

**М. Л. Литвак, И. Г. Митрофанов, А.А. Вострухин, Д.В. Головин, А.С. Козырев, А.В. Малахов, М.И. Мокроусов, А. Б. Санин** Цикл работ: «Ядерная планетология будущего: наземные отработки и полевые испытания перспективных активных гамма и нейтронных спектрометров космического применения»

Аннотация

**Авторы:**

М. Л. Литвак, И. Г. Митрофанов, А.А. Вострухин, Д.В. Головин, А.С. Козырев, А.В. Малахов, М.И. Мокроусов, А. Б. Санин,

**Название:**

**Цикл работ: «Ядерная планетология будущего: наземные отработки и полевые испытания перспективных активных гамма и нейтронных спектрометров космического применения»**

**Ссылки на публикации:**

1. “Ground tests with active neutron instrumentation for the planetary science missions”, M.L. Litvak, I.G. Mitrofanov, A.V. Sanin, A.S. Kozyrev, V.N. Shvetsov, G.N. Timoshenko, R. Starr,

A. Zontikov, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment A 788 (2015), Pages 194-202, doi: 10.1016/j.nima.2015.03.066.

2. “Наземные испытания научных приборов ядерной планетологии на экспериментальном стенде в ОИЯИ”, М.Л. Литвак, И.Г. Митрофанов, А.А. Вострухин, Д.В. Головин, П.В. Дубасов,

А.О. Зонтиков, А.С. Козырев, А.Р., Крылов, В.А. Крылов, М.И. Мокроусов, А.Н. Репкин, Г.Н. Тимошенко, К.В. Удовиченко, В.Н. Швецов, **Письма в журнал «Физика элементарных частиц атомного ядра»**, Т. 13, № 2 (200). С. 368-381.

3. “Экспериментальный стенд для испытания приборов ядерной планетологии”, А.А. Вострухин, Д.В. Головин, П.В. Дубасов, А.О. Зонтиков, А.С. Козырев, А.Р. Крылов, В.А. Крылов, М.Л. Литвак, И.Г. Митрофанов, М.И. Мокроусов, А.Н. Репкин, Г.Н. Тимошенко,

К.В. Удовиченко, В.Н. Швецов, **Письма в журнал «Физика элементарных частиц атомного ядра»**, Т. 13, № 2 (200). С. 354-367.

4. “Implementation of Gamma-Ray Instrumentation for Solid Solar System Bodies Using Neutron Activation Method”, M.L. Litvak, D.V. Golovin, I. Jun, A.S. Kozyrev, I.G. Mitrofanov, A.V. Sanin,

V.N. Shvetsov, G.N. Timoshenko, A. Zontikov, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 822, Pages 112-124, doi: 10.1016/j.nima.2016.03.087.

5. “Возможности применения сцинтилляционных детекторов с полупроводниковым ФЭУ для регистрации космического нейтронного и гамма-излучения”, М.И. Мокроусов, А.В. Малахов,

А.А. Вострухин, Н.Е. Карпушкина, **Ядерная физика**, Т. 79 №5, doi: 10.7868/S0044002716050147.

**Общая формулировка научной проблемы и её актуальность:**

Особое значение в планетных исследованиях придается поиску воды (водяного льда), поскольку наличие свободной воды в заметном количестве может являться условием развития жизни. Наличие локальных запасов воды и других полезных ископаемых позволит определить места возможной посадки исследовательских зондов, а в будущем будет являться ключевым фактором для размещения на планетах постоянных научных станций. Орбитальные измерения позволяют провести глобальное картографирование и построить карту распространности 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.

**Конкретная решаемая в работе задача и её значение:**

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 этой области науки 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. Важной задачей в реализации таких космических экспериментов является создание методики измерений и определение чувствительности детекторов при наземных физических калибровках.

В представляемом цикле работ авторы разработали и протестировали методику проведения космического эксперимента по изучению состава поверхности небесных тел методом нейтронной и гамма-спектроскопии на специально созданном для этих целей экспериментальном стенде. Также были изучены спектрометрические возможности нового типа фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и даны оценки возможности их применения для регистрации нейтронного и гамма-излучения.

#### **Используемый подход, его новизна и оригинальность:**

Одним из основных методов изучения состава планетного вещества является нейтронная и гамма-спектроскопия с использованием спектрометров различного типа. В отличие от орбитальных измерений, для посадочных миссий предоставляется возможность работать не только 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 идентификации наркотических и взрывчатых веществ в перевозимых грузах. В состав таких научных приборов входит импульсный нейтронный генератор, который может облучать поверхность сериями коротких (длительность от нескольких микросекунд до сотни микросекунд) и мощных (более  $10^7$  нейтронов за импульс) импульсов быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ и индуцировать альбедное нейтронное и гамма излучение из небольшого района поверхности вблизи прибора. К преимуществам активного метода по сравнению с пассивными измерениями относится возможность за счет мощности источника нейтронов существенно увеличить статистику измерений (а значит сократить время, необходимое 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. Так в августе 2012 в составе марсохода Curiosity, впервые за всю историю планетных исследований, на поверхности Марса начал работать российский активный нейтронный спектрометр ДАН состоящий из блоков импульсного нейтронного генератора и нейтронных детекторов.

Все созданные Отделом ядерной планетологии научные приборы, в том числе и ДАН, проходили предполетную калибровку в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ). Используя накопленный за многие годы опыт, для поддержки текущего эксперимента ДАН, а также с учётом 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 создавать аналоги планетного вещества и проводить на них отработки прототипов активных нейтронных и гамма спектрометров.

#### **Полученные результаты и их значимость:**

Первая работа представляемого цикла [1] описывает результаты нейтронных измерений, выполненных в ОИЯИ, на сухой модели планетного вещества, включающей в себя водородосодержащий слой с различным заглублением от 1 до 10 см от поверхности. Для

измерений был использован летный образец прибора ДАН, полностью аналогичный образцу на марсианском ровере Curiosity (NASA). Были определены зависимости экспресс-параметров от глубины водородосодержащего слоя для сравнения с величинами этих параметров в ходе космического эксперимента. Полученные результаты могут быть использованы при первичной обработке данных прибора ДАН, получаемых с поверхности Марса при движении ровера для оценки содержания водяного льда и его заглублини.

Во второй работе [2] представлены результаты первых испытаний активного нейтронного спектрометра ДАН, также выполненных на экспериментальном стенде для ядерной планетологии в ОИЯИ 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. 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 от 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 лунных и марсианских посадочных миссиях в 2018-2020 гг.

В третьей работе цикла [3] дается подробное описание экспериментального стенда, созданного в ОИЯИ для испытаний и калибровки приборов ядерной планетологии. На стенде собрана гомогенная модель аналог марсианского грунта из тонких (толщина 1 см) листов силикатного стекла размерами 3,82 × 3,21 м и общим весом около 30 т. Стекло выбрано для имитации абсолютно сухого марсианского реголита. Предложена и разработана гетерогенная модель, которая позволяет добиться максимально возможного подобия марсианскому грунту по усредненному элементному составу, и реализуется путем добавления в неё слоев нужных веществ, таких как железо, алюминий и хлор. Наличие приповерхностного водяного льда имитируется слоями полиэтилена, расположенного на различной глубине внутри стеклянной модели грунта. Для оценки возможностей стенда были проведены тестовые измерения и численное моделирование, показавшие большие перспективы его применения в области ядерной планетологии. В качестве источника нейтронов для испытания активных нейтронных и гамма спектрометров использовался портативный импульсный нейтронный генератор. Стенд является радиационно-опасным объектом и оборудован системами блокировок и радиационного контроля в соответствии с действующими нормативами.

В четвертой работе [4] представлены результаты наземных измерений с летными образцами и промышленными прототипами гамма-спектрометров для определения их возможностей при определении элементного состава планет. С помощью гамма-детекторов на основе высокочистого германия и бромида лантана были получены спектры от мишени с составом близким к марсианскому при ее облучении импульсным нейтронным генератором. Были идентифицированы активационные гамма-линии от основных порообразующих элементов, таких как O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca и Fe.

В пятой работе [5] рассматривается возможность использования перспективной модели полупроводникового ФЭУ при работе с кристаллами высокого разрешения для космического применения. Также рассмотрена возможность детектирования нейтронов высоких энергий методом селекции сигнала по форме. Основной вывод исследования заключается в том, что полупроводниковый ФЭУ обладает несколькими основными преимуществами перед вакуумным ФЭУ, которые могут быть решающими при выборе типа ФЭУ в ряде космических экспериментов. Однако, следует уделить особое внимание техническим характеристикам полупроводникового ФЭУ, с учетом особенностей проведения эксперимента.

Полученные в цикле работ результаты представляют фундаментальный научный интерес о возможности измерения состава поверхности планет и имеют высокую значимость для

подготовки будущих космических экспериментов и поиску потенциальных мест для создания научно-исследовательских станций и обитаемых баз.