

УДК 523.43

М. Л. Литвак¹, И. Г. Митрофанов¹, А. С. Козырев¹,
А. Б. Санин¹, В. И. Третьяков¹, В. Ю. Гриньков¹,
С. В. Чарышников¹, У. В. Бойнтон²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Лунно-планетная лаборатория, Университет Аризоны, Тусан, Аризона, США

**Поиск воды на Марсе на основе данных
российского прибора ХЕНД, установленного
на борту американского космического аппарата
«2001 Марс Одиссей»**

Подається концепція російського приладу ХЕНД, встановленого на борту американського космічного апарату «2001 Марс Одисей», а також результати нейтронної спектроскопії поверхні Марса, отримані в цьому експерименті. Проведені вимірювання дозволяють оцінити вміст води в приповерхневому шарі планети товщиною 1-2 м. Показано, що на півночі і півдні Марса є величезні райони «вічної мерзлоти» з дуже високим (кілька десятків процентів за масою) вмістом льоду.

ВВЕДЕНИЕ

24 октября 2001 г. на орбиту вокруг Марса был успешно выведен американский межпланетный аппарат НАСА «2001 Марс Одиссей», стартовавший с мыса Канаверал 7 апреля 2001 г. В состав комплекса научной аппаратуры этого аппарата входят приборы для изучения состава поверхности Марса. Эта аппаратура включает детектор гамма-излучения, нейтронный спектрометр и российский прибор ХЕНД для регистрации нейтронов высоких энергий. Название прибора HEND (ХЕНД) образовано сокращением английского названия «High Energy Neutron Detector» [4].

Марс имеет тонкую атмосферу через которую свободно проникают частицы космических лучей бомбардирующие поверхность планеты. На глубине 1-2 м они производят быстрые нейтроны, которые, выходя на поверхность, производят гамма-излучение и формируют нейтронное альbedo Марса. Гамма-фон возникает из леса линий образующихся в результате реакций упругого и неупругого рассея-

ния нейтронов с ядрами породообразующих элементов [6, 7, 10]. Поэтому изучение спектра гамма-излучения позволяет определить химический состав приповерхностных слоев марсианского грунта. Для этого в комплексе аппаратуры используется гамма-детектор на основе высокочистого германия. Его спектральная чувствительность позволяет с высокой точностью разделять ядерные линии, принадлежащие разным химическим элементам. Чтобы точно оценить концентрацию разных химических элементов, необходимо знать величину нейтронного потока. Поэтому в комплекс аппаратуры включены также детекторы нейтронов разных энергий.

Построение карты нейтронного альbedo Марса является также одним из самых чувствительных методов для поиска воды в приповерхностных слоях марсианского грунта. Наличие даже нескольких процентов воды в приповерхностном слое планеты сильно влияет на поток быстрых нейтронов из за высокой эффективности замедления нейтронов при столкновениями с ядрами водорода в молекулах воды. Чем выше содержание воды в грунте, тем

эффективнее замедляются нейтроны и тем сильнее ослабляется поток быстрых нейтронов при выходе на поверхность [6, 7, 10].

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА ХЕНД

Физическая концепция прибора ХЕНД была выбрана таким образом, чтобы найти приемлемый компромисс между ограничениями по весу (4 кг) и энергопотреблению (< 6 Вт) и чувствительностью детекторов, достаточной для однозначной интерпретации полученных результатов [11] (рис. 1).

Прибор ХЕНД состоит из нескольких детекторов, три из которых созданы на основе пропорциональных счетчиков нейтронов ^3He , окруженных разными слоями замедлителя из полиэтилена. Эти счетчики регистрируют тепловые нейтроны в реакциях захвата ядрами изотопа гелия ^3He с образованием α -частицы и протона. В полетном варианте прибора использовались промышленные счетчики LND 2517.

Нейтроны замедляются в полиэтилене до тепловых энергий и регистрируются в пропорциональных счетчиках. Эффективность замедления в полиэтилене зависит от его толщины, поэтому детектор с самым толстым слоем замедлителя около 30 мм наиболее чувствителен к нейтронам с энергиями 10 эВ...1 МэВ. Детектор с толщиной замедлителя 14 мм имеет максимальную чувствительность в диапазоне энергий 10 эВ...100 кэВ. Наконец, пропорциональный счетчик, покрытый самым тонким замедлителем (3 мм), регистрирует в основном нейтроны с энергиями от 0.4 эВ до 1 кэВ. Объединяя данные со всех трех детекторов, можно получить информацию о потоке нейтронов в широком диапазоне энергий от 0.4 эВ до 1 МэВ.

Для регистрации нейтронов с энергиями выше 1 МэВ в приборе ХЕНД используется органический сцинтиллятор на основе стильбена. Этот сцинтиллятор регистрирует нейтроны высоких энергий по вспышкам света от протонов отдачи, которые выбиваются нейтронами из кристаллической решетки органического кристалла. Однако на орбите вокруг Марса стильбен регистрирует не только протоны отдачи от нейтронов, но также первичные протоны от космических лучей. Кроме этого, в стильбене будут регистрироваться электроны космических лучей и вторичные электроны, произведенные фотонами гамма-излучения.

Проблема разделения импульсов от протонов от импульсов от электронов была решена с помощью электронной схемы разделения на основе анализа формы сигнала от оптических вспышек, которые существенно различаются для этих частиц. В испы-

таниях прибора ХЕНД было показано, что схема обеспечивает достаточно эффективное разделение импульсов протонов от импульсов электронов. Возможный ошибочный учет электронного сигнала в качестве сигнала от протона соответствует вероятности на уровне $5 \cdot 10^{-4}$.

Проблема разделения протонов отдачи от первичных протонов космических лучей была решена методом антисовпадатальной защиты с использованием дополнительного сцинтилляционного детектора из ScI. Он окружает детектор из стильбена со стороны «открытого неба», но оставляет открытыми те направления, где находится поверхность Марса. При прохождении заряженной частицы через внешний детектор в приборе вырабатывался логический сигнал *veto*, который запрещает в этот момент регистрацию импульса от внутреннего детектора.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Межпланетный КА «2001 Mars Odyssey» находится на круговой полярной орбите вокруг Марса со средней высотой над поверхностью планеты в 400 км и наклоном 87°. Орбита разбита на небольшие участки на каждом из которых производятся отдельные измерения. Длительность одного такого временного интервала составляет около 20 с, что соответствует пролету примерно 1° большой дуги. Полученные данные почти тут же передаются на Землю, где по интернету распределяются между различными научными центрами. Институт космических исследований РАН относится к числу таких научных центров, которые обладают правом получения научных данных в условиях, приближенных к режиму реального времени (задержка на пути радиосигнала от Марса к Земле может составлять до 15 мин). В ИКИ РАН приходят данные, зарегистрированные российским прибором ХЕНД.

Получение и обработку научной информации можно разделить на несколько этапов. На начальном этапе из полученного бинарного кода выделяется служебная и научная информация. При анализе служебной информации наибольшее внимание уделяется анализу параметров, отвечающих за жизнеобеспечение прибора, таких как температура блоков детектирования и электроники. Если какие-либо параметры выходят за пределы критических значений, то выдаются предупреждающие сообщения. Это позволяет вовремя среагировать на критическую ситуацию, и с помощью команд с Земли попытаться изменить состояние прибора. Научная информация распаковывается и сортируется в соот-

ветствии с типом детектора, где она была получена. В случае ХЕНД это шесть независимых сигналов, два из которых представляют мягкое и жесткое гамма-излучение, а четыре других соответствуют нейтронным измерениям в разных диапазонах энергий. Завершается первый этап загрузкой полученной информации в базу данных.

На втором этапе запускается пакет программ, написанных на основе библиотеки SPICE, позволяющих определить местоположение космического аппарата и точное время каждого измерения (по шкале всемирного времени). Это дает возможность сопоставить полученную научную информацию с участком поверхности планеты, откуда она была собрана. По результатам вычислений в базу грузятся около двадцати дополнительных параметров: координаты и скорость аппарата, углы на Солнце, Марс и Землю, метки времени и т. д. На этом завершается предварительная обработка полученной сырой информации.

На следующей стадии начинается собственно научный анализ данных. Сначала из данных происходит вычитание галактического нейтронного и гамма-фона. Для этого используются результаты полетных измерений и калибровок, проведенных на перелете от Земли к Марсу. Вычитание галактического фона на орбите вокруг Марса производится в результате коррекции полученных фонов на перелете на угловой размер Марса с орбиты в 400 км. После этого полученный сигнал в разных детекторах ХЕНД раскладывается по отдельным пикселям на поверхности Марса. Это позволяет получить карты нейтронного альbedo Марса на высоте в 400 км в разных энергетических диапазонах. На этом этапе обработки единицей измерения нейтронного потока является отсчет в секунду, что не вполне отражает физическую картину, так как является приборно зависимой величиной. Поэтому следующий этап обработки научной информации включает учет функций отклика разных детекторов и переход от отсчетов к физическим единицам измерений выраженных в нейтронах в секунду на квадратный сантиметр. Полученные таким образом орбитальные карты нейтронных потоков являются базовым продуктом для дальнейших физических интерпретаций. Так, учитывая атмосферу Марса, можно перейти от орбитальных измерений к приповерхностным нейтронным потокам. А в дальнейшем анализе данных с учетом возможных моделей марсианского грунта можно оценить распределение воды в приповерхностном слое грунта. Подробнее интерпретация данных будет рассмотрена ниже.

Орбитальные карты нейтронных потоков вместе функциями откликов детекторов являются основ-

ным научным продуктом, представляемым на суд научной общественности. Согласно общепринятым правилам данные каждой американской межпланетной миссии выкладываются в публичный доступ в интернет [14]. На сегодняшний момент после почти двухлетней работы КА на орбите вокруг Марса на интернет-сайты выложены сырые данные, накопленные за год работы. В конце декабря 2003 г. в публичную базу данных предполагается выложить обработанную научную информацию за первый год работы. В случае эксперимента ХЕНД это будут орбитальные карты потоков (нейтрон/см²с) в разных диапазонах энергий. Эта поставка данных также будет продублирована на российском сайте эксперимента ХЕНД в январе 2004 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Предварительная обработка данных эксперимента ХЕНД показала наличие больших областей на поверхности планеты, где наблюдается значительная депрессия эпитепловых нейтронов (0.4 эВ — 1 МэВ) по отношению к экваториальным областям с максимальным потоком нейтронов [3, 8, 12]. Прежде всего это огромные области вокруг полюсов планеты, находящиеся выше 60° с. ш. и 60° ю. ш. (см. рис. 2). Уменьшение потока эпитепловых нейтронов в этих областях составило около 10 раз, что не может быть объяснено статистическими флуктуациями, изменением состава грунта или ослаблением в атмосфере. Эти эффекты могут привести к вариациям потока нейтронов на уровне не более 15—20%. В данных GRS было обнаружено, что найденные области являются также источником излучения в гамма-линии 2.2 МэВ, которая возникает при захвате нейтрона водородом [5]. Интерпретация полученных фактов привела к однозначному выводу о том, что приполярные районы Марса представляют собой «вечную мерзлоту» с содержанием водяного льда в десятки процентов по весу [5, 8, 12].

Кроме приполярных областей, были также обнаружены две небольшие области неправильной формы с дефицитом эпитепловых нейтронов 5-7 раз в экваториальных широтах Марса в районе областей Аравия и Мемнония. Наличие водяного льда на этих широтах является труднообъяснимым фактом, поэтому наблюдаемый дефицит эпитепловых нейтронов объяснялся наличием химически связанной воды [1].

Чтобы от наблюдательных данных перейти к точным оценкам содержания воды в грунте, необходимо построить численную модель грунта и марсианской атмосферы. Используя предложенные мо-

дели с различным содержанием воды, можно вычислить нейтронный поток на орбите вокруг Марса и сравнить его с наблюдательными данными. Такие расчеты были проведены для различных районов марсианской поверхности. В качестве модели атмосферы брался слой, состоящий из газообразного CO_2 с эффективной толщиной 5—25 г/см². Для модели грунта использовалась слоистая структура, состоящая из верхнего относительно сухого слоя переменной толщины с содержанием воды около 2 % и нижнего полубесконечного слоя, в котором содержание воды варьировалось от единиц до десятков процентов. Была построена специальная процедура минимизации для поиска оптимальных параметров, описывающих содержание воды и глубину ее залегания при которых достигается наилучшее согласие между наблюдательными данными и модельными вычислениями.

Расчеты показали, что в северных приполярных областях на небольшой глубине 5—10 см находится в среднем от 15 % (60° с. ш.) до 70 % (80° с. ш.) воды по массе. В районе остаточной полярной шапки содержание водяного льда может даже достигать почти 100 %. Южные приполярные районы отличаются от северных по распределению воды в приповерхностном слое. Во-первых, процент содержания воды на юге чуть меньше, чем на севере, а во-вторых — водяные пласты находятся на гораздо большей глубине: от 15 см на самом полюсе до 40 см на границе областей вечной мерзлоты.

Численное моделирование нейтронных потоков было также проведено для экваториальных областей, где был обнаружен существенный дефицит эпитепловых нейтронов. В этих областях содержание воды в среднем оценивается в 7—10 %, что согласуется с предсказаниями о том, что вода может находиться здесь в химически связанной форме в различных глинах. Однако предварительный анализ наиболее влажных мест внутри экваториальных районов показал, что минимальное содержание воды там может доходить до 12—15 % [13]. Это предельные значения которые можно объяснить наличием химически связанной воды. Если дальнейший анализ данных покажет еще большее количество воды, необходимо будет привлекать гипотезы о наличии водяного льда в экваториальных широтах.

Кроме поиска воды данные ХЕНД можно использовать для мониторинга сезонных шапок Марса. Известно, что каждой полярной осенью на высоких широтах начинает происходить конденсация углекислого газа из атмосферы. Этот процесс продолжается до глубокой зимы, приводя к образованию снежного покрова толщиной до 1 м [15]. Ранней

весной начинается обратный процесс и к середине лета снежный покров полностью испаряется обратно в атмосферу. Благодаря тому, что приполярные районы, подверженные сезонным осадкам, содержат большое количество водяного льда, появляется возможность следить за изменением толщины снежного покрова на основе данных ХЕНД. Даже небольшой толщины снежного покрова в 5—10 см уже достаточно, чтобы экранировать грунт, обогащенный водяным льдом [2]. В орбитальных наблюдениях это проявляется как увеличение нейтронного потока. Чем больше толщина сезонных отложений атмосферной углекислоты, тем сильнее растет величина нейтронного потока. Привлекая численное моделирование, можно из наблюдательных данных извлечь эффективную толщину (г/см²) снежного покрова, а вместе с ней — и его массу для разных приполярных районов [9]. По результатам наблюдений были сделаны предварительные оценки массы сезонных шапок Марса. Полная масса северной сезонной шапки составляет около $4 \cdot 10^{15}$ кг, южной — около $7 \cdot 10^{15}$ кг.

Подводя итоги, можно сказать, что концепция прибора ХЕНД была выбрана почти оптимальным образом. Это позволило получить максимум научных результатов при серьезных технических ограничениях, вызванных работой на межпланетном космическом аппарате. Содержание воды в приповерхностном слое Марса может быть полностью изучено только при достаточно продолжительных наблюдениях планеты, когда будет возможно исключить эффекты, связанные с переменностью потока нейтронов из-за сезонных покровов углекислоты. С другой стороны, изучение этой сезонной переменности нейтронного излучения Марса позволяет построить физическую модель сезонной циркуляции углекислоты в атмосфере и на поверхности Марса. Для получения достоверных результатов желательно продолжать миссию «2001 Марс Одиссей» еще 2-3 марсианских года.

1. Базилевский А. Т., Литвак М. Л., Митрофанов И. Г. и др. Поиски следов химически связанной воды в поверхностном слое Марса по результатам измерений прибором ХЕНД на КА «2001 Mars Odyssey» // Астрон. вестн.—2003.—№ 5.
2. Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Козырев А. С. и др. Сезонные вариации потока нейтронов в области полярных шапок Марса по данным российского прибора ХЕНД проекта НАСА «2001 Mars Odyssey» // Астрон. вестн.—2003.—№ 5.
3. Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Козырев А. С. и др. Первые результаты картографирования потока нейтронов от Марса российским прибором ХЕНД на борту американского аппарата «2001 Mars Odyssey» // Астрон. вестн.—2003.—№ 5.
4. Boynton W. V. The Mars Odyssey gamma-ray spectrometer

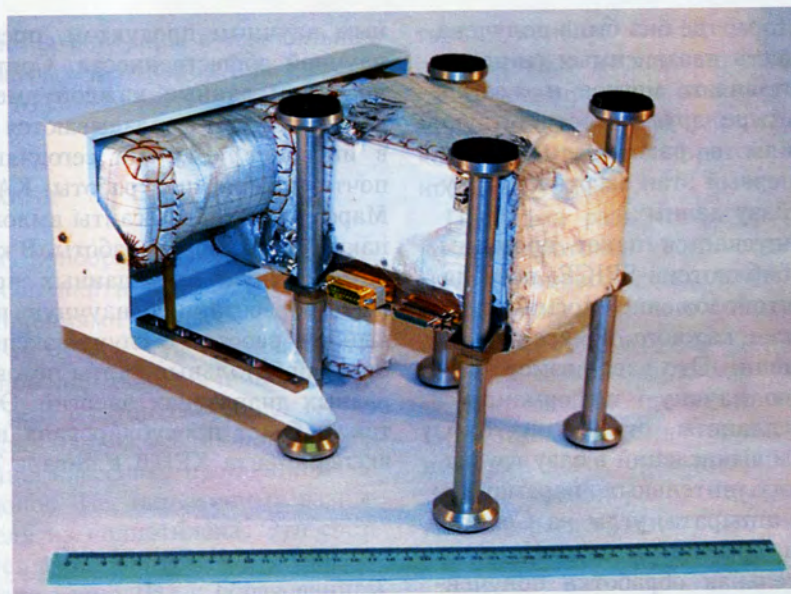


Рис. 1. Летный образец прибора ХЕНД

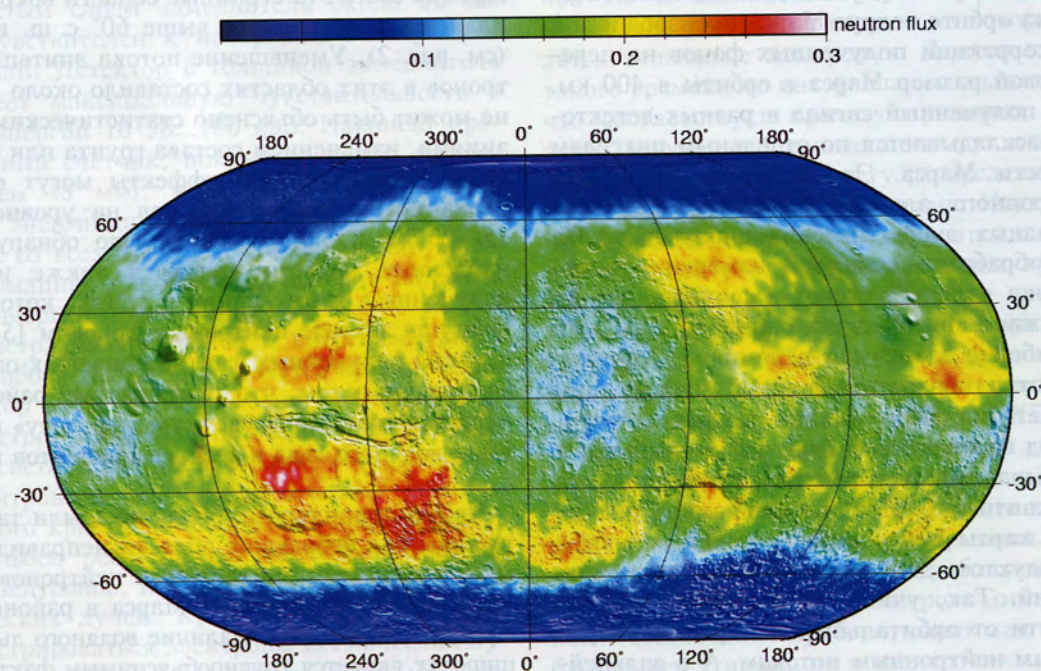


Рис. 2. Карта орбитальных измерений потока эпителивых нейтронов от Марса. При построении карты использованы летные измерения для каждого из полушарий планеты. Поэтому представленное распределение нейтронов отражает свойства поверхности свободной от сезонного покрова CO_2

- instrument suite // *Space Sci. Rev.*—2003.—Accepted.
5. Boynton W. V., Feldman W. C., Squyres S. W. et al. Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits // *Science.*—2002.—297.—P. 81—85.
 6. Drake D. M., Feldman W. C., Jakosky B. M. Martian neutron leakage spectra // *J. Geophys. Res.*—1988.—93.—P. 6353—6368.
 7. Feldman W. C., Boynton W. V., Jakosky B. M., et al. Redistribution of subsurface neutrons caused by ground ice on Mars // *J. Geophys. Res.*—1993.—98.—P. 20855—20870.
 8. Feldman W. C., Boynton W. V., Tokar R. L., et al. Global distribution of neutrons from Mars: Results from Mars Odyssey // *Science.*—2002.—297.—P. 75—78.
 9. Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Kozyrev A. S., et al. 4-D Model of CO₂ deposition at north and south of Mars from HEND/ODYSSEY and MOLA/MGS // 6th Inter. conf. on Mars. — Pasadena, 2003.—Abstract N 3080.
 10. Masarik J., Reedy R. C. GAMMA ray production and transport in Mars // *J. Geophys. Res.*—1996.—101.—P. 18891—18912.
 11. Mitrofanov I. G., Anfimov D. S., Boynton W. V., et al. Russian High Energy Neutron Detector HEND for Mars Surveyor Orbiter 2001 Mission // LPSC XXX.—1999.—Abstract N 1550.
 12. Mitrofanov I. G., Anfimov D. S., Kozyrev A. S., et al. Maps of subsurface hydrogen from High Energy Neutron Detector // *Science.*—2002.—297.—P. 78—81.
 13. Mitrofanov I. G., Litvak M. L., Kozyrev A. S. et al. Vertical distribution of shallow water in the distinguishable regions at low and high latitudes of Mars: Neutron data deconvolution of HEND // 6th Inter. conf. on Mars. — Pasadena, 2003.—Abstract N 3080.
 14. Slavney S., Arvidson R. E., Guinness E. A. Mars Global Surveyor and 2001 Mars Odyssey Science Data Archives // LPSC XXXIII.—2002.—Abstract N 1303.
 15. Smith D. E., Zuber M. T., Neumann G. A., et al. Seasonal Variations of Snow Depth on Mars // *Science.*—2001.—294.—P. 2141—2146.

A SEARCH FOR WATER ON MARS FROM DATA OF THE RUSSIAN DEVICE HEND INSTALLED ABOARD THE AMERICAN SPACE MISSION "2001 MARS ODYSSEY"

**M. L. Litvak, I. G. Mitrofanov, A. S. Kozyrev,
A. B. Sanin, V. I. Tret'iakov, V. Yu. Grinkov,
S. V. Charyshnikov, U. V. Bointon**

We give the conception of the Russian device HEND installed aboard the American space mission "2001 Mars Odyssey" and some results of neutron spectroscopy of the Martian surface derived from the experiment. The measurements performed allow one to make an estimate of the water content of a 1-2 m thick near-surface layer of Mars. It is shown that, in the north and south of Mars, there are huge regions of permafrost with a very high (several tens of percent by weight) content of the water ice.