

ПРИРОДА

№9, 2005 г.

Митрофанов И.Г.

Поиски воды на Марсе

© “Природа”

Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Поиски воды на Марсе



И.Г.Митрофанов

Изучение Марса — одно из самых приоритетных направлений в исследовании планет Солнечной системы. Первые попытки запусков космических аппаратов к Марсу были предприняты С.П.Королевым 10 и 14 октября 1960 г. — к сожалению, оба пуска оказались неудачными. Потребовалось еще более 10 лет напряженной работы и 11 запусков, чтобы, наконец, 2 декабря 1971 г. советский космический аппарат «Марс-3» достиг цели и совершил первую мягкую посадку на поверхность Красной планеты в окрестности кратера Птоломей. 12 февраля 1974 г. советский межпланетный аппарат «Марс-5» вышел на околомарсианскую орбиту и выполнил съемку поверхности. На Землю поступили карты рельефа, на которых хорошо различались сухие русла потоков. Это позволило ученым предположить, что Марс, который в настоящее время имеет холодную и сухую поверхность, в прошлом был теплым и влажным.

По современным представлениям, Марс и Земля на ранней стадии эволюции развивались по сходным сценариям. Затем, возможно, в результате глобальной катастрофы, теплый и влажный климат раннего Марса сме-



Игорь Георгиевич Митрофанов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией космической гамма-спектроскопии ИКИ РАН. Область научных интересов — астрофизика высоких энергий и ядерная планетология.

нился на современный сухой и холодный. При этом могла быть утрачена большая часть атмосферы. Вопросы о причинах такого катаклизма, о том, куда делась вода с поверхности и о том, успела ли на молодом влажном Марсе зародиться примитивная жизнь, — относятся к наиболее актуальным проблемам современных исследований Марса.

Задача поиска воды под сухой поверхностью Марса была успешно решена при помощи космического научного прибора HEND (High Energy Neutron Detector), созданного в России по программе Федерального космического агентства и установленного на американском космическом аппарате «Mars Odyssey» (рис.1). В этом эксперименте впервые в практике космических исследований приме-

няется метод нейтронной спектроскопии для оценки содержания воды в приповерхностном слое Марса. Картографирование прибором HEND было начато 18 февраля 2002 г. и успешно продолжается до сих пор.

Водная среда на Марсе

За 35 лет изучения Марса межпланетными космическими аппаратами получено большое количество данных, свидетельствующих о том, что поверхность и атмосфера Красной планеты сформировались в результате долгой и сложной эволюции. Поверхность изменялась как в результате столкновений с метеоритами, так и под действием вулканических, тектоничес-

ких и эрозионных процессов. Сейчас установлено, что важную роль в формировании рельефа поверхности также играли гидрологические процессы. Современные климатические условия — низкое давление и отрицательные температуры — исключают существование на поверхности Марса воды в жидкой фазе. Однако было известно, что она присутствует в виде льда постоянных полярных шапок и пара в атмосфере планеты.

Водяной лед в полярных шапках. Давление и температура на умеренных широтах Марса таковы, что летом водяной лед сублимирует в атмосферу и водяные пары в ней переносятся на полюса, действующие как холодные ловушки. В них пар может осесть на поверхность, формируя постоянные полярные шапки. Необходимо также учитывать глобальную циркуляцию атмосферной углекислоты между полюсами, приводящую к сезонным (осень и зима) выпадениям «сухого снега» из CO_2 на поверхности. Важную роль в формировании полярных шапок также играют пылевые бури, которые переносят огромные облака пыли вдоль поверхности всей планеты.

Наблюдения на американских исследовательских станциях «Viking» показали, что северная полярная шапка Марса целиком состоит из водяного льда. В южном полушарии лето теплее, но при этом гораздо короче, чем на северном. В течение южного лета углекислотный снег не успевает растаять, и водяная полярная шапка на юге круглый год покрыта слоем замерзшей углекислоты.

Полярные шапки Марса — довольно молодые образования, относящиеся к позднему Амазонийскому периоду. На основе анализа количества ударных кратеров, покрывающих южные полярные районы, было установлено, что возраст южной полярной шапки составляет 7–15 млн лет. Северная шапка гораздо моложе, ее возраст оценива-



Рис. 1. Космический аппарат НАСА «Mars Odyssey» с российским нейтронным спектрометром HEND на борту.

ется от 100 тыс. до 10 млн лет. Меньший возраст северной шапки означает, что процесс ее формирования завершился относительно недавно или продолжается до сих пор. Из этого следует, что на современном Марсе где-то существует достаточно мощный источник водяного пара, который переносится в атмосферу и оседает на северном полюсе.

Следы водных резервуаров. На Марсе с прошлых эпох сохранились характерные особенности рельефа, сформировавшиеся при скоплении и протекании огромных объемов жидкости. Еще во время первых марсианских миссий (советские межпланетные станции «Марс» и американские аппараты «Маринер») были получены данные, указывающие на существование форм рельефа, соответствующих гигантским каналам, руслам и системам долин. Недавние наблюдения, сделанные лазерным высотомером MOLA с борта орбитального аппарата НАСА «Mars Global Surveyor», обнаружили в северных районах Марса

структуры рельефа, похожие на береговые линии древнего океана. Одна из них действительно совпадает с линией постоянной высоты поверхности. Самое простое объяснение такой особенности марсианского рельефа — это равномерное оседание грунта в большом объеме воды, находящейся в гидростатическом равновесии.

Существование океана на северных равнинах Марса в ранний период эволюции до сих пор является предметом споров и обсуждений. Начальные стадии эволюции Красной планеты слишком плохо изучены для однозначной оценки термодинамических условий, обеспечивающих стабильное существование свободной водной поверхности в течение длительного времени. Тем не менее представляется вполне вероятным, что Марс на всем протяжении своей эволюции имел достаточно большие водные ресурсы, которые в одни периоды эволюции образовывали реки, моря и океаны, а в другие — скрывались в недрах планеты, вырываясь

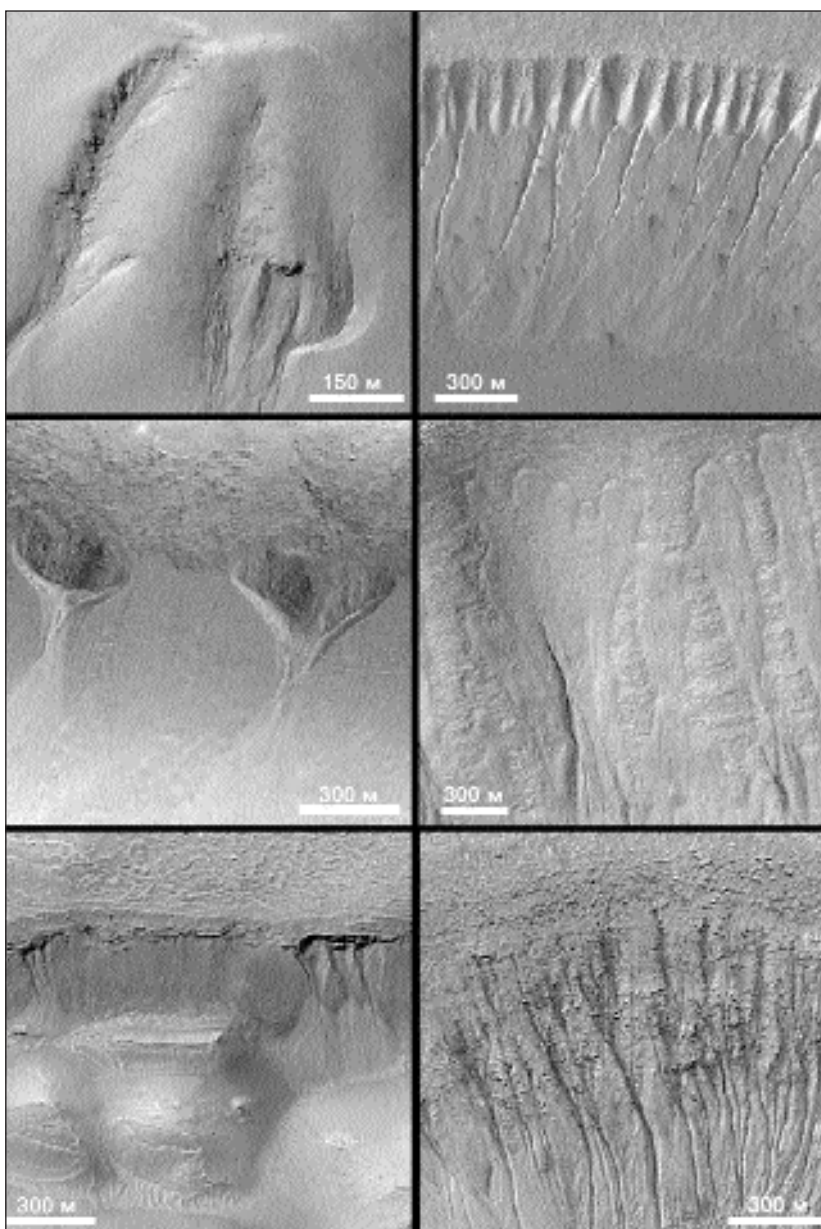


Рис.2. Фотографии высокого разрешения, сделанные орбитальной камерой МОС, установленной на аппарате «Mars Global Surveyor». На представленных снимках показаны различные формы промоин, образовавшихся в результате выбросов подповерхностной воды.

время от времени на поверхность и оставляя после себя русла протоков и промоин.

«Потоки воды» на поверхности. Очень большой интерес вызвали переданные на Землю снимки мелких деталей рельефа, выполненные орбитальной телевизионной камерой МОС, также установленной на борту

космического аппарата «Mars Global Surveyor». Этот прибор позволяет получать снимки очень высокого качества с разрешением около нескольких десятков метров. Главный вывод, сделанный на основе анализа изображений поверхности, состоял в том, что промоины на склонах, скорее всего, образо-

вались в результате недавних кратковременных выбросов сравнительно больших объемов жидкой воды из подповерхностных водяных линз.

В результате целенаправленного изучения снимков было выбрано около сотни таких мест на поверхности Марса. Обнаруженные промоины (рис.2), как правило, наблюдались на внутренних склонах ударных кратеров (треть всех наблюдений) или на стенках глубоких ложбин в южной полярной зоне (четверть наблюдений). Около половины подобных промоин находятся на южных склонах, и только 20% — на северных. Анализ рельефа местности показал, что по геологическим меркам это довольно молодые образования. Их возраст составляет не более нескольких миллионов лет. Следовательно, эпизодическая гидрологическая активность на Красной планете происходит и сейчас.

Метод нейтронной спектроскопии для изучения состава поверхности планет

Основное преимущество применения ядерных методов в изучении планет — получение достоверной информации о химическом составе приповерхностных (на глубине 1–2 м) слоев грунта. Гамма- и нейтронное излучение планет с тонкими атмосферами (или без атмосфер) может регистрироваться гамма-спектрометрами и нейтронными детекторами на орбитальных космических аппаратах. В зависимости от продолжительности миссии и от высоты орбиты космического аппарата можно построить глобальные карты нейтронного излучения всей планеты или измерить поток нейтронов от отдельных участков ее поверхности.

Ядерная планетология разрабатывалась А.П.Виноградовым и Ю.А.Сурковым в СССР и Дж.Арнольдом и Дж.Тромбкой в США

в самом начале космической эры. Впервые гамма-излучение с поверхности Луны было измерено в апреле 1966 г. с борта советской станции «Луна-10» [1–3]. Впоследствии подобные эксперименты проводились на американских лунных миссиях «Apollo» в 1971 и 1972 гг. Тогда был получен большой объем данных об элементном составе поверхности Луны [4]. Приоритетные измерения элементного состава поверхности Марса выполнялись с помощью гамма-спектрометра на основе CsI(Tl), установленного на космическом орбитальном аппарате «Mars-5», а еще через 10 лет информация о составе приповерхностных слоев Марса была получена космическим аппаратом «Фобос-2» с орбиты над поверхностью Красной планеты [5, 6]. После этих миссий произошло несколько неудачных попыток полетов к Марсу в США и России, при которых были потеряны космические аппараты, имевшие на своем борту гамма-спектрометры и нейтронные приборы. В апреле 2001 г. на американском межпланетном аппарате «Mars Odyssey» ученые получили возможность воспользоваться частью приборов, погибших в предыдущих миссиях. На аппарате «Mars Odyssey» был установлен комплекс научной аппаратуры GRS [7], который включает германиевый спектрометр (GS), разработанный в университете штата Аризона (США), нейтронный спектрометр низких энергий (NS), разработанный в Национальной лаборатории в Лос-Аламосе (США), а также российский прибор HEND, созданный в Институте космических исследований РАН.

Возникновение вторичного гамма-излучения и нейтронного потока от поверхности Марса связано с облучением вещества потоком галактических космических лучей. Плотная атмосфера Земли полностью поглощает гамма- и нейтронное излучения. На Марсе же средняя тол-

щина атмосферы (поверхностная плотность) составляет всего около 15 г/см^2 , и она практически прозрачна для космических лучей и возникающего на поверхности ядерного излучения.

При взаимодействии высокоэнергетичных протонов космических лучей с веществом поверхности на глубине 1–2 м образуются вторичные нейтроны высоких энергий 15–20 МэВ (рис.3). Выходя на поверхность, они сталкиваются с ядрами основных породообразующих элементов и возбуждают их. Спектр гамма-излучения возбужденных ядер характеризует химический состав поверхности планеты. Нейтронная спектроскопия — неотъемлемая часть ядерных измерений, необходимая для однозначного восстановления элементного состава вещества по данным о потоках излучения в ядерных гамма-линиях. Кроме того, измерение потока нейтронного излучения планеты представляет собой самостоятельную научную задачу, при решении которой можно определить наличие в приповерхностном слое водородосодержащих химических соединений.

Спектр вторичных нейтронов в зависимости от их энергии можно разделить на две части. Тепловые нейтроны с энергиями меньше 1 эВ подчиняются равновесному распре-

делению Максвелла, в то время как спектры надтепловых частиц (энергия нейтронов в диапазоне 1 эВ — 100 кэВ) и быстрых нейтронов (энергия нейтронов выше 100 кэВ) следуют степенному закону (рис.4). Соотношение потоков надтепловых, быстрых и тепловых нейтронов зависит от эффективности процесса замедления нейтронов, который, в свою очередь, определяется относительным содержанием в веществе легких элементов. Чем меньше атомный вес ядер, тем эффективней замедляются нейтроны при столкновениях с ними. Максимальный эффект достигается при столкновениях с ядрами водорода, масса которых равна массе нейтрона. Присутствие в грунте даже относительно небольшого количества атомов водорода приводит к существенному ослаблению потока надтепловых и быстрых нейтронов и соответственно к увеличению их потока в тепловой части спектра [8]. Расчеты показывают, что добавление 0.1 % массовой доли водорода в вещество приповерхностного слоя планеты достаточно, чтобы понизить поток надтепловых нейтронов в два раза, а поток тепловых нейтронов увеличить в 10 раз (рис.4). Ослабление потока надтепловых нейтронов от участка поверхности

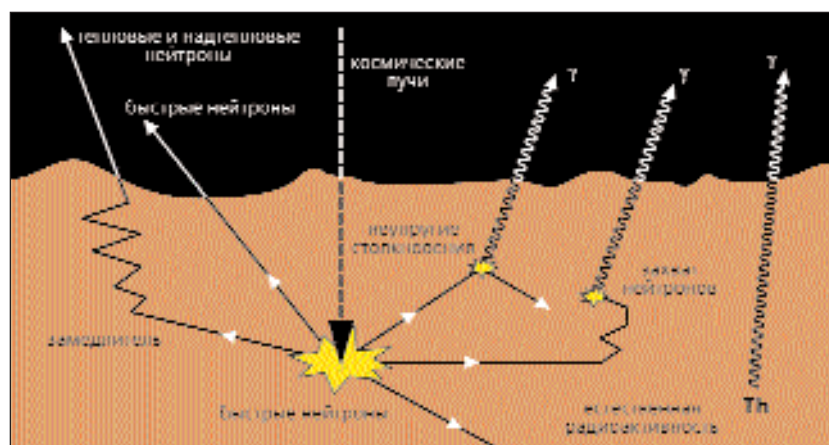


Рис.3. Схема возникновения ядерного излучения в приповерхностных слоях планеты под воздействием космических лучей.

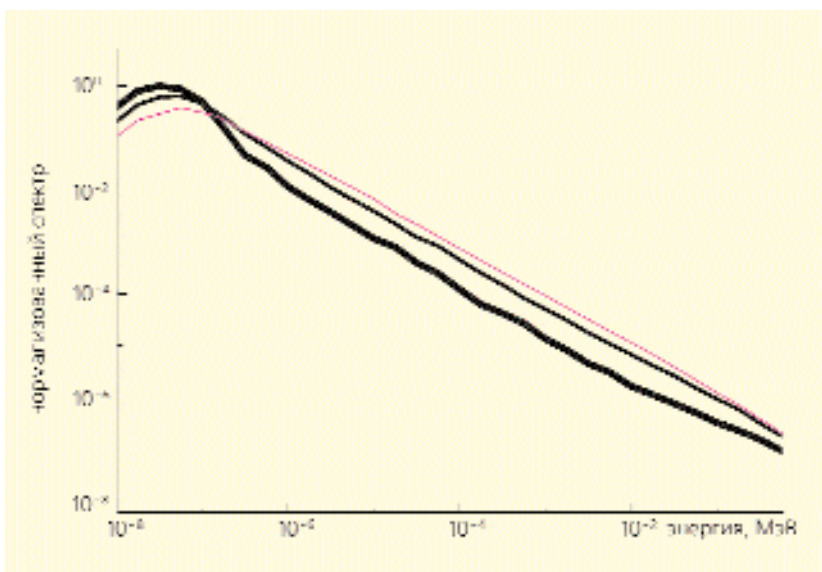


Рис.4. Спектры потока нейтронов с поверхности Марса. Цветной линией показан сухой грунт, тонкой и толстой — с содержанием воды 1 и 10% соответственно.

планеты является свидетельством присутствия в грунте водорода.

Российский прибор на борту американского марсианского аппарата

Детектор нейтронов высоких энергий HEND разработан в лаборатории космической гамма-спектроскопии ИКИ РАН. Для реализации этого эксперимента была образована кооперация, включающая различные научные и производственные центры России. Кроме ИКИ РАН, в нее входили Объединенный институт ядерных исследований (г.Дубна Московской обл.) и Специальное конструкторское бюро космического приборостроения (г.Таруса Калужской обл.). Установка прибора HEND на борт американского космического аппарата «Mars Odyssey» была предусмотрена межправительственным Исполнительным соглашением между НАСА и Федеральным космическим агентством России.

Физическая концепция прибора HEND выбрана таким образом, чтобы в условиях ограниченного веса (до 4 кг) «перекрыть» максимально широкий спектральный интервал энергий регистрируемых нейтронов от 0.4 эВ до 15 МэВ с максимальной чувствительностью, достаточ-

ной для однозначной интерпретации полученных результатов. Три детектора надтепловых нейтронов SD, MD и LD были созданы на основе пропорциональных счетчиков нейтронов, содержащих ^3He . Эти счетчики, окруженные разными слоями замедлителя из полиэтилена и экранами из кадмия (рис.5), регистрируют тепловые нейтроны в реакциях захвата ядрами изотопа гелия ^3He с образованием трития и протона и с выделением 764 кэВ энергии. Внешние тепловые нейтроны с энергиями менее 0.4 эВ поглощаются кадмием и не попадают в счетчики. В зависимости от толщины слоя замедлителя детекторы SD, MD и LD имеют максимумы чувствительности для надтепловых нейтронов с разными энергиями. Детектор LD с самым толстым (около 30 мм) слоем замедлителя наиболее чувствителен к нейтронам с энергиями 10 эВ — 1 МэВ. Детектор MD с замедлителем толщиной 14 мм лучше всего регистрирует нейтроны с энергиями 10 эВ — 100 кэВ. Детектор с самым тонким замедлителем в 3 мм регистрирует в основном нейтроны с энергиями от «кадмиевого по-



Рис.5. Прибор HEND на борту космического аппарата «Mars Odyssey» за 20 дней до старта.

рога» 0.4 эВ до 1 кэВ. Таким образом, набор из трех детекторов позволяет «перекрыть» широкий диапазон энергий нейтронов от 0.4 эВ до 1 МэВ.

Кроме того, в приборе HEND используется детектор IN/SC на основе органического сцинтиллятора из стибьена (рис.5), регистрирующего быстрые нейтроны высоких (более 0.8 МэВ) энергий по вспышкам света от протонов отдачи, которые выбиваются энергичными нейтронами из кристаллической решетки органического кристалла. В условиях космической среды стибьен будет регистрировать не только протоны отдачи от нейтронов, но также заряженные частицы космических лучей и вторичные электроны, произведенные фотонами гамма-излучения. Проблема дифференциального учета импульсов от протонов и электронов была решена на основе анализа формы сигнала от сцинтилляционных вспышек, которые существенно различаются для этих частиц. Возможный ошибочный учет электронного сигнала в качестве протонного сигнала соответствует вероятности на уровне $5 \cdot 10^{-4}$. Разделение протонов отдачи от первичных протонов космических лучей проводилось методом антисовпадатальной защиты с использованием дополнительного «внешнего» сцинтилляционного детектора OUT/SC из CsI.

Все четыре детектора нейтронов прибора HEND максимально разнесены и развернуты друг относительно друга. При этом они имеют наилучшие поля зрения в условиях полета космического аппарата по круговой полярной орбите (рис.1, 5).

Районы Марса с высоким содержанием воды

Полученные карты нейтронного излучения Марса [9–12] характеризуют пространственные вариации потока нейтронов

над атмосферой на высоте орбиты около 400 км (рис.6). Первая карта соответствует энергетическому интервалу надтепловых нейтронов. Вторая — быстрых нейтронов с энергиями 0.85–2.5 МэВ. Атмосфера Марса практически прозрачна для этих нейтронов. Численные расчеты показали, что изменение поверхностной плотности атмосферы от 5 до 25 г/см² может из-

менить поток выходящих нейтронов не более чем на 15% относительно среднего значения. Измерения с орбиты указывают на гораздо большие вариации потока нейтронов над разными участками поверхности Марса. Следовательно, основной вклад в переменность потока нейтронов на орбите вносят региональные вариации потока нейтронов на поверхности.

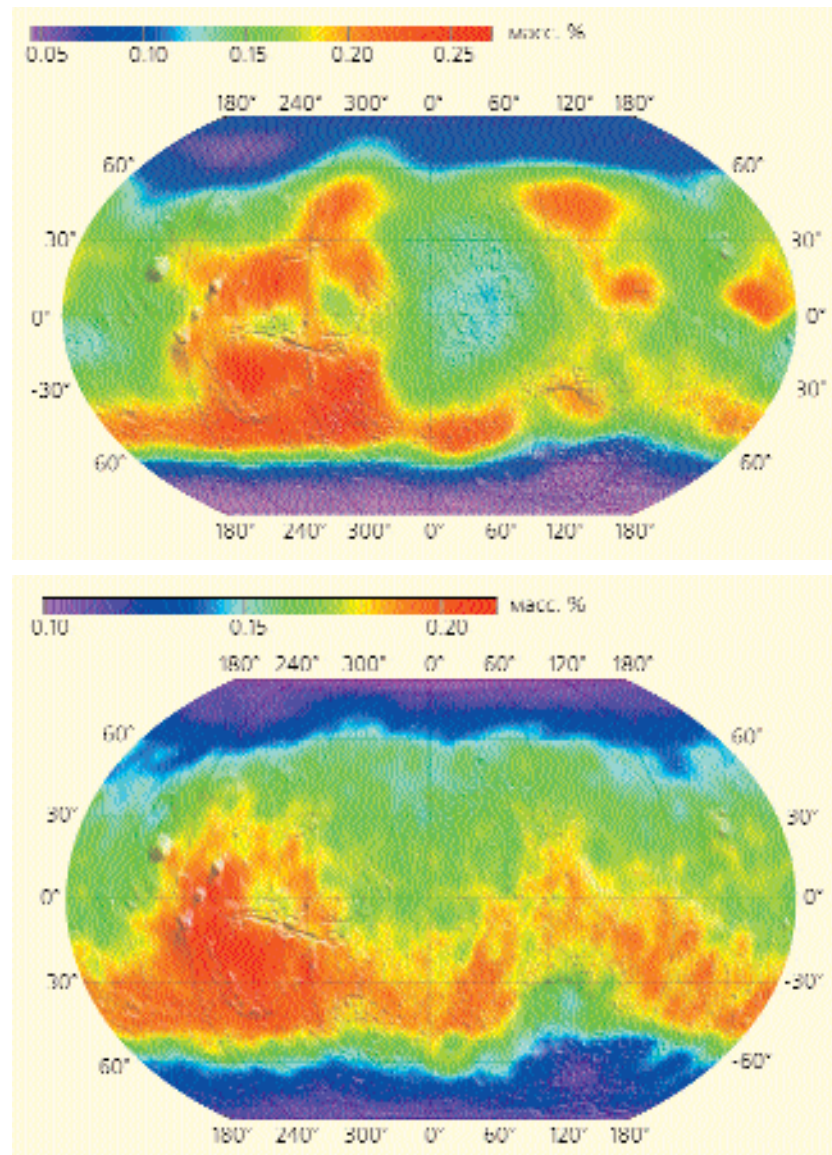


Рис.6. Карта потока надтепловых (вверху) и быстрых (0.85–2.5 МэВ) нейтронов на орбите космического аппарата «Mars Odyssey», по данным прибора HEND. Цветовая шкала соответствует отсчетам за секунду в детекторе MD. Измерения проводились для сезонных интервалов с $L_s = 100–180^\circ$ для широт $>50^\circ$ с.ш., $L_s = 0–180^\circ$ для широт от 50° ю.ш. до 50° с.ш. и $L_s = 330–20^\circ$ для широт $>50^\circ$ ю.ш.

Для изучения состава грунта необходимо использовать только данные, полученные в условиях марсианского лета, когда на поверхности планеты отсутствует сезонный слой осажденной углекислоты. Карты орбитальных измерений потока надтепловых и быстрых нейтронов (рис. 6) составлены из трех частей: северная ($>50^\circ$ с.ш.) соответствует сезонному интервалу лета на севере, экваториальная (50° ю.ш. — 50° с.ш.) — всему периоду наблюдений и южная ($>50^\circ$ ю.ш.) — лету на юге. Пространственные вариации нейтронного потока, представленные на картах, отображают состав приповерхностных слоев грунта.

На картах нейтронного излучения Марса в районе Плато Солнца (координаты его центра соответствуют 265° в.д. и 25° ю.ш.) наблюдается абсолютный максимум потока надтепловых и быстрых нейтронов. Вероятно, содержание воды в грунте здесь минимально. Напротив, минимальный поток нейтронов наблюдается в высокоширотных областях как на севере, так и на юге планеты (рис. 6). Динамический диапазон переменности потока в разных районах поверхности соответствует факторам около 10 для надтепловых нейтронов и около 3 для быстрых нейтронов. Такая значительная региональная переменность нейтронного потока от Марса оказалась полной неожиданностью. Данные нейтронных наблюдений Луны [13] соответствовали величине региональной переменности нейтронов ~20%. Такая региональная переменность на Луне возникает вследствие различия состава породообразующих элементов грунта и небольших изменений в концентрации водорода (50—100 ppm). Измерение величины потока надтепловых нейтронов от Марса более чем на порядок говорит о принципиальном различии грунтов Луны и Марса. Расчеты нейтронного потока показывают, что грунт некоторых районов Марса дол-

жен содержать очень много водорода (до нескольких процентов по массе).

Известно только одно химическое вещество, которое в марсианских условиях может объяснить такое высокое содержание водорода в грунте, — это вода. Наличие небольшого количества водяного пара в атмосфере, присутствие водяного льда в полярных шапках, признаки спорадических потоков на поверхности — все это указывает на H_2O как на единственное водородсодержащее вещество, которое может присутствовать в достаточно большом количестве в грунте Марса. Одна весовая масса водорода соответствует девяти весовым массам воды. Поэтому вывод о наличии в грунте 3—5 масс.% водорода равносителен выводу о наличии в грунте 30—50 масс.% воды. В высокоширотных районах на севере и на юге Марса с низким потоком нейтронов именно водяной лед может рассматриваться в качестве основного породообразующего вещества.

Состав грунта в северной области вечной мерзлоты. Карта содержания водяного льда в северном полушарии получена на основе обработки данных измерений прибора HEND для 74 отдельных участков поверхности (рис.7). Высокое содержание воды (более 50 масс.%) наблюдается во всем полярном секторе от 270° до 90° в.д. Таким образом, данные прибора HEND подтверждают, что северная полярная шапка состоит в основном из водяного льда. Высокое содержание водяного льда в грунте (>30 масс.%) также установлено для обширных территорий далеко за пределами постоянной полярной шапки. В восточном секторе от 0° до 180° в.д. граница содержания водяного льда на уровне 20 масс.% проходит вдоль широтного пояса 67° с.ш. В западном секторе от 210° до 240° в.д. этот уровень опускается до 60° с.ш. Максимальное содержание водяного льда (>35 масс.%) вне постоян-

ной полярной шапки обнаружено в районе с координатами 70° с.ш., 220° в.д. (рис.7).

Таким образом, на севере Марса находится обширный район вечной мерзлоты с очень высоким содержанием водяного льда. Сопоставление данных для надтепловых и быстрых нейтронов (рис.6) показывает, что содержание льда вечной мерзлоты в приповерхностном слое толщиной 1—2 м практически не изменяется с глубиной.

Структура грунта в южной области вечной мерзлоты. На юге Марса также наблюдается обширная территория с очень низким потоком нейтронов. Здесь находится южная вечная мерзлота с высоким содержанием водяного льда, с границей вдоль широтного пояса 60° ю.ш. Однако для этой территории модель грунта с однородным содержанием водяного льда по глубине не согласуется с данными наблюдений [9—12]. Для интерпретации данных необходимо использовать двухслойную модель: слой грунта с высоким содержанием воды (первый свободный параметр) покрыт сверху слоем сухого грунта переменной толщины (второй свободный параметр). Оказалось, что использование двухслойной модели приводит к хорошему согласию с наблюдательными данными. Было показано, что сухой грунт на поверхности имеет плотность около $16\text{--}35$ г/см³ (рис.8). Среднее содержание водяного льда в нижнем слое выше широты 70° ю.ш. практически не меняется и составляет более 40 масс.% (рис.7). На широте около 60° ю.ш. содержание водяного льда составляет 20 масс.%. Получается, что доля водяного льда в грунте вечной мерзлоты на севере и юге примерно одинакова. Различие состоит в том, что на юге лед не выходит на поверхность, а покрыт относительно тонким слоем сухого грунта. Можно предположить, что в настоящее время на Марсе происходит глобальное изме-

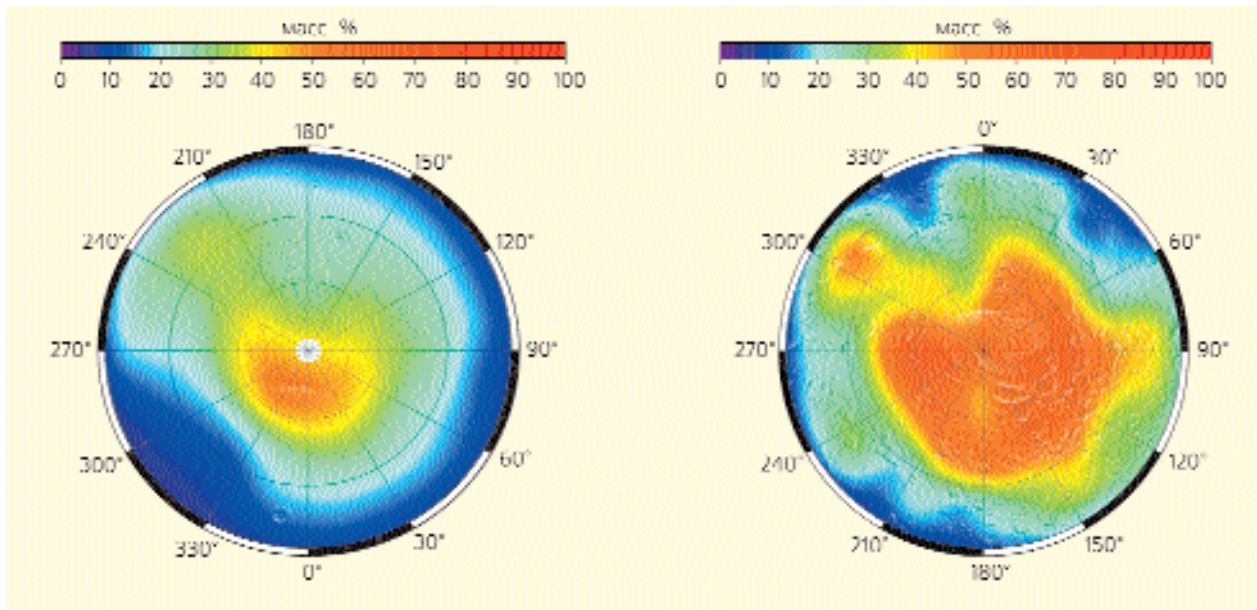


Рис.7. Распределение содержания водяного льда (масс. %) на Марсе для северного района «ледяной мерзлоты» выше 60°с.ш. (слева), по данным однородной модели, и для южного района, по данным двухслойной модели.

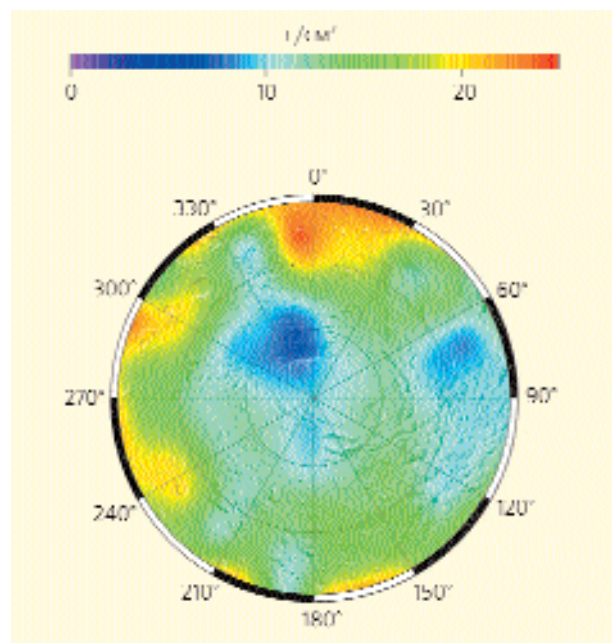


Рис.8. Распределение поверхностной плотности верхнего сухого слоя в южном районе «ледяной мерзлоты» на Марсе, по данным двухслойной модели.

рение климата, при котором водные ресурсы планеты перераспределяются с юга на север.

Следует отметить, что на карте содержания воды под поверхностью Марса никак не выделяется область южной постоянной полярной шапки, лежащая в секторе 270–360°в.д. выше 80°ю.ш. Если южная шапка состоит из замерзшей углекислоты, она должна выделяться ярким пятном нейтронного излучения, так как в сухом веществе с малым содержанием водо-

рода эффективно генерируются нейтроны надтепловых энергий. Данные измерений для зимнего сезона показывают, что даже метровый слой замерзшей углекислоты на поверхности приводит к увеличению потока нейтронов примерно в 5 раз [14]. Напротив, если основную массу постоянной полярной шапки составляет водяной лед, то над южным полюсом должно наблюдаться заметное ослабление нейтронного потока. Ни того, ни другого не происходит.

Следовательно, южная полярная шапка содержит под тонким слоем замерзшей углекислоты примерно такое же количество водяного льда, что и окружающий ее грунт вечной мерзлоты.

Экваториальные районы с высоким содержанием воды. Кроме северной и южной областей вечной мерзлоты, на карте (рис.6) вблизи экватора хорошо заметны два обширных района с низким потоком надтеплого нейтронного излучения. Первый район находится в провин-

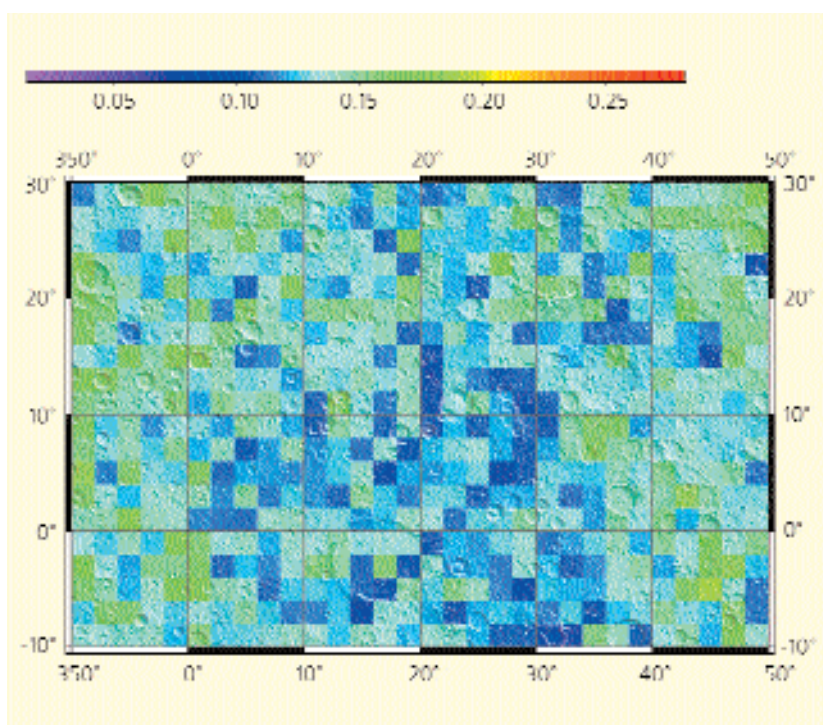


Рис.9. Поток надтепловых нейтронов в районе Аравии с пространственным разрешением 2°. Цветная шкала соответствует отсчетам за 1 с в детекторе MD. Область с минимальным потоком надтепловых нейтронов (и, соответственно, с самым высоким содержанием воды в грунте) имеет координаты около 30°в.д. и 10°с.ш.

ции Аравия (50—350°в.д.). Второй район — Борозды Медузы — расположен диаметрально противоположно (180—210°в.д.). Известно, что в этих двух районах поверхность покрыта очень рыхлыми отложениями. Этот факт в сочетании с их антиподальностью позволил предположить, что в далеком геологическом прошлом в них находились географические полюса планеты [15—16].

Поток надтепловых нейтронов в районах Аравии и Борозд Медузы снижается почти в три раза по сравнению с Плато Солнца (рис.6). Если принять содержание воды в грунте однородным по глубине, то ее массовая доля достигает 10% (при условии, что в сухих районах Плато Солнца содержание воды в среднем составляет около 2%). Эта оценка близка к максимально допустимому содержанию

химически связанной воды в грунте Марса, и поэтому есть основание предполагать, что грунт в этих районах в течение продолжительного геологического времени находился в прямом контакте с водой. Напротив, на карте быстрых нейтронов видимых ослаблений потока в приэкваториальной зоне не наблюдается (рис.6). Вероятно, это связано с тем, что быстрые нейтроны образуются в самом верхнем (около 20 см) слое поверхности, в котором содержание воды гораздо меньше, чем на глубине.

Оценка содержания воды является средней величиной, полученной с поверхности размером около 600 км. Это означает, что на некоторых участках районов Аравии и Борозд Медузы содержание воды в грунте может быть гораздо выше. На рис.9 представлена карта нейт-

ронного излучения района Аравии с пространственным разрешением 2°. Абсолютный минимум потока нейтронов на экваторе наблюдается в районе с координатами 30°в.д., 10°с.ш. в окрестности кратера Араго примерно посередине между крупными кратерами Анри и Тихонравова. Содержание воды в этом районе, согласно двухслойной модели, составляет около 16 масс.% в нижнем слое под сухим грунтом толщиной всего около 18 см. Эта величина близка к максимально допустимой оценке содержания химически связанной воды в веществе грунта и допускает предположение о наличии в нижнем слое грунта водяного льда.

Однако присутствие водяного льда в грунте вблизи экватора трудно объяснить. Дело в том, что на экваторе водяной лед на небольшой глубине должен быстро сублимировать в атмосферу. Объяснить его существование здесь можно очень низкой теплопроводностью грунта, когда суточный прогрев достигает совсем небольшой глубины. Низкую тепловую инерцию обычно имеют глинистые осадочные породы. Действительно, области с низкой тепловой инерцией пересекаются с влажными районами Аравии и Борозд Медузы, однако их границы не вполне совпадают. Во-первых, области с низкой тепловой инерцией гораздо больше влажных районов. Это говорит о том, что низкая тепловая инерция — необходимое условие существования водяного льда, но недостаточное. Во-вторых, в некоторых участках влажные районы лежат за пределом областей грунта с низкой тепловой инерцией. Это означает, что участки с высокой влажностью могут иметь различный состав. В одних участках повышенная влажность может быть связана с высоким содержанием химически связанной воды, а в других — с наличием в грунте свободного водяного льда.

Мобильная гидроразведка поверхности Марса

Выполненные российским прибором HEND глобальные наблюдения потока нейтронов от поверхности Марса позволили надежно установить наличие больших количеств воды в грунте планеты в обширных областях северной и южной вечной мерзлоты и в двух антиподальных районах вблизи экватора. Обнаружение воды в грунте за пределами полюсов существенно изменило наши представления о природной среде Марса. Современный Марс — холодная, но не сухая планета. Этот вывод существенно повлияет на будущие программы исследования и освоения планеты.

Во-первых, получила наблюдательное подтверждение гипотеза о существовании подземных ледниковых пластов на Марсе [17]. Будущим исследователям предстоит оценить полную массу водяной криолитосферы Марса, но факт ее существования можно считать установленным. Во-вторых, наличие воды в грунте ставит вопрос о возможности зарождения и сохранения примитивных форм жизни. Данные прибора HEND показали, что под спускаемым

аппаратом НАСА «Viking-2» на глубине всего несколько сантиметров находится водяной лед. Очевидно, что поиски признаков биологической активности на Марсе будут основываться на данных орбитальной гидроразведки и ориентироваться на изучение грунта под поверхностью планеты. В-третьих, вода — важнейший природный ресурс для полетов людей на Марс. Будущие базы на Марсе должны создаваться с учетом данных о содержании доступной воды в грунте, причем особенный интерес представляют богатые водой районы Аравии и Борозд Медузы на умеренных широтах планеты.

Разработка и успешная реализация эксперимента с российским прибором HEND создали предпосылки для расширения научных исследований планет на основе передовых ядерных технологий. Следующий российский нейтронный прибор DAN (Detector of Albedo Neutrons) отправится на поверхность Марса в 2009 г. Этот прибор предназначен для марсохода «Mars Science Laboratory» (MSL) НАСА. В эксперименте впервые в практике планетных исследований будет применен метод нейтронного активационного анализа грунта для изуче-

ния его состава. DAN содержит импульсный генератор нейтронов 14 МэВ, который испускает 10^7 частиц в импульсе. Полный ресурс генератора около 10^7 импульсов. Генератор прибора DAN будет разработан во Всероссийском институте автоматики им.Н.Л.Духова, а блок электроники и детекторы для регистрации вторичных альбедных нейтронов от поверхности — в ИКИ РАН. MSL — долгоживущий марсоход с большим радиусом действия около 30 км. Российский эксперимент с прибором DAN позволит разведать содержание водорода в грунте вдоль трассы движения марсохода, обнаружить богатые водой участки поверхности с пространственным разрешением около 1 м, собрать образцы грунта с высоким содержанием воды и выполнить их исследования *in situ*.

Начиная с 50-х годов прошлого века, в СССР был накоплен уникальный научно-исследовательский потенциал, объединяющий достижения космической техники и ядерных технологий. Сейчас, благодаря этому наследству, в нашей стране создается аппаратура, которая сможет сыграть ключевую роль в будущих исследованиях Марса и других планет Солнечной системы. ■

Литература

1. Виноградов А.П., Сурков Ю.А., Чернов Г.М. и др. Космические исследования. Т. 4. М., 1966. С.871.
2. Сурков Ю.А. Гамма-спектрометрия в космических исследованиях. М., 1977.
3. Сурков Ю.А. Космохимические исследования планет и спутников. М., 1985.
4. Adler I., Trombka J., Lowman P. et al. // The Moon. 1973. V.7. P.487—504.
5. Surkov Yu.A., Barsukov V.L., Moskalyova L.P. et al. // Nature. 1989. V.341. P.595—598.
6. D'Uston C., Atteia J.L., Barat C. et al. // Nature. 1989. V.341. P.598—600.
7. Boynton W., Feldman W., Mitrofanov I.G. et al. // Space Sci. Rev. 2004. V.110 (1). P.37.
8. Drake D.M., Feldman W.C., Jakosky B.M. // J. Geophys. Res. 1988. V.93. P.6353—6368.
9. Mitrofanov I.G., Anfimov D.A., Kozyrev A.S. et al. // Science. 2002. V.297. P.78—81.
10. Mitrofanov I.G., Zuber M., Litvak M.L. et al. // Science. 2003. V.300. P.2081—2084.
11. Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Козырев А.С. и др. // Астрон. вестн. 2003. Т.37. №5. С.400.
12. Митрофанов И. Г., Литвак М.Л., Козырев А.С. и др. // Астрон. вестн. 2004. Т.38. №4. С.253.
13. Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B. et al. // Science. 1998. V.281. P.1496—1500.
14. Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Козырев А.С. и др. // Астрон. вестн. 2003. Т.37. №5. С.413.
15. Schultz P.H., Lutz A.B. // Icarus. 1988. V.73. P.91—141.
16. Базилевский А.Т., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г. // Астрон. вестн. 2003. Т.37. №5. С.423—434.
17. Кузмин Р.О., Забалуева Е.В., Митрофанов И.Г. и др. // Астрон. вестн. 2004. Т.38. №1. С.1—13.