50 см. Эти данные можно использовать для наземной калибровки как самого прибора ДАН, так и его аналогов, которые предполагается установить на российских и зарубежных аппаратах лунных и марсианских посадочных миссий в 2018–2020 гг.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (грант РФФ № 14-22-00249) при проведении научно-исследовательской работы по созданию различных моделей-аналогов планетного вещества и осуществлению с ними измерений с применением прототипа активного нейтронного спектрометра, предназначенного для космических экспериментов.

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.* Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits // *Science.* 2002. V. 297. P. 81–85.
3. *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.
4. *Mitrofanov I. G. et al.* Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector Mars Odyssey // *Science.* 2002. V. 297. P. 78–81.
5. *Feldman W. C. et al.* Global Distribution of Neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // *Ibid.* No. 5578. P. 75–78.
6. *Litvak M. L. et al.* Seasonal Carbon Dioxide Depositions on the Martian Surface as Revealed from Neutron Measurements by the HEND Instrument Onboard the 2001 Mars Odyssey Spacecraft // *Solar System Res.* 2004. V. 38, No. 3. P. 167–177.
7. *Litvak M. L. et al.* Long-Term Observations of the Evolution of the Southern Seasonal Cap of Mars: Neutron Measurements by the HEND Instrument Onboard the 2001 Mars Odyssey Spacecraft // *Solar System Res.* 2007. V. 41, No. 5. P. 385–394.
8. *Mitrofanov I. G. et al.* Lunar Exploration Neutron Detector for the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150, No. 1–4. P. 183–207; doi:10.1007/s11214-009-9608-4.
9. *Mitrofanov I. G. et al.* Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // *Science.* 2010. V. 330. P. 483–486.
10. *Mitrofanov I. G. et al.* Testing Polar Spots of Water-Rich Permafrost on the Moon: LEND Observations Onboard LRO // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. CiteID E00H27; doi:10.1029/2011JE003956.
11. *Litvak M. L. et al.* Global Maps of Lunar Neutron Fluxes from the LEND Instrument // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117; doi:10.1029/2011JE003949.

12. *Sanin A. B. et al.* Testing Lunar Permanently Shadowed Regions for Water Ice: LEND Results from LRO // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. CiteID E00H26; doi:10.1029/2011JE003971.
13. *Litvak M. L. et al.* The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology*. 2008. V. 8, No. 3. P. 605–612.
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.* 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.
16. *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 // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119, No. 7. P. 1579–1596.
17. *Goldsten J. O. et al.* The MESSENGER Gamma-Ray and Neutron Spectrometer // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 131. P. 339–391.
18. *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.
19. *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.
20. *Prettyman T. et al.* Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 163, No. 1–4. P. 371–459.
21. *Prettyman T. et al.* Elemental Mapping by Dawn Reveals Exogenic H in Vesta's Regolith // *Science*. 2012. V. 338. P. 242.
22. *Третьяков В. И. et al.* Первый этап космического эксперимента «БТН-нейтрон» на борту российского сегмента международной космической станции // *Косм. исслед.* 2010. Т. 48, № 4. С. 293–307.
23. *Лутвак М.Л. et al.* Наблюдение пространственных и временных вариаций спектральной плотности нейтронного потока вне российского сегмента международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-нейтрон» // *Косм. исслед.* 2015 (в печати).
24. *Mitrofanov I. G. et al.* The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) on Board the Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission // *Planetary and Space Sci.* 2010. V. 58. P. 116–124.
25. *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.
26. *Malakhov A. V. et al.* Fine Resolution Neutron Detector for ExoMars Trace Gas Orbiter. Instrument and Science Goals // *Ibid.* Abstract B0.2-19-14.
27. *Nikiforov S. Y.* Subsurface Water Observations on Mars: From DAN/Curiosity to Adron-RM/ExoMars // *Ibid.* Abstract B0.2-37-14.
28. *Arnold J. R. et al.* Gamma Rays in Space, Ranger 3 // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67. P. 4878–4880.
29. *Givens W. W., Mills W. R., Caldwell R. L.* Cyclic Activation Analysis // *Nucl. Instr. Meth.* 1970. V. 80. P. 95–103.
30. *Schweitzer J. S. et al.* Elemental Concentrations from Gamma-Ray Spectroscopy Logs // *Nucl. Geophys.* 1988. V. 2. P. 175.
31. *Schweitzer J. S.* Nuclear Techniques in the Oil Industry // *Nucl. Geophys.* 1991. V. 5, No. 1–2. P. 65.
32. *Schweitzer J. S.* Subsurface Nuclear Measurements for Geochemical Analysis // *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition, Topics in Remote Sensing 4.* Cambridge Univ. Press, 1993.

33. *Grau J. A., Schweitzer J. S., Hertzog R. C.* Statistical Uncertainties of Elemental Concentrations Extracted from Neutron-Induced Gamma-Ray Measurements // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1990. V. 37. P. 2175.
34. *Reijonen J.* Compact Neutron Generators for Medical, Homeland Security and Planetary Exploration // *Proc. Part. Accel. Conf. '05*, Knoxville, TN, USA, May 16–20, 2005.
35. *Reijonen J.* Neutron Generators Developed at LBNL for Homeland Security and Imaging Applications // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2007. V. 261. P. 272.
36. *Akkurt H. et al.* Pulsed Neutron Generator System for Astrobiological and Geochemical Exploration of Planetary Bodies // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2005. V. 241, No. 1–4. P. 232–237.
37. *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.
38. *Parsons A. et al.* // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 652. P. 674.
39. *Parsons A. et al.* Subsurface *in situ* Elemental Surface Composition Measurements with PING // 2013 IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT, USA, March 2–9, 2013. P. 1–11.
40. *Вострухин А. А. и др.* Экспериментальный стенд для испытания приборов ядерной планетологии // *Письма в ЭЧАЯ.* 2016. Т. 13, № 2(200).
41. *Feldman W. C. et al.* Polar Hydrogen Deposits on the Moon // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 4175–4196.
42. *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.
43. *Colaprete A. et al.* Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume // *Science.* 2010. V. 330(6003). P. 463.
44. *Bell J. F.* *The Martian Surface. Composition, Mineralogy and Physical Properties.* Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2008.
45. *Arvidson R. E. et al.* Results from the Mars Phoenix Lander Robotic Arm Experiment // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, No. 5685. CiteID E00E02.
46. *Mellon et al.* The Periglacial Landscape at the Phoenix Landing Site // *Ibid.* No. E10. CiteID E00E06.
47. *Mellon et al.* Ground Ice at the Phoenix Landing Site: Stability State and Origin // *Ibid.* No. 53. CiteID E00E07.
48. *Zuber M. T. et al.* Constraints on the Volatile Distribution within Shackleton Crater at the Lunar South Pole // *Nature.* 2012. V. 486. P. 378–381.
49. *Spudis P. D. et al.* Evidence for Water Ice on the Moon: Results for Anomalous Polar Craters from the LRO Mini-RF Imaging Radar // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2013. V. 118. P. 2016–2029.
50. *Hayne P. O.* Evidence for Exposed Water Ice in the Moon's South Polar Regions from Lunar Reconnaissance Orbiter Ultraviolet Albedo and Temperature Measurements // *Icarus.* 2015. V. 255. P. 58–69.
51. *Sanin A. B. et al.* Data Processing of the Active Neutron Experiment DAN for a Martian Regolith Investigation // *Nucl. Instr. Meth.* 2015. V. 789. P. 114–127; doi:10.1016/j.nima.2015.03.085.