
НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА

СОТРУДНИЧЕСТВУ ИКИ–ОИЯИ 25 ЛЕТ

*Г. Н. Тимошенко^{а, б, 1}, М. Л. Литвак^в, И. Г. Митрофанов^в,
В. Н. Швецов^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^в Институт космических исследований РАН, Москва

Сотрудничеству Института космических исследований РАН и Объединенного института ядерных исследований в области ядерной планетологии исполнилось 25 лет. Со стороны ОИЯИ участие в работах принимают сотрудники ЛНФ и ЛРБ. За это время был разработан ряд космических приборов с использованием методов гамма- и нейтронной спектроскопии, для которых в ОИЯИ были проведены детальные наземные калибровки на различных источниках излучения и моделях планетарного грунта. Большая часть этой научной аппаратуры уже успешно работает на борту орбитальных и посадочных космических аппаратов, предоставляя уникальные научные данные о наличии и распределении воды (льда) на поверхности Луны и Марса и об элементном составе грунта.

The collaboration of the Space Research Institute of RAS and the Joint Institute for Nuclear Research in the field of nuclear planetology is 25 years old. JINR laboratories, FLNP and LRB take part in the work. During this time, a number of space instruments were developed using the methods of gamma and neutron spectroscopy, for which detailed ground-based calibrations were carried out at JINR on various radiation sources and planetary soil models. Most of this scientific equipment is already successfully operating on board orbital and landing spacecrafts, providing unique scientific data on the presence and distribution of water (ice) on the surface of the Moon and Mars and about the ground elemental composition.

PACS: 29.30.Hs; 76.80.+y

ЯДЕРНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ — ОБЛАСТЬ СОТРУДНИЧЕСТВА ОИЯИ И ИКИ РАН

Формирование ядерной планетологии как новой научной дисциплины связано с началом активной фазы изучения Солнечной системы с помощью межпланетных аппаратов. В конце 1950-х — начале 1960-х гг. под руководством академика А. П. Виноградова в СССР начинает разрабатываться космохимическое направление в исследовании тел Солнечной системы. На Институт геохимии и аналитической химии АН СССР были возложены разработки методов, аппаратуры и проведение исследований вещества тел Солнечной системы. Главным конструктором института был профессор

¹E-mail: tim@jinr.ru

Ю. А. Сурков. Первый практический результат — данные о гамма-излучении с поверхности Луны — был получен в апреле 1966 г. гамма-спектрометром, установленным на борту советской станции «Луна-10» [1]. В США пионерами исследований лунной радиации были Дж. Арнольд и Дж. Тромбка [2]. В процессе работы американских лунных миссий Apollo в 1971 и 1972 гг. был получен большой объем данных об элементном составе поверхности Луны. Кроме этого, в 1970-х гг. активно проводились гамма-измерения на советских венерианских миссиях [3]. С середины 1980-х гг. в исследование планет и малых тел Солнечной системы с использованием гамма-спектрометрических методов активно включился Институт космических исследований РАН. Так, в 1989 г. впервые в космической истории был измерен спектр гамма-излучения от Марса с помощью советско-французского гамма-спектрометра ВГС, разработанного под руководством И. Г. Митрофанова и установленного на борту межпланетной станции «Фобос-2» [4].

Применение методов ядерной физики в исследованиях поверхностей планет и малых тел Солнечной системы дает возможность получения достоверной информации об элементном составе приповерхностных (до глубины 1–2 м) слоев планетарного грунта, что недоступно для других методов, используемых в космическом эксперименте. Впервые термин «ядерная планетология» был предложен Митрофановым в 2014 г. во время преобразования Лаборатории гамма-спектрометрии в Отдел ядерной планетологии Института космических исследований РАН с учетом совокупности научных достижений, полученных космическими нейтронными и гамма-спектрометрами в области исследования планет Солнечной системы. За неполные 30 лет были разработаны 8 приборов для исследования поверхностей небесных тел (в основном Луны и Марса) с бортов как орбитальных, так и посадочных аппаратов (стационарные посадочные станции и марсоходы). Часть российских экспериментов реализована на аппаратах НАСА и ЕКА на основе межправительственных соглашений «Роскосмоса» и национальных космических агентств США и Европы. Практически все приборы Отдела ядерной планетологии были созданы в тесном сотрудничестве с учеными Объединенного института ядерных исследований. Описанию 25-летней истории этого сотрудничества и посвящена данная статья.

Методологические основы ядерной планетологии базируются на гамма- и нейтронной спектроскопии грунта. Поверхности планет, не имеющих значительной атмосферы и магнитного поля, постоянно облучаются потоком высокоэнергетичных заряженных частиц, идущих из глубин космоса (галактических космических лучей — ГКЛ). Гамма-спектрометр измеряет суммарный фон гамма-квантов из поверхностного слоя грунта, обусловленный наличием в нем естественных радиоактивных радионуклидов, мгновенных гамма-квантов от реакций проникающих в грунт частиц ГКЛ и их продуктов (главным образом нейтронов) и распада образующихся в грунте нестабильных радионуклидов (см., например, [5]). Расшифровка спектра характеристических гамма-линий дает представление об элементном составе вещества. Например, убедительным свидетельством присутствия в грунте водорода является линия с энергией 2,223 МэВ в спектре гамма-излучения с поверхности в результате реакции радиационного захвата протоном теплового нейтрона, что с большой долей вероятности говорит о наличии в составе грунта воды в виде льда или вечной мерзлоты [6].

Нейтронная спектроскопия основана на технологиях ядерной геологии и ядерной геофизики, применяемых для поиска ископаемых на Земле, в частности при нейтрон-

ном каротаже. В результате ядерных взаимодействий частиц ГКЛ в приповерхностном слое грунта рождаются нейтроны широкого спектра энергий. Сталкиваясь с ядрами вещества, нейтроны теряют свою энергию и замедляются. Значительная часть таких нейтронов после многих столкновений вылетает из грунта (нейтронное альbedo) и достигает околопланетного космического пространства. Спектр альбедных нейтронов зависит от состава грунта, особенно от наличия в нем воды, поскольку наиболее эффективно нейтроны теряют энергию в упругих столкновениях с ядрами водорода [7].

На рис. 1 представлены расчетные спектры альбедных нейтронов из грунта (марсианский реголит) в зависимости от весового содержания в нем воды (спектры нормированы на единственный флюенс).

Видно, что с увеличением содержания воды в спектре возрастает доля тепловых нейтронов и снижается доля эпитепловых и промежуточных нейтронов. Таким образом, на основе регистрации нейтронов в различных энергетических диапазонах можно уверенно судить о присутствии в грунте водорода (водяного льда), оценивать его количество и распределение по глубине [8].

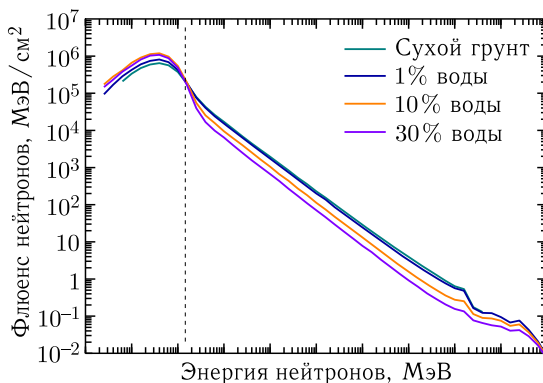


Рис. 1. Спектр альбедных нейтронов с поверхности Марса в зависимости от весового содержания воды в марсианском грунте

ПРИБОР HEND. НАЧАЛО СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

История сотрудничества Отдела планетологии ИКИ и ОИЯИ началась в 1997 г. в связи с разработкой нейтронного прибора HEND для миссии НАСА «Марс-Одиссей-2001». Нейтронный спектрометр HEND (High Energy Neutron Detector) предназначался для картографирования спектральной плотности потока альбедных нейтронов от поверхности Марса для оценки массовой доли водяного льда и химически связанной воды в приповерхностном слое грунта [9].

В 1997 г. руководитель эксперимента HEND И. Г. Митрофанов пригласил специалистов Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Ю. П. Попов, Л. Б. Пикельнер и В. Н. Швецов) принять участие в подготовке данного эксперимента в части выбора оптимальных нейтронных детекторов (с учетом поставленных научных задач и имеющихся ограничений по массе) и проведении наземных калибровок. Вскоре к ним присоединились сотрудники Лаборатории радиационной безопасности ОИЯИ (Г. Н. Тимошенко и А. Р. Крылов). В результате совместной работы была принята следующая концепция прибора HEND, позволившая детектировать на орбите альбедные нейтроны различных энергетических групп.

HEND состоит из 4 детекторов нейтронов, которые вместе перекрывают широкий интервал энергии нейтронов — от 0,4 эВ до 15 МэВ. 3 детектора представляют собой

набор из ^3He -счетчиков медленных нейтронов (SD, MD, LD), окруженных кадмием и слоями полиэтилена разной толщины для формирования их чувствительности в разных энергетических диапазонах выше кадмиевого порога. Четвертый детектор — однокристалльный спектрометр быстрых нейтронов на основе стибьена (SC), окруженного детектором антисовпадений для режекции регистрации заряженных частиц. Разделение отсчетов от протонов отдачи, производимых нейтронами, от отсчетов от электронов, производимых гамма-лучами, осуществляется по форме импульса. На рис. 2 показан схематический вид прибора и представлены расчетные функции его чувствительности в сравнении с результатами калибровки прибора на электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ с Li-, D- и T-мишенями.

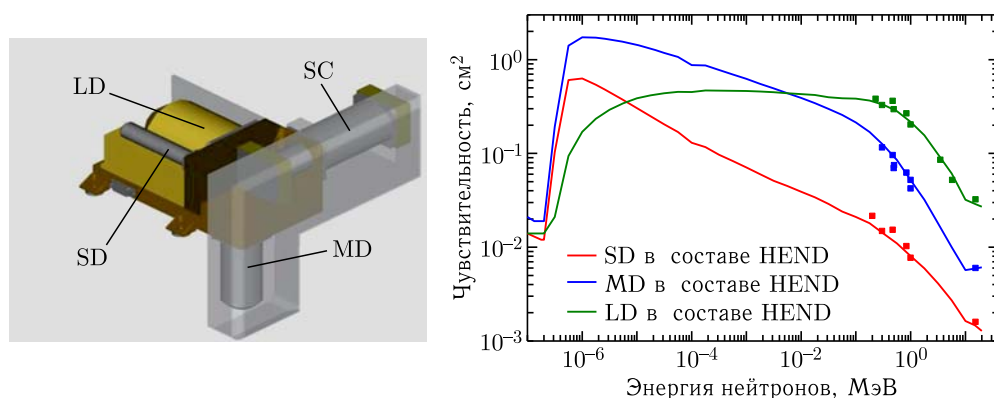


Рис. 2. Схематический вид прибора HEND и функции чувствительности его детекторов в сравнении с результатами градуировки прибора на пучках нейтронов ЭГ-5 ЛНФ

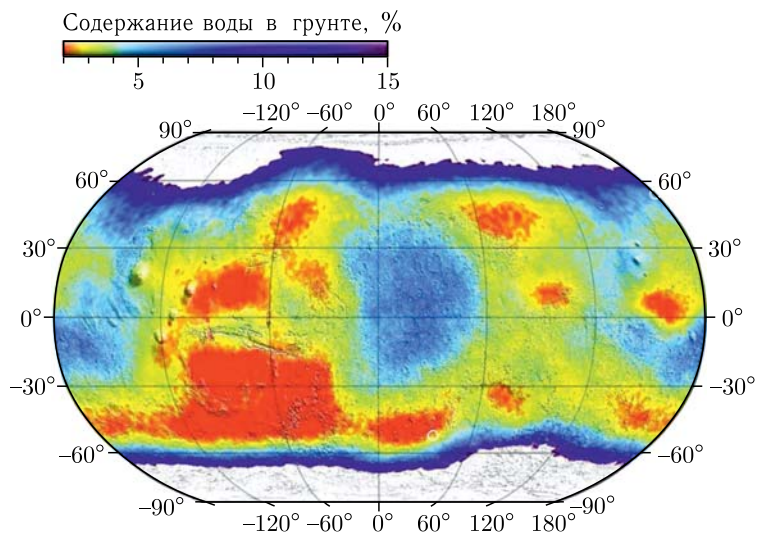


Рис. 3. «Летняя» карта распределения водяного льда и связанной воды в марсианском грунте, по данным прибора HEND. Белым цветом отмечено, где доминирует водяной лед

Космический аппарат НАСА «Марс-Одиссей» с прибором HEND на борту стартовал 07 апреля 2001 г., а картографирование поверхности планеты с полярной орбиты высотой 400 км началось в феврале 2002 г. и успешно продолжается до сих пор.

На основе данных HEND впервые было обнаружено, что вокруг полярных шапок Марса имеются обширные районы подповерхностной вечной мерзлоты с высоким содержанием водяного льда [10]. Благодаря многолетней работе был также изучен сезонный цикл Марса и выполнены оценки, показывающие, как меняется масса осаждаемой углекислоты в сезонных шапках Марса в зависимости от времени года [11]. Оценки массовой доли грунтовой воды, по данным прибора HEND (рис. 3), были также подтверждены результатами измерений германиевого гамма-спектрометра GRS (по линии реакции радиационного захвата с энергией 2,2 МэВ) и данными нейтронного спектрометра NS, разработанных американскими коллегами и установленных на борту космического аппарата «Марс-Одиссей» [6, 12].

ПЕРВЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ НЕЙТРОННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Еще одним уникальным проектом, в реализации которого принимал участие ОИЯИ, является прибор LEND (Lunar Exploration Neutron Detector) на борту лунного разведывательного орбитера НАСА LRO, запущенного к Луне в июне 2009 г. [13]. Российский прибор LEND был отобран в НАСА на конкурсной основе как первый в истории космических исследований нейтронный телескоп с высоким пространственным разрешением.

Методика коллимирования позволяла картографировать поток эпитепловых нейтронов с поверхности Луны с разрешением около 10 км с орбиты высотой 50 км, что дало возможность изучить локальные участки, где может находиться водяной лед [14].

Комплекс детекторов LEND состоит из 9 пропорциональных ^3He -детекторов для измерения потоков тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов. Четыре коллимированных детектора эпитепловых нейтронов CSETN1–CSETN4 находятся внутри коллиматора, состоящего из обогащенного ^{10}B и полиэтилена. На верхней стороне коллиматора расположены всенаправленные детекторы тепловых нейтронов (STN1–STN3) и эпитепловых нейтронов (SETN). Детекторы STN1 и STN3 представляют собой так называемый доплеровский фильтр, основанный на сопоставлении скорости тепловых нейтронов со скоростью орбитального аппарата. Детекторы STN2 и SETN измеряют локальное поле тепловых и эпитеп-

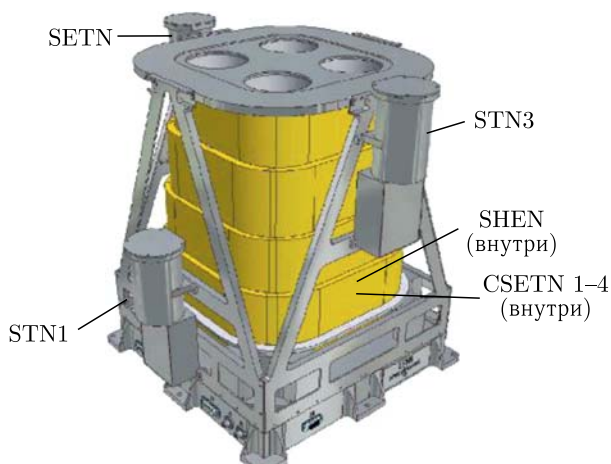


Рис. 4. Схематический вид прибора LEND

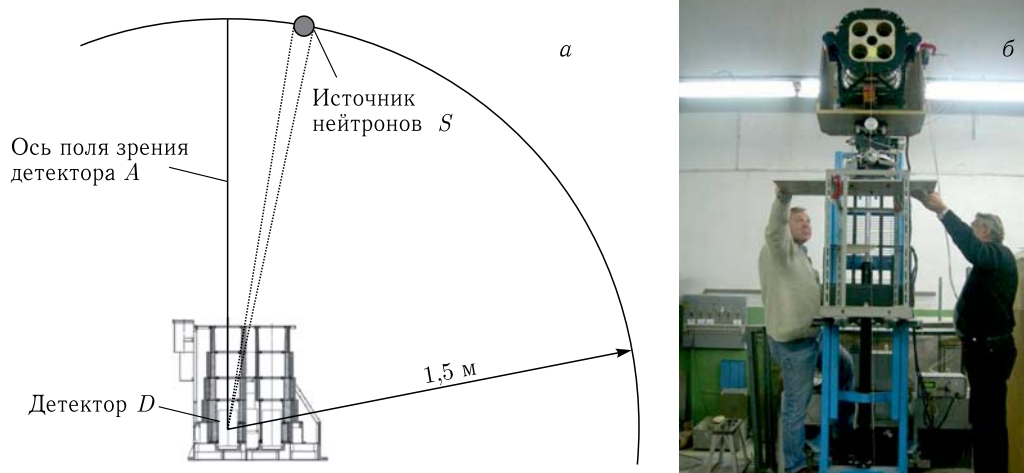


Рис. 5. а) Схема измерения коллимационной эффективности летных образцов ЛО-01 и ЛО-02 прибора LEND с помощью изотопного нейтронного источника; б) В. Н. Швецов и Г. Н. Тимошенко проводят градуировку прибора LEND

ловых нейтронов вокруг аппарата. Детектор SHEN находится во внутреннем пространстве между коллиматорами и измеряет поток нейтронов в диапазоне энергии от 0,3 до 15 МэВ. Он представляет собой копию аналогичного сцинтилляционного детектора на основе кристалла стибьена для прибора HEND. На рис. 4–6 представлен схематический вид прибора LEND, схема и фото проведения физических калибровок в ОИЯИ [15].



Рис. 6. Установка для проведения в ОИЯИ калибровок летных образцов ЛО-01 и ЛО-02 прибора LEND в экспериментальном зале реактора ИБР-2

Все физические калибровки прибора LEND осуществлялись в ОИЯИ на специально созданных стендах (см. рис. 5 и 6). Для проведения калибровок прибора LEND был использован источник ^{252}Cf , помещенный в полиэтиленовую сферу диаметром 7,6 см. Размер и материал сферы были подобраны специалистами ОИЯИ таким образом, чтобы численная модель спектра нейтронов, излучаемых с поверхности сферы,

Рис. 7. Расчетные энергетические спектры потока нейтронов в энергетических бинах: 1 — для источника, использованного при проведении калибровок; 2 — для потока нейтронов от Луны [15]

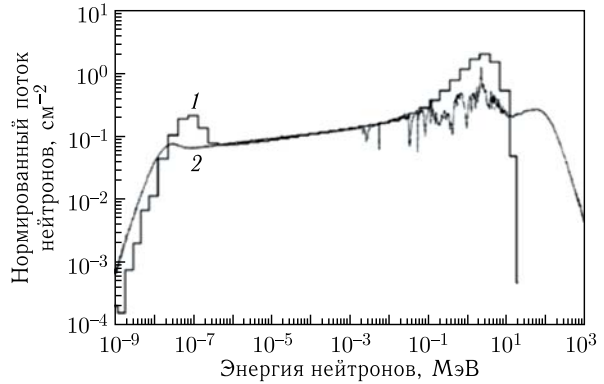
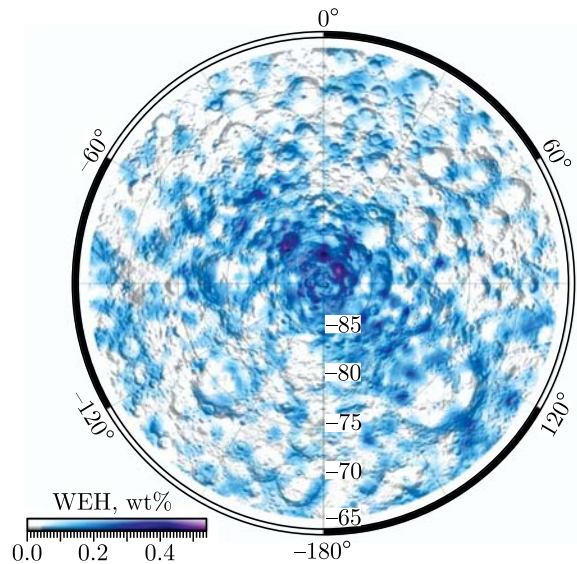


Рис. 8. Карта распространности воды на южном полюсе Луны, по данным нейтронного телескопа LEND [17]



достаточно хорошо совпадала с расчетным спектром нейтронного альbedo Луны в диапазоне $4 \cdot 10^{-7} - 10^{-3}$ МэВ, в котором коллимированные детекторы CSETN1–CSETN4 имели максимальную чувствительность (рис. 7 [15]).

По данным прибора LEND построены полярные карты распределения водяного льда, которые показали, что вода присутствует в реголите полярных районов Луны (рис. 8 [16, 17]). Важным результатом является вывод о том, что водяной лед присутствует не только в «холодных ловушках» на дне постоянно затененных кратеров, но и в освещаемых областях, где лед может сохраняться на глубине от единиц до десятков сантиметров [18]. Прибор LEND также штатно работает до сих пор в составе орбитера LRO.

На основе успешного опыта эксперимента с прибором LEND на окололунной орбите в 2016 г. был создан аналогичный нейтронный телескоп FRENД (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector) для совместной марсианской орбитальной миссии Европейского космического агентства и «Роскосмоса» EхоMars Trace Gas Orbiter (рис. 9).



Рис. 9. Летный образец прибора FRENД

Аппарат был запущен в 2016 г., а в 2018 г. начато картографирование поверхности Марса [19]. Для калибровки прибора в ОИЯИ была использована та же методика и стенды, что и для прибора LEND.

СПЕКТРОСКОПИЯ ГАММА-КВАНТОВ И НЕЙТРОНОВ В ОДНОМ ПРИБОРЕ

В 2008–2011 гг. ИКИ РАН и ОИЯИ начали активно обсуждать создание компактных космических гамма-спектрометров и методы их наземных калибровок на стендах ОИЯИ. В это время стали коммерчески доступны большие кристаллы сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, который имеет наилучшее спектральное разрешение ($< 3\%$ при энергии 661 кэВ) среди всех сцинтилляционных детекторов, что сделало его кандидатом номер один для использования в космических миссиях, где сложно применять спектрометр на основе высокочистого германия.

Ранее детектор $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ не применялся в условиях космического эксперимента, поэтому необходимо было убедиться в его радиационной стойкости. Эти исследования были выполнены на пучке протонов фазотрона ЛЯП путем исследования спектрометрических характеристик детектора и изменения прозрачности кварцевых стекол на спектрофотометре после облучения протонами с энергией 200 МэВ дозой до 60 крад.

Непростая задача также возникла при градуировке энергетической шкалы гамма-спектрометра. Энергетический диапазон гамма-квантов из грунта, образованных в реакциях радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов в грунте (генерированных ГКЛ), простирается до ~ 10 МэВ, а энергии природных эталонных источников гамма-квантов — до $\sim 2,5$ МэВ. Поэтому для градуировки спектрометра в области больших энергий квантов использовались ядерные реакции с изотопными источниками нейтронов и мишенями из различных материалов (Fe, Ni) в условиях открытой геометрии и в низкофоновой защите. Для термализации нейтронов между источником и мишенью помещался замедлитель (H_2O).

Полученный опыт пригодился при создании следующего поколения космических гамма-спектрометров, первым из которых стал прибор MGNS (Mercurial Gamma-ray

and Neutron Spectrometer), предназначенный для установки на борт миссии BepiColombo Европейского космического агентства, направленной к Меркурию [20]. Его предшественником был аппарат НАСА «Мессенджер», работавший на орбите Меркурия в 2011–2015 гг. [22].

Основными задачами эксперимента MGNS является поиск водяного льда в полярных областях Меркурия (по аналогии с Луной) и определение элементного состава приповерхностных слоев грунта на глубине до 1 м. В состав прибора были включены детекторы тепловых, эпитепловых, быстрых и сверхбыстрых нейтронов, а также гамма-спектрометр. К сожалению, присущая $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ внутренняя радиоактивность детектора (главным образом из-за ^{138}La и ^{40}K) мешала идентификации гамма-линий в области энергии от 0,6 до 3 МэВ, поэтому было принято решение о замене детекто-



Рис. 10. Градуировка нейтронных детекторов MGNS в открытой геометрии (слева) и градуировка гамма-спектрометра MGNS на пучке тепловых нейтронов ИБР-2 (справа)

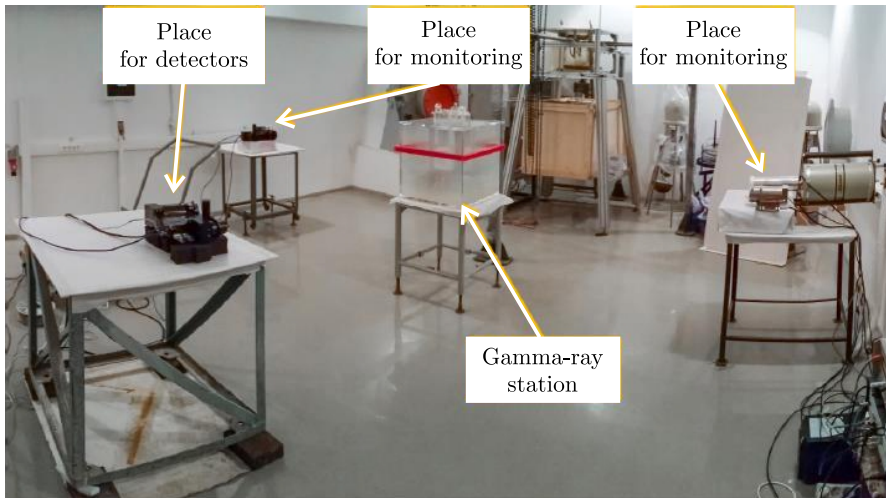


Рис. 11. Установка (на фото в центре) для калибровки энергетической шкалы гамма-спектрометра MGNS (на фото слева) по линиям радиационного захвата. В качестве контроля используется прецизионный германиевый гамма-спектрометр (на фото справа)

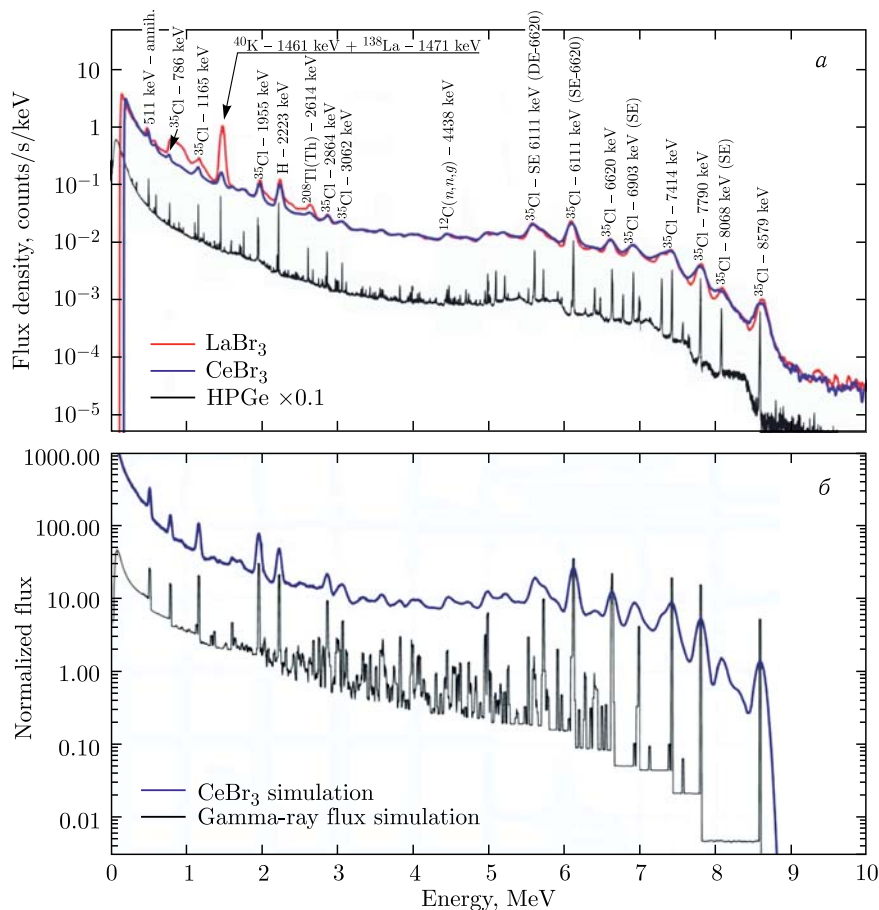


Рис. 12. Сравнение спектрометрических свойств гамма-спектрометра MGNS на основе кристалла LaBr₃(Ce) и кристалла CeBr₃. В качестве реперного сравнения также представлены данные с прецизионного германиевого гамма-спектрометра (а) и результаты численного моделирования (б) (см. [21])

ра LaBr₃(Ce) в MGNS на другой инновационный кристалл-детектор CeBr₃ со схожим энергетическим разрешением, но лишенный указанного недостатка [21].

Работа с MGNS в ОИЯИ началась в 2015 г. Была выполнена градуировка нейтронных детекторов с помощью радионуклидных источников нейтронов, а гамма-спектрометра — по характеристическим линиям реакций быстрых и тепловых нейтронов с веществом мишеней (рис. 10). Для генерации линий из реакций радиационного захвата нейтронов использовался пучок тепловых нейтронов реактора ИБР-2.

Для калибровки прибора была также создана специальная лабораторная установка для генерации тепловых нейтронов путем замедления быстрых нейтронов в соленой воде и формирования характеристических линий от реакций радиационного захвата тепловых нейтронов $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ и реакций неупругого рассеяния быстрых нейтронов $^{35}\text{Cl}(n, n'\gamma)^{35}\text{Cl}^*$ (см. рис. 11 и 12 [21]).

Аппарат *BepiColombo* стартовал к Меркурию 20.10.2018 г. и должен прибыть к месту назначения только через 7 с лишним лет, выйдя на полярную эллиптическую орбиту с расстояниями до поверхности около 400 км и 1500 км в перигеуме и апогеуме соответственно. Сейчас *MGNS* работает в процессе полета. Его детекторы измеряют фон космического аппарата, регистрируют космические гамма-всплески, а также измеряют первые спектры нейтронов и гамма-лучей от Меркурия и Венеры во время пролетов аппарата вблизи этих планет [20].

КОСМИЧЕСКИЙ НЕЙТРОННЫЙ КАРОТАЖ

Крупным проектом Отдела ядерной планетологии ИКИ РАН, в который внес большой вклад ОИЯИ, является активный нейтронный детектор *DAN* (*Dynamic Albedo of Neutrons*), предназначенный для установки на американском мобильном аппарате (*rover*) *Mars Science Laboratory* НАСА, получившем позднее название *Curiosity* [23]. Основной научной задачей исследований на борту марсохода НАСА *Curiosity* является выяснение вопроса о том, была ли природная среда раннего Марса благоприятной для возникновения и поддержания примитивных форм жизни. Для этого было выбрано место посадки в экваториальном кратере Гейл, имеющего возраст около 3,8 млрд лет. В раннюю эпоху эволюции Марса в нем находилось озеро и накапливались осадочные отложения, по которым можно установить, как менялся климат на Марсе.

Чтобы исследовать, как сейчас распределена вода в приповерхностном слое на дне кратера и в толще осадочных отложений, в состав марсохода была включена российская научная аппаратура *Dynamic Albedo of Neutrons* (*DAN*) [24]. При ее разработке был использован принцип оценки наличия водородсодержащих веществ в грунте, используемый в нейтронном каротаже.

Научная аппаратура *DAN* состоит из двух отдельных блоков: блока электроники и детекторов *DAN* (*ДАН-ДЭ*), разработанного в ИКИ РАН, и блока импульсного нейтронного генератора (*ДАН-ИНГ*), разработанного во ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова».

Блок *ДАН-ДЭ* включает два нейтронных детектора на основе ^3He пропорциональных счетчиков, позволяющих измерять поток тепловых и эпитепловых нейтронов с высоким временным разрешением (с кадмиевым экраном и без него).

Блок импульсного нейтронного генератора (*ДАН-ИНГ*) позволяет генерировать импульсы быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ (10^7 нейтронов за импульс) с частотой до 10 Гц в результате ядерной реакции $\text{D} + \text{T} \rightarrow ^4\text{He} + n$.

В активном режиме работы генератор облучает поверхность под марсоходом короткими импульсами нейтронов. Быстрые нейтроны взаимодействуют с ядрами основных породообразующих элементов, снижая энергию до эпитепловых и тепловых значений. Но в приборе *DAN* присутствие водородсодержащего вещества в грунте обнаруживается не в результате сопоставления количества альбедных нейтронов в разных энергетических группах, а по изменению временного распределения моментов прихода альбедных нейтронов в детектор после импульса генератора, т. е. временного профиля (с характерной длительностью от сотни микросекунд до нескольких миллисекунд), который называется динамическим альбеде нейтронов. В условиях Марса основной фактор содержания водорода в грунте — это прежде всего связанная вода

или водяной лед. Разная концентрация и распределение по глубине ядер водорода существенно влияет на процесс замедления нейтронов, поэтому анализ формы временного профиля альбедных нейтронов позволяет восстановить концентрацию воды и ее распределение по глубине. Импульсный нейтронный генератор и блок регистрации нейтронов показаны на рис. 13.

Генератор ДАН-ИНГ и блок детектирования нейтронов ДАН-ДЭ с электроникой смонтированы по разные стороны ровера Curiosity (рис. 14).

Отработки новой методики физической калибровки проводились в ОИЯИ как в полевых условиях, так и на простейших моделях марсианского грунта, в которых вода имитировалась слоями полиэтилена различной толщины, а сам грунт — силикатным кирпичом (рис. 15).

Результаты первых экспериментов по отработке методики DAN в ОИЯИ показали, что проводить тестирование и калибровку прибора необходимо, моделируя марсианский грунт с разным содержанием воды. Поэтому остро встал вопрос о создании специализированного стенда, удовлетворяющего требованиям радиационной безопасности, для испытаний DAN и ему подобных приборов на моделях-аналогах планетного грунта с хорошо известным элементным составом. Различные материалы, исследованные для моделирования реголита (кирпич, бетон, гранит, песок и т. д.), не удовлетворяли условиям эксперимента DAN по двум причинам. Во-первых, они плохо воспроизводили элементный состав марсианского грунта, представляющего собой смесь раз-

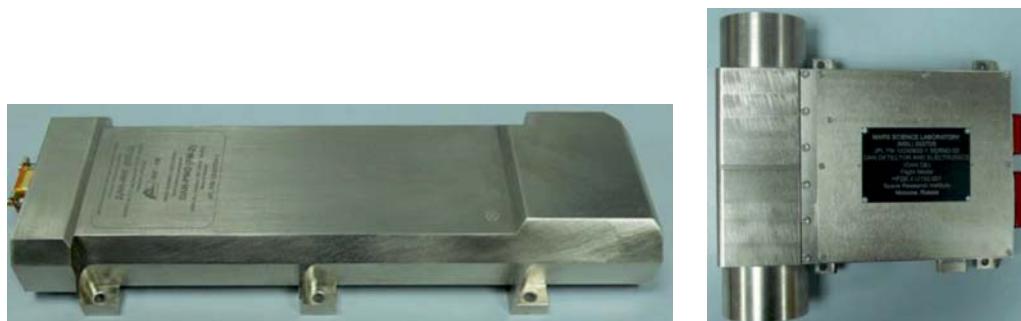


Рис. 13. Нейтронный генератор (слева) и блок детекторов ДАН (справа)

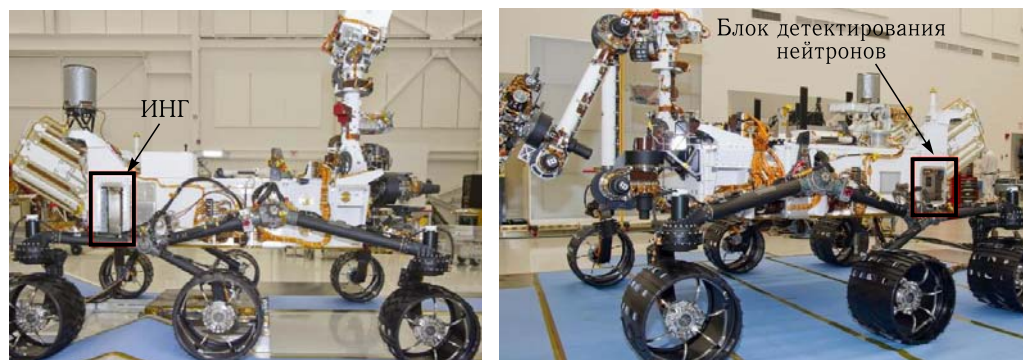


Рис. 14. Ровер Curiosity с прибором DAN



Рис. 15. а) Полевые испытания на территории площадки ЛЯП с макетом ДАН. б) Прототип модели марсианского грунта со слоем льда (полиэтилена) в глубине кирпичной сборки

личных оксидов. Во-вторых, в них содержалось неопределенное количество химически связанной воды, а для градуировки прибора DAN и определения его чувствительности в реальных условиях нужно было иметь абсолютно сухой материал. В качестве такого базового материала было решено выбрать силикатное стекло, которое в силу самой технологии его получения исключает заметное содержание в нем молекул воды или газообразного водорода и которое представляет собой наиболее распространенный на Марсе оксид кремния. Химический состав листового оконного стекла был с большой точностью определен во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья.

Чтобы воспроизвести усредненный состав приповерхностного марсианского грунта, оцененный по данным предыдущих миссий НАСА, помимо слоев стекла в модель марсианского грунта были добавлены тонкие листы железа, алюминия и поливинилхлорида.

В соответствии с нормами радиационной безопасности при работе с нейтронным генератором такой мощности вокруг него должна быть оборудована радиационная зона, обеспеченная радиационным контролем, сигнализацией и блокировкой помещения, в котором работает генератор. Еще одним требованием к помещению для работы с генератором и к размещению модели планетного грунта был минимальный фон рассеянных в окружающей среде нейтронов. Поэтому для стенда DAN был построен вблизи здания ЛРБ № 71, на территории, где отсутствуют другие постройки, легкий ангар из тонкого листового железа, и вокруг него оборудована санитарно-защитная радиационная зона радиусом 25 м. Пульт управления стендом размещен в здании № 71. Внутри ангара и на его границе размещены гамма- и нейтронные датчики автоматизированной системы радиационного контроля.

Модель планетного грунта, собранная внутри стенда DAN, представляет собой сборку из слоев стекла площадью $3,21 \times 3,82$ м, с суммарной толщиной до 1,05 м (вес до 32 т). Слои воды (льда) имитируются слоями листового полиэтилена толщиной по 1 см каждый между слоями стекла. Размещая слои полиэтилена на разной глубине, можно моделировать слоистый состав планетного грунта. Схема размещения стенда и вид модели планетного грунта в ангаре показаны на рис. 16. Результаты тестирования методики DAN на стенде представлены в работах [25, 26].

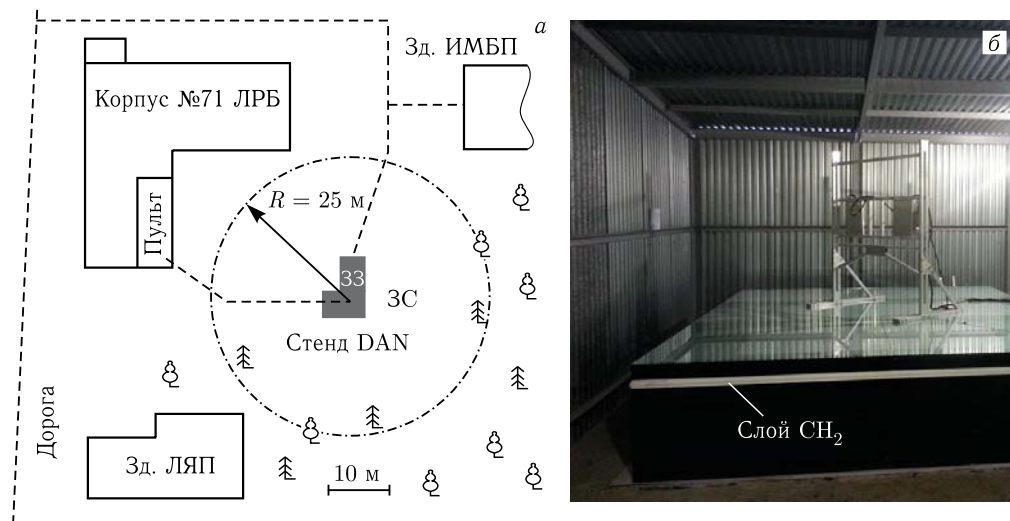


Рис. 16. а) Размещение стенда DAN на площадке ЛЯП (ЗЗ — зона запрета, ЗС — зона спецдопуска). б) Модель планетарного грунта внутри стенда (на специальной ферме закреплены генератор и блок детекторов DAN). Слой полиэтилена моделирует слой подповерхностного водяного льда

Запуск аппарата Mars Science Laboratory НАСА состоялся в ноябре 2011 г., а в августе 2012 г. аппарат сел на поверхность Марса в кратере Гейла. С тех пор Curiosity успешно работает (как и DAN) на Марсе, многократно превысив расчетный срок своей деятельности и пройдя путь более 25 км. График измерения содержания воды в грунте вдоль трассы движения Curiosity показан на рис. 17.

Кроме работ с прибором DAN на экспериментальном стенде проводились физические калибровки с прибором ADRON-RM, разработанным в ИКИ РАН на основе опыта создания аппаратуры DAN специально для марсохода Rosalind Franklin [28]. Этот марсоход будет запущен к Марсу в ходе второго этапа реализации миссии ExoMars в 2021 г. [27]. ADRON-RM предназначен для регистрации естественного нейтронного альbedo Марса, поиска водорода и водородсодержащих соединений в грунте. ADRON-RM наследует конструкцию блока детектирования DAN и будет работать только в пассивном режиме без генератора (его оказалось невозможно установить на марсоход из-за существенных ограничений по массе научной аппаратуры). В этом случае источником нейтронов в грунте будут только частицы ГКЛ. Прибор ADRON-RM показан на рис. 18.

Стенд калибровок прибора DAN с мишенью-аналогом марсианского грунта был также использован для исследований возможностей активных космических гамма-спектрометров для определения элементного состава приповерхностного грунта по характеристическим гамма-линиям. В состав таких приборов, как DAN, добавляется гамма-спектрометр, который позволяет регистрировать гамма-спектры из грунта в различных временных окнах после нейтронного импульса. Такой подход был использован в приборе ADRON-ЛГ, представляющем собой активный космический ней-

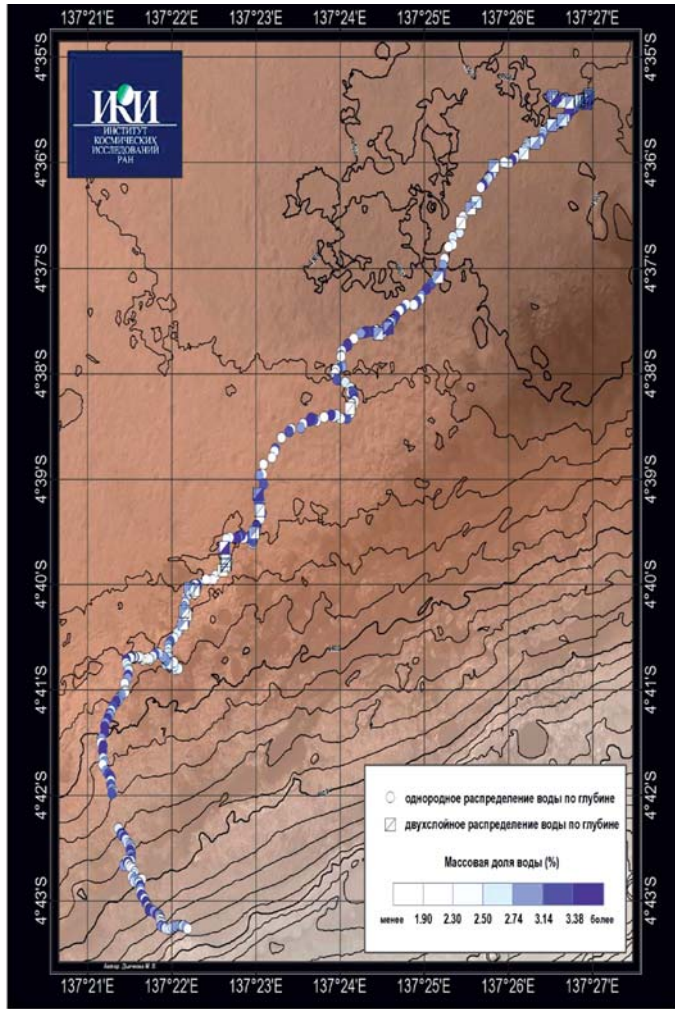


Рис. 17. График измерения содержания воды в грунте вдоль трассы движения марсохода с помощью прибора DAN

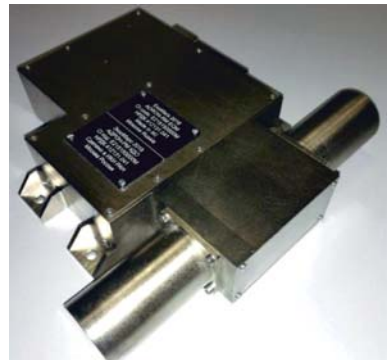


Рис. 18. Прибор ADRON-RM, прошедший физические калибровки на стенде DAN

тронный и гамма-спектрометр для российских лунных посадочных миссий. В настоящее время на стенде DAN ведутся работы по испытанию новых приборов для работы в составе будущих российских миссий «Луна-Глоб» («Луна-25») и «Луна-Ресурс» («Луна-27»), запланированных на 2022 и 2025 гг. соответственно.

ТЕСТИРОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДИК ДЛЯ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сотрудничество Отдела планетологии ИКИ РАН с ЛНФ и ЛРБ ОИЯИ осуществлялось не только по линии «Роскосмоса», но и в рамках совместных исследовательских проектов, поддержанных Российским научным фондом. В наиболее знаковом проекте, получившем поддержку РНФ, ИКИ РАН предложил новую методику регистрации гамма-излучения поверхности планет, основанную на регистрации гамма-квантов в коротком временном окне (десятки наносекунд) после регистрации заряженной частицы ГКЛ. Этот подход получил название метода меченых протонов [29]. С его помощью можно выделить определенный участок поверхности и регистрировать гамма-кванты только от него, что существенно улучшает соотношение сигнал-фон. Для тестирования метода на медицинском пучке протонов фазотрона ЛЯП с энергией 170 МэВ при участии сотрудников ЛЯП (Г. В. Мицын, А. Г. Молоканов, С. В. Швидкий) и ЛРБ (В. А. Крылов и Е. Е. Павлик) создана установка и проводятся макетные испытания (рис. 19).

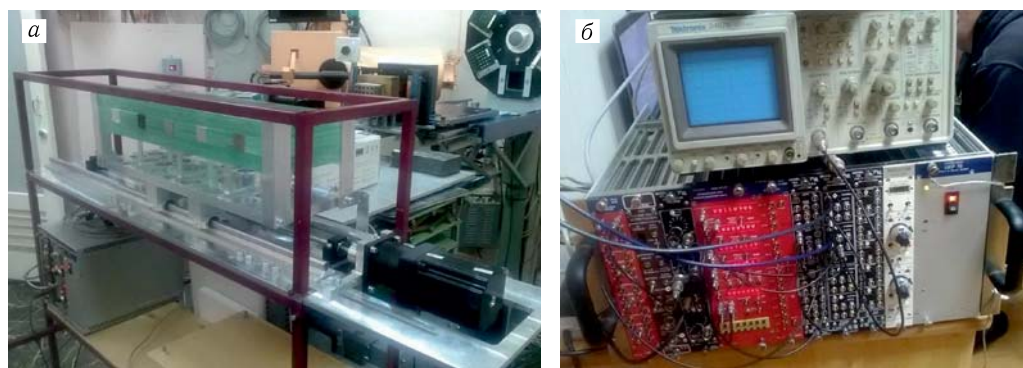


Рис. 19. а) Установка на пучке протонов фазотрона ЛЯП для отработки метода меченых протонов; б) электроника отбора событий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: СМОТРИМ В БУДУЩЕЕ С ОПТИМИЗМОМ

В результате многолетнего сотрудничества ИКИ–ОИЯИ сложилась команда специалистов-единомышленников, способная успешно решать многие амбициозные задачи, связанные с подготовкой космических экспериментов по исследованию различных объектов Солнечной системы. Вклад ОИЯИ заключался в математическом моделировании характеристик космических приборов, в участии в разработке физической схемы приборов, в подготовке и проведении калибровок образцов приборов на различных

источниках нейтронов, гамма-квантов и протонов. Для этого на территории ОИЯИ была создана экспериментальная база и разработаны уникальные методики наземных испытаний, позволяющие проводить тестирование и калибровку нейтронных и гамма-спектрометров различных типов, предназначенных как для работы на орбитальных аппаратах, так и на посадочных миссиях в составе стационарных платформ и планетоходов. В ОИЯИ находится зеркальный аналог марсианского прибора DAN, который воспроизводит его работу на Марсе и позволяет судить о его текущем состоянии. Успешно проведены калибровки более десятка различных ядерно-физических приборов, часть из которых уже отправлена в космос, успешно там работает и позволяет получать уникальные научные результаты о строении Луны и Марса.

За последние годы были успешно реализованы несколько совместных исследовательских проектов по созданию перспективных образцов ядерно-физических приборов, поддержанных Российским научным фондом, в которых ОИЯИ активно участвовал в части экспериментальной базы, в создании и реализации методик измерений. Некоторые из этих проектов продолжают до сих пор.

За 25 лет совместной работы было опубликовано более 50 совместных статей в ведущих мировых и российских журналах, представлены доклады на многочисленных научных конференциях в России и за рубежом.

Важно отметить, что сотрудничество ИКИ и ОИЯИ активно продолжается, расширяя свои границы. В совместных исследованиях все в большей степени участвует молодежь этих институтов, перенимая опыт старшего поколения. Уже в ближайшей перспективе мы планируем начать разработки новых научных приборов для российской лунной программы, для исследований Марса, спутников Юпитера и Сатурна, других небесных тел Солнечной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vinogradov A. P., Surkov Yu. A., Chernov G. M., Kirnozov F. F., Nazarkina G. B.* Measurements of Gamma Radiation of the Lunar Surface by the Luna-10 Space Station // *Cosmic Res.* 1966. V. 4. P. 751.
2. *Arnold J. R., Metzger A. E., Anderson E. C., van Dilla M. A.* Gamma Rays in Space // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67. P. 4878–4880.
3. *Surkov Yu. A. et al.* Investigations of Venusian Gamma Radiation by Venera 9 and Venera 10 // *Space Res.* 1977. V. XVII. P. 659–662.
4. *d’Uston C., Atteia J. L., Barat C., Chernenko A., Dolidze V., Dyatchkov A., Jourdain E., Khariukova V., Khavenson N., Kozlenkov A., Kucherova R., Mitrofanov I., Moskaleva L., Niel M., Pozanenko A., Scheglov P., Surkov Yu., Vilchinskaya A.* Observation of the Gamma-Ray Emission from the Martian Surface by the APEX Experiment // *Nature.* 1989. V. 341. P. 598.
5. *Masarik J., Reedy R. C.* Gamma-Ray Production and Transport in Mars // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 891–912.
6. *Boynnton W. V., Feldman W. C., Squyres S. W., Prettyman T. H., Bruckner J., Evans L. G., Reedy R. C., Starr R., Arnold J. R., Drake D. M., Englert P. A., Metzger A. E., Mitrofanov I., Trombka J., d’Uston C., Wanke H., Gasnault O., Hamara D. K., Janes D. M., Marcialis R. L., Maurice S., Mikheeva L., Taylor G. J., Tokar R., Shinohara C.* Distribution of Hydrogen in the Near Surface of Mars: Evidence for Subsurface Ice Deposits // *Science.* 2002. V. 297. P. 81–85.

7. Drake D. M., Feldman W. C., Jakosky B. M. Martian Neutron Leakage Spectra // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 6353–6368.
8. Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Козырев А. С., Санин А. Б., Третьяков В. И., Гриньков В. Ю., Бойнтон У. В., Шиохара К., Хамара Д., Саундерс Р. С. Оценка содержания воды в грунте Марса по данным нейтронных измерений прибора HEND на борту космического аппарата 2001 «Mars Odyssey» // Астрон. вестн. 2004. Т. 38, № 4. С. 291–303.
9. Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Козырев А. С., Санин А. Б., Третьяков В. И., Бойнтон У. В., Шиохара К., Хамара Д., Саундерс С., Дрейк Д. Поиск воды в грунте Марса по данным глобального картографирования потока нейтронов российским прибором HEND на борту американского аппарата 2001 «Mars Odyssey» // Астрон. вестн. 2003. Т. 37, № 5. С. 400–412.
10. Mitrofanov I. G. et al. Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector, «Mars Odyssey» // Science. 2002. V. 297. P. 78–81.
11. Litvak M. L. et al. Long-Term Observations of Southern Winters on Mars: Estimations of Column Thickness, Mass, and Volume Density of the Seasonal CO₂ Deposit from HEND/Odyssey Data // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. CiteID E03S13.
12. Feldman W. C. et al. Global Distribution of Neutrons from Mars: Results from «Mars Odyssey» // Science. 2002. V. 297. P. 75–78.
13. Chin G., Brylow S., Foote M., Garvin J., Kasper J., Keller J., Litvak M., Mitrofanov I., Paige D., Raney K., Robinson M., Sanin A., Smith D., Spence H., Spudis P., Stern S. A., Zuber M. Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission // Space Science Rev. 2007. V. 129, Iss. 4. P. 391–419
14. Mitrofanov I. G. et al. Lunar Exploration Neutron Detector for the NASA Lunar Reconnaissance Orbiter // Space Science Rev. 2010. V. 150, Nos. 1–4. P. 183–207.
15. Митрофанов И. Г., Федосов Ф. С., Санин А. Б., Бахтин Б. Н., Бойнтон У., Вострухин А. А., Головин Д. В., Козырев А. С., Литвак М. Л., Малахов А. В., McClanahan T., Мокроусов М. И., Нурдин И. О., Starr R., Третьяков В. И., Швецов В. Н., Шевченко В. В. Физическая калибровка космического нейтронного телескопа LEND: чувствительность и угловое разрешение // ПТЭ. 2016. № 4. С. 101–114.
16. 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.
17. Sanin A. B., Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Bakhtin B., Bodnarik J., Boynton W., Chin G., Evans L., Harshman K., Fedosov F., Golovin D., Kozyrev A., Livengood T., Malakhov A., McClanahan T., Mokrousov M., Starr R., Sagdeev R., Tret'yakov V., Vostrukhin A. Hydrogen Distribution in the Lunar Polar Regions // Icarus. 2017. V. 283. P. 20–30.
18. Mitrofanov I., Litvak M., Sanin A., Malakhov A., Golovin D., Boynton W., Droege G., Chin G., Evans L., Harshman K., Fedosov F., Garvin J., Kozyrev A., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Starr R., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Tret'yakov V., Trombka J., Varenikov A., Vostrukhin A. Testing Polar Spots of Water-Rich Permafrost on the Moon: LEND Observations Onboard LRO // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. CiteID E00H27.
19. Mitrofanov I., Malakhov A., Bakhtin B., Golovin D., Kozyrev A., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Tret'yakov V., Vostrukhin A., Anikin A., Zelenyi L. M., Semkova J., Malchev S., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Koleva R., Dachev T., Krastev K., Shvetsov V., Timoshenko G., Bobrovitsky Y., Tomilina T., Benghin V., Shurshakov V. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FRIEND) Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter // Space Science Rev. V. 214. 10.1007/s11214-018-0522-5.
20. Mitrofanov I. G. et al. The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) Onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission: Design Updates and First Measurements in Space // Space Science Rev. 2021. V. 217. id.67.

21. *Kozyrev A., Mitrofanov I., Owens A., Quarati F., Benkhoff J., Bakhtin B., Fedosov F., Golovin D., Litvak M., Malakhov A., Mokrousov M., Nuzhdin I., Sanin A., Tret'yakov V., Vostrukhin A., Timoshenko G., Shvetsov V., Granja C., Slavicek T., Pospisil S.* A Comparative Study of $\text{LaBr}_3(\text{Ce}^{3+})$ and CeBr_3 Based Gamma-Ray Spectrometers for Planetary Remote Sensing Applications // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. V. 87, Iss. 8. id.085112.
22. *Solomon S.C. et al.* Return to Mercury: A Global Perspective on MESSENGER's First Mercury Flyby // *Science.* 2008. V. 321. P. 59.
23. *Grotzinger J.P., Crisp J., Vasavada A.R., Anderson R.C., Baker Ch. J., Barry R., Blake D.F., Conrad P., Edgett K.S., Ferdowski B., Gellert R., Gilbert J.B., Golombek M., Gómez-Elvira J., Hassler D.M., Jandura L., Litvak M., Mahaffy P., Maki J., Meyer M., Malin M.C., Mitrofanov I., Simmonds J.J., Vaniman D., Welch R.V., Wiens R.C.* Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation // *Space Science Rev.* 2012. V. 170, Iss. 1–4. P. 5–56.
24. *Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Barmakov Yu.I., Behar A., Bobrovitsky Yu.I., Bogolubov E.P., Boynton W.V., Harshman K., Kan E., Kozyrev A.S., Kuzmin R.O., Malakhov A.V., Mokrousov M.I., Ryzhkov V.I., Sanin A.B., Smirnov G.A., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tret'yakov V.I., Varenikov A.B., Vostrukhin V.* Experiment for Measurements of Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Onboard NASA's Mars Science Laboratory // *Space Science Rev.* 2012. V. 170, Iss. 1–4. P. 559–582.
25. *Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Jun I., Kozyrev A.S., Krylov A., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Starr R., Zontikov A.* Ground Tests with Active Neutron Instrumentation for the Planetary Science Missions // *Nucl. Inst. Meth. A.* 2015. V. 788. P. 194–202
26. *Shvetsov V.N., Dubasov P.V., Golovin D.V., Kozyrev A.S., Krylov A.R., Krylov V.A., Litvak M.L., Malakhov A.V., Mitrofanov I.G., Mokrousov M.I., Sanin A.B., Timoshenko G.N., Vostrukhin A.A., Zontikov A.O.* Ground Tests of the Dynamic Albedo of Neutron Instrument Operation in the Passive Mode with a Martian Soil Model // *Nucl. Inst. Meth. A.* 2017. V. 861. P. 1–6.
27. *Vago J.L. et al.* Habitability on Early Mars and the Search for Biosignatures with the ExoMars Rover // *Astrobiol.* 2017. V. 17; doi: 10.1089/ast.2016.1533.
28. *Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Nikiforov S.Y., Jun I., Bobrovitsky Y.I., Golovin D.V., Grebennikov A.S., Fedosov F.S., Kozyrev A.S., Lisov D.I., Malakhov A.V., Mokrousov M.I., Sanin A.B., Shvetsov V.N., Timoshenko G.N., Tomilina T.M., Tret'yakov V.I., Vostrukhin A.A.* The ADRON-RM Instrument Onboard the ExoMars Rover // *Astrobiol.* 2017. V. 17, Iss. 6–7. P. 585–594.
29. *Mitrofanov I.G. et al.* Cosmic Gamma-Ray Spectrometer with Tagged Charged Particles of Galactic Cosmic Rays // *Nucl. Inst. Meth. A.* 2020. V. 953. Article id. 163148.

Получено 22 декабря 2021 г.