

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПРИБОРОВ ЯДЕРНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ

*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. Л. Литвак^а, А. В. Малахов^а,
И. Г. Митрофанов^а, М. И. Мокроусов^а, И. Д. Пономарев^б, А. Н. Репкин^б,
А. Б. Санин^а, Г. Н. Тимошенко^{б, 1}, К. В. Удовиченко^б, В. Н. Швецов^б*

^а Институт космических исследований РАН, Москва

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В рамках сотрудничества Института космических исследований (Москва) и ОИЯИ создан экспериментальный стенд для испытаний и градуировки приборов ядерной планетологии. На стенде собрана модель марсианского грунта из силикатного стекла размерами $3,82 \times 3,21$ м и общим весом около 30 т. Стекло выбрано для имитации абсолютно сухого грунта, сходного по составу с марсианским. Гетерогенная модель позволяет добиться максимально возможного подобия марсианскому грунту по усредненному элементному составу путем добавления в нее слоев нужных веществ. Наличие приповерхностного водяного льда имитируется слоями полиэтилена на различной глубине стекла. В качестве источника нейтронов для испытания активных приборов используется портативный нейтронный генератор. Стенд является радиационно опасным объектом и оборудован системами блокировок и радиационного контроля в соответствии с действующими нормативами.

The experimental facility for testing and calibration of nuclear planetology instruments has been built in the frame of JINR and Space Research Institute (Moscow) cooperation. The Martian soil model from silicate glass with dimensions 3.82×3.21 m and total weight near 30 t has been assembled in the facility. The glass material was chosen for imitation of absolutely dry Martian regolith. The heterogeneous model has been proposed and developed to achieve the most possible similarity with Martian soil in part of the average elemental composition by adding layers of necessary materials, such as iron, aluminum, and chlorine. The presence of subsurface water ice is simulated by adding layers of polyethylene at different depths inside glass model assembly. The portable pulse neutron generator was used as a neutron source to test active neutron and gamma spectrometers. The facility is a radiation hazard area and that is why it is equipped with locking and radiation monitoring systems in accordance with national radiation safety regulations.

PACS: 96.12.Wx

1. МЕТОДЫ ГАММА- И НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПЛАНЕТ

Важной задачей планетологии является исследование элементного состава грунта внутренних планет Солнечной системы с помощью как орбитальных, так и спускаемых аппаратов. Особое значение в этих исследованиях придается поиску воды (водяного льда),

¹E-mail: tim@jinr.ru

поскольку наличие свободной воды в заметном количестве может являться условием развития жизни. Наличие локальных запасов воды определит места возможной посадки исследовательских зондов, а в будущем размещения на планетах постоянных научных миссий (станций).

В последние годы в экспериментальной планетологии выделился новый раздел — ядерная планетология, — связанный с исследованиями поверхности планет и малых тел Солнечной системы методами ядерной физики. Работы в области ядерной планетологии в России ведутся в Отделе ядерной планетологии Института космических исследований РАН. Отделом разработан ряд приборов для исследования ядерно-физическими методами поверхностей планет, установленных и планируемых к установке на борту как российских, так и зарубежных космических аппаратов. Российские эксперименты реализуются на аппаратах НАСА и ЕКА на основе межправительственных соглашений Роскосмоса с этими организациями. Активными участниками этих исследований является ряд научных организаций России, в том числе ОИЯИ. В задачи ОИЯИ входят: участие в разработке приборов на стадии проектирования, расчетное моделирование с помощью универсальных программ транспорта излучений в веществе радиационной обстановки на орбитах планет и на их поверхности, характеристик приборов и их откликов, подготовка и проведение калибровок приборов с помощью источников излучения на модельных стендах и в полевых условиях. За годы сотрудничества с ИКИ ОИЯИ участвовал в создании таких приборов, как HEND (High Energy Neutron Detector) миссии «2001 Mars Odyssey» [1, 2], LEND (Lunar Exploration Neutron Detector) миссии LRO-2009 [3, 4], НС-ХЕНД миссии «Фобос-грунт» [5], БТН-М1 [6, 7] и БТН-М2 эксперимента «БТН-Нейтрон» [8] на МКС, DAN (Dynamic Albedo of Neutron) миссии «Mars Science Laboratory-2011» (марсоход «Curiosity») [9, 10]. В настоящее время ведутся работы с приборами будущих миссий — MGNS (Mercurial Gamma-ray and Neutron Spectrometer) миссии ESA BepiColombo (ожидаемый запуск в 2017 г.) [11], FRENД (Fine-Resolution Epithermal Neutron Detector) и ADRON-PM миссии ESA и ExoMars-2016, ExoMars-2018 [12, 13], АДРОН-ЛР (Активный Детектор нейтронов и гамма-лучей [14]) российских проектов «Луна-Глоб-2017» и «Луна-Ресурс-2019» (ожидаемые годы запуска: 2019 г. и 2021 г. соответственно).

Элементный состав грунта исследуется методами гамма-спектроскопии, для чего в состав космических аппаратов (КА) включались сцинтилляционные спектрометры для измерения спектров гамма-квантов в энергетическом диапазоне до 10 МэВ. Из сцинтилляторов наиболее перспективными являются кристаллы $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и CeBr_3 с улучшенным энергетическим разрешением [15–17]. Применение германиевых спектрометров, обладающих значительно лучшим энергетическим разрешением, ограничивается жесткими требованиями к приборам КА по массе и потребляемой мощности. До настоящего времени НРГ-спектрометр использовался два раза: прибор GRS в миссии «2001 Mars Odyssey» [1] и прибор GRS в меркурианской миссии MESSENGER [18]. Гамма-спектрометры регистрируют линии, принадлежащие примордиальным радионуклидам в составе грунта, а также линии характеристического излучения основных породообразующих элементов, инициированные реакциями неупругого рассеяния быстрых нейтронов и реакциями захвата тепловых нейтронов в грунте [19]. Поток вторичных нейтронов в верхних слоях грунта формируется за счет взаимодействия с ним энергичных частиц галактических космических лучей (ГКЛ). При наличии большого количества водяного льда вблизи поверхности в гамма-спектре идентифицируется линия 2,223 МэВ от захвата теплового нейтрона водородом. Наличие такой линии по данным орбитера «2001 Mars Odyssey», наряду с

данными нейтронной спектроскопии, позволило сделать вывод, что приповерхностный грунт (1–2 м) в полярных и приполярных районах Марса (выше 60° с. ш./60° ю. ш.) состоит в основном из водяного льда [20–22].

Орбитальные измерения позволяют провести глобальное картографирование и построить карту распространенности основных породообразующих элементов, но при этом пространственное разрешение будет сопоставимо с высотой орбиты и, как правило, не менее чем 100–400 км. Более детальная информация о морфологии поверхности планет может быть получена с помощью планетоходов (роверов), которые позволяют провести локальные исследования конкретного участка планеты, предварительно отобранного для изучения с помощью результатов наблюдений орбитальных миссий. При этом установка на роверы портативных импульсных нейтронных генераторов (ИНГ) на основе реакции $D(T, n)^4\text{He}$ позволяет значительно увеличить эффективность метода гамма-спектроскопии за счет облучения грунта мощными импульсами нейтронов с энергией 14 МэВ, образующих в грунте потоки вторичных нейтронов много большие, чем от ГКЛ.

Кроме гамма-спектроскопии важнейшую роль в изучении планет играет нейтронная спектроскопия. Интенсивность гамма-линий в спектре зависит не только от относительного содержания в грунте тех или иных элементов, но также от спектральной плотности потока вторичных нейтронов в нем. Таким образом, знание спектра нейтронного альbedo из грунта является необходимым условием определения относительной распространенности его породообразующих элементов. С другой стороны, спектральный состав альбедных нейтронов также зависит от элементного состава вещества в приповерхностном слое грунта, поскольку преобладание в нем легких элементов, и в первую очередь водорода, быстро термализует спектр нейтронов. Поэтому для исследования элементного состава грунта необходимы комплексные измерения, включающие как гамма-спектроскопию с высоким разрешением, так и спектрометрию альбедных нейтронов планеты в широком диапазоне энергий — от тепловых до нескольких МэВ. Нейтронные спектрометры в разных вариациях включались во все приборы, созданные в ИКИ. Первый нейтронный прибор HEND состоял из трех пропорциональных ^3He -счетчиков, два из которых были в цилиндрических полиэтиленовых замедлителях разных диаметров [22]. Таким образом, счетчики были чувствительны к нейтронам в различных энергетических диапазонах от тепловой энергии до долей МэВ. Помимо этого, в состав HEND входил датчик быстрых нейтронов на основе стибена, кристалл которого был окружен сцинтиллятором CsI(Tl) второго сцинтилляционного датчика, включенного на антисовпадения для режекции заряженных частиц [22]. При увеличении содержания воды в грунте доля тепловых нейтронов в спектре альбедных нейтронов возрастает, а доля эпитепловых, промежуточных и быстрых нейтронов падает, что проявляется в изменении соотношения показаний нейтронных сенсоров. По толщине грунта возможности нейтронной спектрометрии ограничены слоем около 1–2 м.

Нейтронная спектрометрия при поиске водяного льда или мерзлоты обладает существенно большей чувствительностью, чем гамма-спектрометрия по линии водорода 2,223 МэВ и «видит» лед на большей глубине грунта. С помощью прибора HEND с орбиты Марса было осуществлено картографирование всей планеты по относительному содержанию воды в поверхностном слое грунта [22]. Прибор LEND (коллимированный вариант нейтронного спектрометра) обнаружил с орбиты на южном полюсе Луны локальные области с высоким содержанием водорода (льда) в реголите [23]. Активный нейтронный спектрометр ДАН работает уже третий год в кратере Гейла на Марсе, из-

меряя содержание воды по трассе движения ровера «Curiosity» [24,25]. В его состав входит ИНГ с выходом нейтронов до 10^8 с^{-1} . По принципу детектирования альбедных нейтронов разных энергетических групп ДАН отличается от HEND. В ДАН используется времяпролетный метод спектрометрии, при котором сигнал «Старт» синхронизирован с коротким ($\sim 1 \text{ мкс}$) импульсом ИНГ, а сигналы «Стоп» приходят на многостоповые время-амплитудные конверторы от двух пропорциональных ^3He -счетчиков, один из которых окружен кадмием. Таким образом регистрируются две функции затухания альбедных тепловых и эпитепловых нейтронов, соотношение которых во временном диапазоне 0,1–3 мс сильно зависит от содержания водорода в грунте.

В состав меркурианского прибора MGNS [11] входят нейтронный спектрометр (аналог HEND) и гамма-спектрометр с кристаллом CeBr_3 . На лунном спускаемом КА АДРОН-ЛР размещается нейтронный спектрометр типа ДАН с ИНГ и гамма-спектрометр на основе кристалла LaBr_3 [14].

2. СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИБОРОВ ЯДЕРНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ

Большой объем работ по испытанию, наладке и калибровке приборов с помощью радионуклидных нейтронных источников и нейтронного генератора потребовал создания в ОИЯИ специального экспериментального стенда. При этом преследовались две основные цели: 1) снижения фона многократно рассеянных в помещении нейтронов для повышения точности нейтронных измерений; 2) проведения на стенде испытаний приборов с различными моделями планетарного грунта.

Экспериментальный стенд представляет собой ангар из тонкой листовой стали площадью около 62 м^2 с бетонным полом, расположенный на территории, удаленной от ядерно-физических установок и служебных зданий ОИЯИ. Малая толщина стен и потолка ангара обеспечивает незначительный вклад многократно рассеянных нейтронов в показания приборов при работе ИНГ, т.е. измерения проводятся в условиях, близких к полевым. Стенд является радиационно опасным объектом и оборудован в соответствии с действующими правилами радиационной безопасности. Помещение ангара при работе ИНГ является зоной исключенного доступа (запрета), а вокруг стенда выгорожена зона специального доступа радиусом 25 м (рис. 1). При работе ИНГ с выходом нейтронов 10^8 с^{-1} мощность эффективной дозы нейтронов на границе зоны специального допуска не превышает $2,5 \text{ мкЗв/ч}$, что соответствует допустимому уровню для персонала группы Б. Управление работой ИНГ и комплексами контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) производится дистанционно из пультовой стенда в здании № 71, находящемся на расстоянии 35–40 м от источника нейтронного излучения. В ангаре и на границе зоны специального доступа установлены стационарные посты радиационного контроля на основе устройств детектирования нейтронов УДБН-01 и гамма-квантов УДБГ-04 производства ЗАО «Аспект» (Дубна). Входы в ангар оборудованы двойной независимой блокировкой, срабатывающей как от сигналов с радиационных датчиков, так и при подаче питания на ИНГ. Контроль радиационной обстановки, состояния блокировок и включение звуковой и световой сигнализации осуществляется автоматизированной системой радиационного контроля.

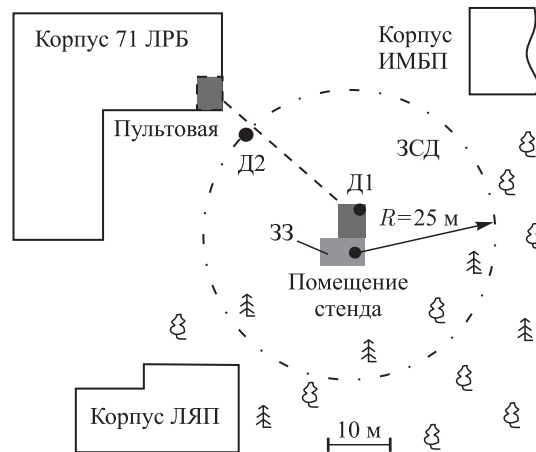


Рис. 1. План размещения экспериментального стенда на площадке ЛЯП: 33 — зона запрета; ЗСД — зона специального доступа; Д1 и Д2 — датчики радиационного контроля

Испытания приборов ядерной планетологии проводятся на стенде на моделях планетарного грунта, представляющих собой большие массивы вещества, соответствующие имеющейся информации об элементном составе реголитов. В настоящее время на стенде проводятся работы с моделью марсианского грунта, содержащего внутри слой водяного льда. В качестве основы модели использовано листовое силикатное стекло марки М1 (ГОСТ 111-2001). Выбор стекла обусловлен, во-первых, тем, что реголиты земной группы планет состоят преимущественно из силикатов, и, во-вторых, тем, что метод получения стекла гарантирует отсутствие в нем химически связанной воды, т.е. отсутствие водорода. По существу стекло является моделью абсолютно сухого грунта. Модель марсианского грунта, созданная для стенда, представляет собой массив, выложенный из листового стекла (толщина листа 1 см) размерами $3,21 \times 3,82$ м, внутри которого располагается слой полиэтилена, имитирующего воду или водяной лед.

Первые измерения на стенде проводились совместно специалистами ИКИ РАН и ОИЯИ с запасным летным образцом прибора ДАН и квалификационным образцом активного гамма-спектрометра АДРОН и были направлены на проверку чувствительности методов дистанционного нейтронного зондирования при детектировании слоев водяного льда на разной глубине планетного вещества. Основные результаты измерений, полученные с помощью прибора ДАН, представлены в статье [26].

При проведении экспериментальных измерений использовалась механическая оснастка, на которой были закреплены блок нейтронных детекторов (ДАН-ДЕ) и блок и импульсного нейтронного генератора (ДАН-ИНГ) на расстоянии 1,05 м друг от друга и на высоте 0,8 м над массивом стекла (геометрия, соответствующая размещению приборов ДАН на ровере «Curiosity»). Площадь стекла перекрывает реальную площадь пространства, в пределах которой ДАН при такой геометрии может реально «видеть» воду в грунте (численное моделирование показало, что это пространство имеет радиус $\sim 1,5$ м). Присутствие внутри грунта слоя водяного льда имитируется слоем полиэтилена низкого давления ($\rho = 0,94 \text{ г/см}^3$) на разной глубине внутри массива стекла. На рис. 2 представлена фотография модели грунта вместе с установленными на ней ИНГ и детекторами прибора ДАН внутри ангара.

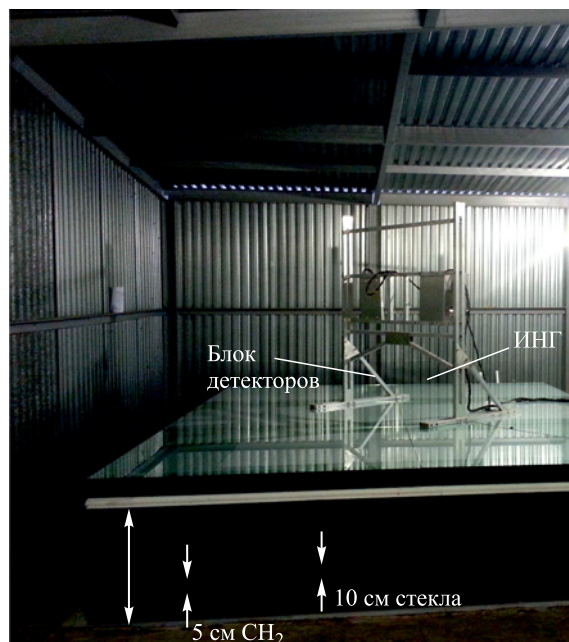


Рис. 2. Вид модели марсианского грунта с нейтронным генератором и детекторами

В настоящее время толщина сборки составляет 60 см стекла + 5 см полиэтилена + 40 см стекла. Общий вес модели превышает 32 т. Толстый слой стекла в 60 см ниже полиэтилена необходим для того, чтобы приборы не чувствовали земного грунта (бетона) с содержащейся в нем земной влагой. Численные расчеты и последовательные измерения, проведенные с аппаратурой ДАН на различных этапах сборки модели, подтвердили достаточность этой толщины [27]. На рис. 3 представлены временные профили (функции затухания) полного потока альбедных нейтронов, выходящего непосредственно из

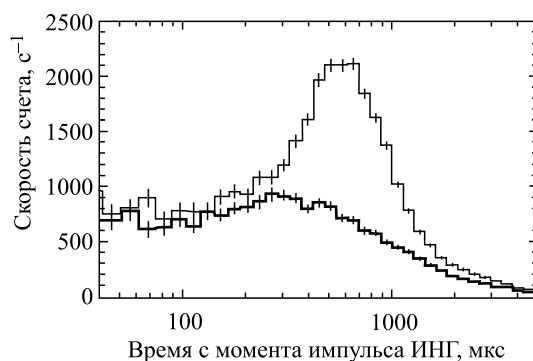


Рис. 3. Измерения временного профиля потока всех альбедных нейтронов при определении минимальной толщины модели. Тонкой линией показаны результаты измерений над бетонным основанием стенда без модели, толстая линия соответствует измерениям со стеклянной моделью толщиной 55 см

грунта и из стеклянной модели марсианского грунта толщиной 55 см, облучаемых нейтронами генератора. Видно, что измерения, проведенные на бетонном основании стенда, демонстрируют явный пик термализованных нейтронов в районе 300–1000 мкс, обусловленный влажностью грунта под бетонной стяжкой. При увеличении толщины сборки стекла до 50–60 см этот пик полностью пропадает, подтверждая, что измерительная аппаратура в этом случае регистрирует только нейтроны, термализованные в самом массиве стекла, а не в материале, находящемся под ним.

Для имитации заглупления льда в планетарном грунте используются слои стекла и полиэтилена над этой сборкой минимальной толщины.

3. ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ МОДЕЛИ ПЛАНЕТНОГО ВЕЩЕСТВА

Химический состав стекла М1, использованного в составе модели грунта, был исследован во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья (Москва) методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Полиэтилен, используемый в модели, состоит из С (85,2–85,3 % по массовой доле), Н (14,3–14,4 %) и других примесных элементов (0,2–0,4 %).

Первоочередное внимание при выборе материала модели грунта уделялось имитации марсианского реголита и сравнительно близкого к нему лунного реголита, что связано с повышенным интересом к будущим посадочным миссиям на Марс и Луну. Имеющаяся информация свидетельствует, что марсианский грунт состоит из более чем 10 химических соединений, большинство из которых являются оксидами. Если пренебречь соединениями, представленными в малых концентрациях, то усредненный состав грунта можно представить как смесь оксидов SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, MgO, SO₃, P₂O₅, MnO, Sr₂O₃, TiO₂, FeO. В марсианском грунте обнаружено также значимое содержание Cl. Лунный грунт включает те же оксиды, но в нем нет хлора.

В табл. 2 приведены диапазоны весовых содержаний оксидов в различных пробах грунта и камней, измеренных APX-спектрометрами марсоходов «Pathfinder» и «Mars Exploration Rover» (MER) [28].

Таблица 1. Элементный состав образцов стекла М1, использованного в модели марсианского грунта ($\rho = 2,55 \text{ г/см}^3$)

Оксид	Весовое содержание, %	Элемент	Весовое содержание, %
SiO ₂	69,8 ± 0,5	Si	32,624
Na ₂ O	13,8 ± 0,2	O	46,141
MgO	4,8 ± 0,1	Na	10,238
Al ₂ O ₃	1,5 ± 0,1	Mg	2,894
K ₂ O	0,3 ± 0,1	K	0,249
CaO	9,5 ± 0,2	Ca	6,790
Fe ₂ O ₃	0,1 ± 0,02	Al	0,794
Sr*	0,08 ± 0,01	Fe	0,070
Ba*	0,012 ± 0,002	Sr	0,08
Zr*	0,0050 ± 0,0009	Ba	0,012

*Показаны следы элементов с наибольшим весовым содержанием (всего обнаружено 53 следа элементов от Li до U).

Таблица 2. Средний состав марсианского грунта по данным измерений посадочных миссий НАСА «Pathfinder» и MER, см. [28]

Оксид	Весовое содержание, %
SiO ₂	41,0–55,2
Fe ₂ O ₃ , FeO	14,8–23,7
Al ₂ O ₃	7,41–12,8
CaO	5,50–8,80
Na ₂ O	0,97–4,9
MgO	2,10–9,95
SO ₃	1,7–7,58
P ₂ O ₅	0,5–1,89
K ₂ O	0,45–1,29
MnO	0,10–0,76
Cr ₂ O ₃	0,05–0,50
TiO ₂	0,50–1,20
Cl	0,37–1,2

Из сравнения таблиц видно, что стекло удовлетворительно имитирует усредненный состав марсианского грунта. Основные различия заключаются в завышенном содержании кремния и натрия в стекле и заниженном содержании алюминия и железа. Усредненная плотность поверхностного слоя на глубине до 10 м марсианского грунта по данным радиолокации равна 1,7 г/см³, т.е. в 1,5 раза меньше плотности стекла в условиях, схожих с марсианскими. Меньшее значение плотности марсианского грунта обусловлено не столько различием в элементном составе, сколько пористостью грунта в отличие от монолитной модели. Поэтому влияние различия плотности грунта и модели на спектр вторичных нейтронов в глубине не должно быть значительным.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ПЛАНЕТАРНОГО ВЕЩЕСТВА И ПЕРВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА СТЕНДЕ

Для понимания механизма формирования поля нейтронов в глубине массива чистого стекла по программе MCNP были выполнены расчеты энергетического флюенса нейтронов по слоям стекла толщиной 10 см при общей толщине массива 70 см. В расчетах под слоем стекла задавалась бетонная стяжка толщиной 5 см ($\rho = 2,35$ г/см³), а еще ниже — слой сухого грунта (SiO₂, $\rho = 1,8$ г/см³) толщиной 50 см. Стационарный изотропный источник нейтронов с энергией 14 МэВ располагался на высоте 30 см над центром массива размерами 3,2 × 3,8 м. Расчетные спектры нейтронов, усредненные по слоям массива стекла и нормированные на 1 нейтрон источника, приведены на рис. 4 в единицах летаргии ($\Phi(E) \times E$).

Во-первых, видно, что в результате рассеяния нейтронов на легких ядрах термализация незначительной части нейтронов происходит даже в безводородной среде. Во-вторых, соотношение между тепловыми и быстрыми нейтронами сильно меняется с глубиной стекла. Вклад тепловых нейтронов в спектре возрастает с глубиной, а доля быстрых нейтронов резко падает. В районе 2–3 кэВ наблюдается узкий провал в спектрах, обусловленный расположенными близко резонансами в сечении поглощения нейтронов железом и натрием.

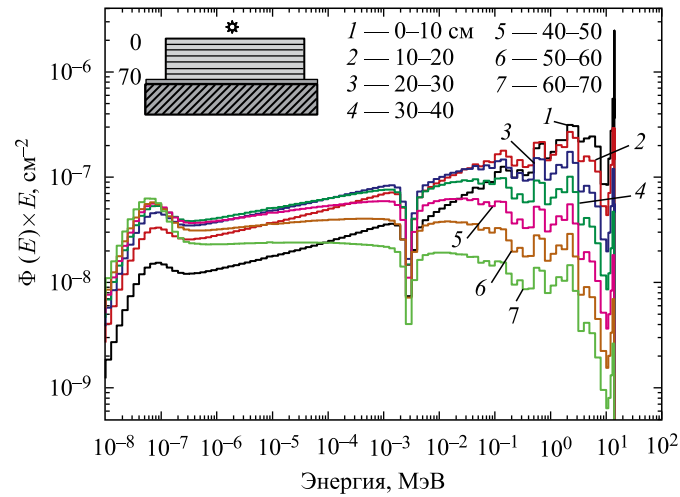


Рис. 4. Спектры нейтронов внутри массива стекла, усредненные по слоям 0–10 см

Наличие в глубине массива слоя полиэтилена меняет форму спектров альбедных нейтронов. На рис. 5 показаны для примера нормированные на 1 нейтрон ИНГ расчетные спектры альбедных нейтронов из стекла толщиной 70 см и того же массива стекла, внутри которого на глубине 20 см слой стекла толщиной 5 см заменен слоем полиэтилена той же толщины. Отношение числа альбедных нейтронов к числу нейтронов ИНГ, падающих на массив, составляет 46,8 % в первом случае и 41,0 % во втором. Наличие слоя льда в глубине грунта приводит к резкому возрастанию доли тепловых нейтронов в спектре и снижению доли нейтронов с энергией 0,2 эВ–100 кэВ. Расчеты показывают, что

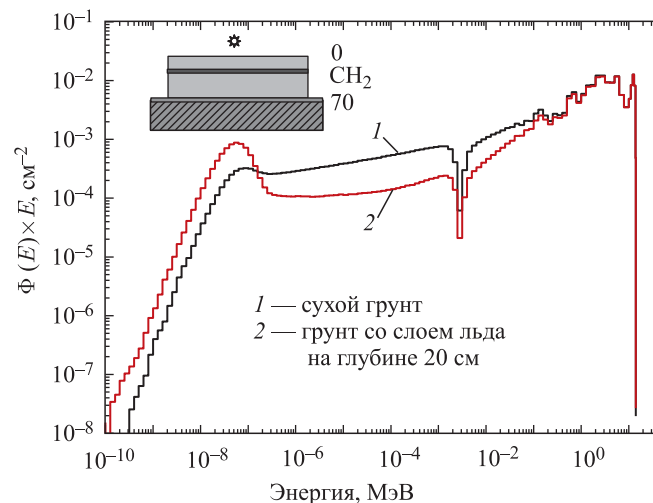


Рис. 5. Спектры альбедных нейтронов над сухой моделью грунта и моделью с приповерхностным слоем льда (полиэтилен толщиной 5 см на глубине 20 см)

различие в альбедных спектрах для слоя льда такой толщины уверенно прослеживается до глубины стекла 70 см, что эквивалентно ~ 1 м марсианского грунта.

На данной модели грунта был выполнен большой цикл испытаний приборов ядерной планетологии. В первую очередь испытывался ДАН, как действующий аналог космического активного нейтронного спектрометра [26, 27]. Кроме этого, в измерениях участвовал прибор АДРОН-ЛР — гамма- и нейтронный активный спектрометр, который разрабатывается для российских лунных посадочных миссий и использует тот же са-

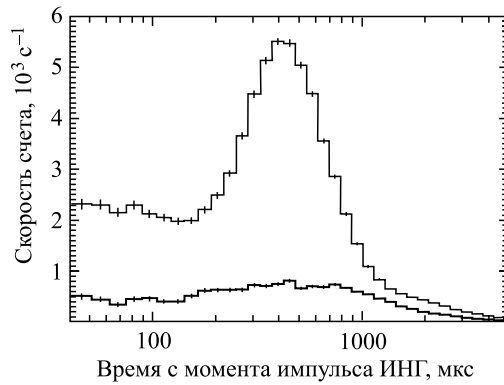


Рис. 6. Пример измерений прибора ДАН при различных конфигурациях модели грунта. Тонкой линией показаны измерения временного профиля потока эпитепловых и тепловых нейтронов (пропорциональный счетчик без кадмиевой оболочки), выходящих из поверхности модели 60 см стекла + 5 см полиэтилена + 5 см стекла. Толстой линией показаны измерения временного профиля потока эпитепловых и тепловых нейтронов, выходящих из поверхности модели 60 см стекла + 5 см полиэтилена + 40 см стекла

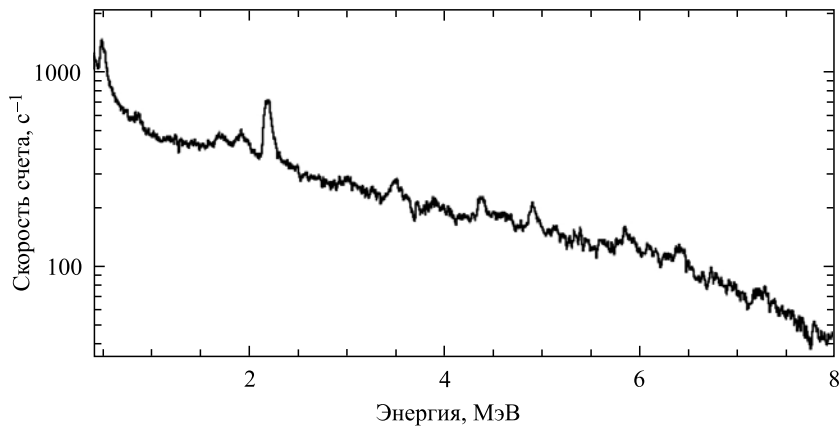


Рис. 7. Пример измерений прибора АДРОН-ЛР на модели марсианского грунта 60 см стекла + 5 см полиэтилена + 3 см стекла. Показан гамма-спектр, измеренный во временном окне 0,35–1,3 мс (основной вклад вносят тепловые нейтроны) с момента генерации нейтронного импульса. В районе 2,22 МэВ хорошо видна гамма-линия из реакции радиационного захвата ${}^1\text{H}(n, \gamma)\text{D}$

мый импульсный нейтронный генератор, что и прибор ДАН. Для пассивных измерений гамма- и нейтронного фона также использовался запасной летный образец меркурианского нейтронного и гамма-спектрометра MGNS. Моделировалось залегание слоя льда на глубинах грунта до 40 см. В экспериментах изучались временные распределения альбедных тепловых и эпитепловых нейтронов и спектры гамма-квантов из реакций захвата и неупругого рассеяния нейтронов в модели грунта. Примеры результатов измерений с помощью активных нейтронных и гамма-спектрометров приведены на рис. 6 и 7.

5. ДОРАБОТКА МОДЕЛИ ПЛАНЕТАРНОГО ГРУНТА

Различия в элементном составе модели и марсианского грунта могут, тем не менее, влиять на формирование поля вторичных нейтронов на глубине. Поэтому следующим шагом в улучшении модели грунта будет создание гетерогенной сборки из стекла, слоеного тонкими листами железа и алюминия, с тем, чтобы добиться большего подобия модели марсианскому грунту по этим элементам.

Особую роль в формировании поля альбедных нейтронов играют элементы с большим сечением захвата тепловых нейтронов, поскольку их присутствие в грунте будет искажать соотношение между тепловыми и эпитепловыми альбедными нейтронами. Из элементов, перечисленных в табл. 2, аномально большим сечением поглощения тепловых нейтронов

Таблица 3. Схема укладки модернизированной модели марсианского грунта ($\rho = 2,76 \text{ г/см}^3$)

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		

Таблица 4. Сравнительный анализ среднего элементного состава марсианского грунта и элементного состава модернизированной модели марсианского грунта

Элемент	Содержание в марсианском грунте*, %	Содержание в модели, %
O	42,4	37,75
Na	2,4	8,38
Mg	4,1	2,37
Al	5,6	4,98
Si	21,2	26,69
P	0,27	—
S	1,9	—
Cl	0,74	0,71
K	0,61	0,20
Ca	4,7	5,55
Ti	0,54	—
Cr	0,14	—
Mn	0,26	0,002
Fe	15,2	12,66
C	—	0,48
H	—	0,06

* По данным измерений посадочных миссий НАСА «Pathfinder» и MER, см. [28].

обладает хлор (31,5 б) и, в меньшей степени, марганец (13,3 б). Марганец входит в состав стали обычно в незначительных количествах, но есть и марганцевые стали, содержащие до 20 % Mn. Таким образом, подбором соответствующей марки листовой стали можно добиться соответствия модели марсианскому грунту по Fe и Mn. Нужного содержания хлора в модели с имитацией водяного льда можно добиться, заменив часть полиэтилена на поливинилхлорид (химическая формула ПВХ: $-CH_2-CHCl-$).

Для создания модели реголита, близко имитирующей состав марсианского грунта (с улучшенным соответствием содержания железа, алюминия и хлора), предлагается дополнить стеклянную сборку тонкими слоями металлов и ПВХ ($\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$). Сборку планируется собрать из блоков толщиной по 112,8 мм с конфигурацией веществ, представленной в табл. 3. Сравнительный анализ химического состава такой модели реголита и усредненного состава марсианского реголита приведен в табл. 4, где показано их хорошее согласие по железу, алюминию и хлору. На этой сборке планируется провести следующую серию испытаний приборов ДАН и АДРОН-ЛР.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку (грант РНФ № 14-22-00249) при осуществлении научно-исследовательской работы по созданию различных мишеней — аналогов планетного вещества и проведению с ними измерений с применением прототипа активного нейтронного спектрометра, предназначенного для космических экспериментов. Авторы благодарят также О. А. Бакерина, С. С. Бездетного и В. Ю. Щеголева за помощь в работе и решении организационных вопросов.

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. *Mitrofanov I. et al.* Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector // *Mars Odyssey, Science.* 2002. V. 297, No. 5578. P. 78–81.
3. *Mitrofanov I. et al.* Experiment LEND of the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter for High-Resolution Mapping of Neutron Emission of the Moon // *Astrobiology.* 2008. V. 8, No. 4. P. 793–804.
4. *Mitrofanov I. G. et al.* Lunar Exploration Neutron Detector for the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150, Nos. 1–4. P. 183–207; doi:10.1007/s11214-009-9608-4.
5. *Kozyrev A. S. et al.* Gamma-Rays and Neutron Spectrometers NS HEND — Tool for Study of Phobos Surface Composition // 40th Lunar and Planetary Sci. Conf. 2009. Abstract # 1865.
6. *Третьяков В. И. и др.* Первый этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции // *Косм. исслед.* 2010. Т. 48, вып. 6. С. 291.
7. *Лутвак М. Л. и др.* 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).
8. *Fedosov F. S.* Experiment BTN-Neutron Onboard ISS // 40th COSPAR Sci. Assembly, Moscow, Aug. 2–10, 2014. Abstract F2.3-0013-14.
9. *Litvak M. L. et al.* The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory // *Astrobiology.* 2008. P. 8, No. 3. P. 605–612.
10. *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.
11. *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.
12. *Malakhov A. V. et al.* Fine Resolution Neutron Detector for ExoMars Trace Gas Orbiter. Instrument and Science Goals // 40th COSPAR Sci. Assembly, Moscow, Aug. 2–10, 2014. Abstract B0.2-19-14.
13. *Nikiforov S. Y.* Subsurface Water Observations on Mars: From DAN/Curiosity to Adron-RM/ExoMars // *Ibid.* Abstract B0.2-37-14.
14. *Golovin D. V. et al.* Neutron Activation Analysis on the Surface of the Moon and Other Terrestrial Planets // *Ibid.* Abstract B0.1-43-14.
15. *Loef E. V. D. et al.* High-Energy-Resolution Scintillator: Ce^{3+} Activated $LaBr_3$ // *Optics Commun.* 2001. V. 79. P. 1573.
16. *Iyudin A. F. et al.* Peculiarities of Intrinsic Background in $LaBr_3:Ce$ and $CeBr_3$ Scintillating Crystals // *Instr. Exp. Techn.* 2009. V. 52. P. 774–781.
17. *Hansson C. C. T. et al.* Development of Low Noise Scintillator Crystals for Planetary Space Missions // *Nucl. Sci. Symp. Medical Imaging Conf. (NSS/MIC), IEEE,* 2012. P. 927–930. doi:10.1109/NSSMIC.2012.6551242.
18. *Goldsten J. O. et al.* The MESSENGER Gamma-Ray and Neutron Spectrometer // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 131. P. 339–391.
19. *Masarik J., Reedy R. J.* // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 18891.
20. *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.

21. *Feldman W. C. et al.* Global Distribution of Neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // *Science*. 2002. V. 297, No. 5578. P. 75–78.
22. *Mitrofanov I. et al.* Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // *Ibid.* P. 78–81.
23. *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.
24. *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.
25. *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 // *Ibid.* No. 6. P. 1259–1275.
26. *Литвак М.Л. и др.* Наземные испытания научных приборов ядерной планетологии на экспериментальном стенде в ОИЯИ // *Письма в ЭЧАЯ*. 2015. Т. 13, № 2(200). С. 368.
27. *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.
28. *Bell J. F.* *The Martian Surface. Composition, Mineralogy and Physical Properties.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008.

Получено 29 сентября 2015 г.