

3.5.1. ПЛАНЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.5.1.1. Открытие авроры на Марсе в эксперименте СПИКАМ

С помощью спектрометра SPICAM на борту спутника Mars Express свечения на ночной стороне планеты Марс впервые исследованы с орбиты. Открыта авроральная активность и новые свечения полос окисла азота.

На высоких широтах Земли авроральные свечения возникают в результате выпадения заряженных частиц вдоль силовых линий магнитного поля и их взаимодействия с нейтральной атмосферой. Авроральная активность наблюдалась на планетах-гигантах (Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне), обладающих сильным магнитным полем. На ночной стороне Венеры, планеты без магнитного поля, наблюдалось свечение в полосах атомарного кислорода. После открытия космическим аппаратом Mars Global Surveyor остаточной намагниченности марсианской коры была выдвинута гипотеза, что заряженные частицы могут спускаться вдоль силовых линий магнитного поля, идущих от поверхности планеты к солнечному ветру. Первое наблюдение сияния возникающего при выпадениях таких частиц проведено при помощи прибора SPICAM с российским участием на борту европейского космического аппарата Mars Express.

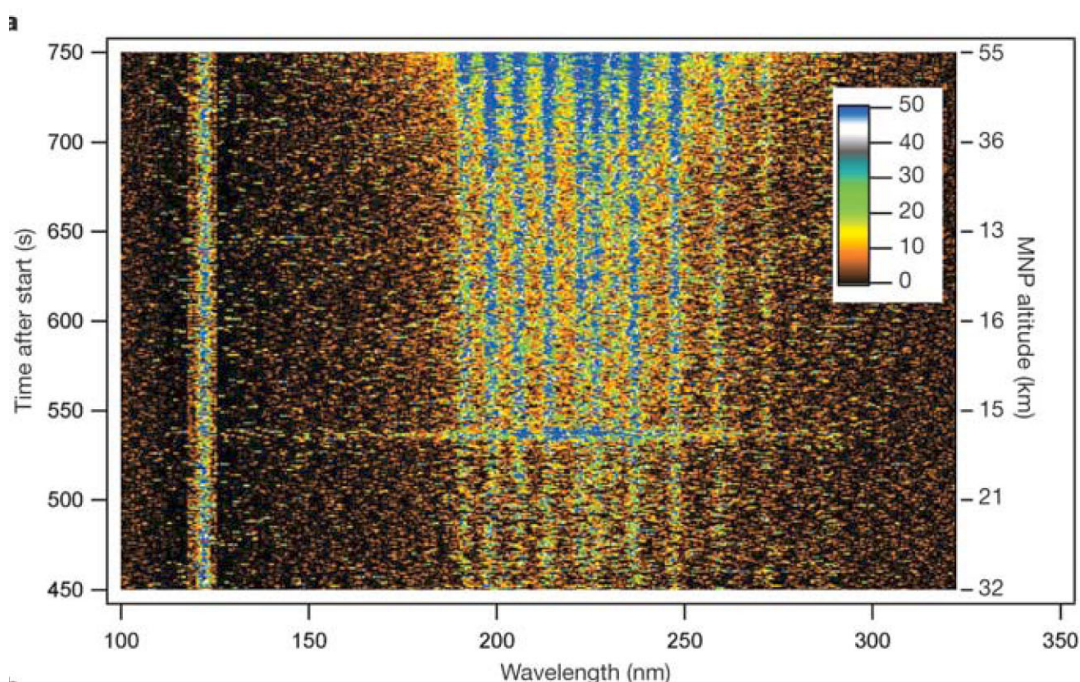


Рис. 1. Временная зависимость интенсивности ночного свечения атмосферы Марса. Оно содержит эмиссию водорода Лайман-альфа и структурированную полосу (190–270 нм), соответствующую NO. На 535 с наблюдений наблюдается пик интенсивности, спектры которого существенно отличаются от обычного спектра NO, и содержат полосы CO и ионизованного CO₂

Наблюдаемая со спутника Mars Express аврора соответствует особому типу сияния, ранее не известному в Солнечной системе. Она отличается от

активности на Земле и планетах-гигантах, наблюдаемой вблизи магнитных полюсов, и от венерианских сияний, размытых по диску планеты. Аврора на Марсе представляет собой сильно локализованное свечение, связанное с магнитными аномалиями марсианской коры. Зарегистрирован спектр аврорального свечения в диапазоне 118–310 нм, состоящий преимущественно из свечений CO и ионизованного CO₂. Аврора наблюдалась на высоте 115–145 км, размер светящейся области по горизонтали около 30 км. Длительность вспышки — не менее 8 с. Географическое положение зарегистрированной вспышки соответствует максимуму намагниченности коры Марса в соответствии с данными космического аппарата Mars Global Surveyor (рис. 1).

3.5.1.2. Наблюдения ночного свечения в верхней атмосфере Марса: NO полосы в UV спектре по результатам эксперимента СПИКАМ

В ультрафиолетовом спектре ночного неба Марса открыты новые свечения полос окисла азота NO (190–270 нм). Такое свечение наблюдалось ранее на Венере, но никогда не наблюдалось на Марсе. Атомы азота и кислорода, при рекомбинации которых возникает свечение, образуются в результате фотодиссоциации молекул O₂, CO₂ и N₂ на дневной стороне планеты, и попадают на ночную сторону в результате атмосферной циркуляции. Наиболее яркое свечение NO наблюдается во время полярной ночи в южном полушарии, что объясняется интенсивным переносом CO₂-атмосферы, конденсирующейся на поверхности в это время года. Это предоставляет новую возможность дистанционного исследования атмосферной циркуляции на Марсе (рис. 2).

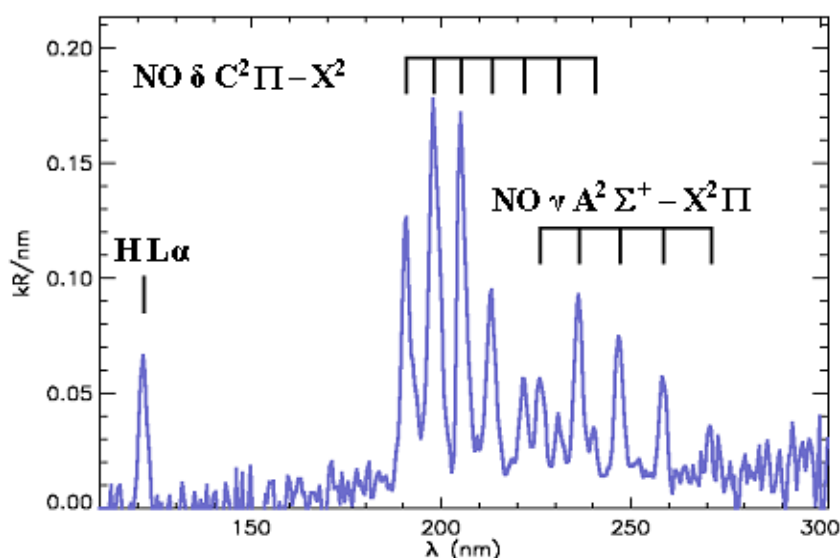


Рис. 2. Спектр ночного свечения Марса измеренный прибором SPICAM на борту КА Mars Express. Помимо линии Lα на 121,6 нм, открыты новые полосы, соответствующие основным колебательным переходам NO

Эксперимент SPICAM (Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars) на космическом аппарате Mars Express состоит из двух спектрометров ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазонов. Прибор построен усилиями трех организаций во Франции, в Бельгии и в Институте космических исследований (ИКИ) в Москве.

3.5.1.3. Гравитационные волны и CO₂-облака в полярной области в конце зимы (по измерениям OMEGA and PFS Mars Express)

Наибольшей интенсивности эмиссии достигают в северной полярной области в конце полярной зимы. Изображения ОМЕГА на орбите 68 в полосе излучения 1,27 мкм имеют волновую структуру, подобные же волны наблюдаются и в изображениях облаков из водяного льда и CO₂. Это могут быть гравитационные волны, которые наблюдаются в атмосфере Марса в северной полярной области в эмиссии O₂ впервые. Сильная температурная инверсия на высоте 10–20 км, которая наблюдалась на орбите 68 прибором ПФС, ниже которой может происходить конденсация CO₂, создает благоприятные условия для генерации гравитационных волн. Хотя эмиссии O₂ наблюдаются во многих спектрах, но волновые структуры наблюдались только в двух сеансах вблизи северного полюса (68 и 588). Планируются в дальнейшем провести совместные наблюдения ПФС и ОМЕГА вблизи терминатора над зимним полюсом, где и должны наблюдаться волновые структуры (рис. 3).

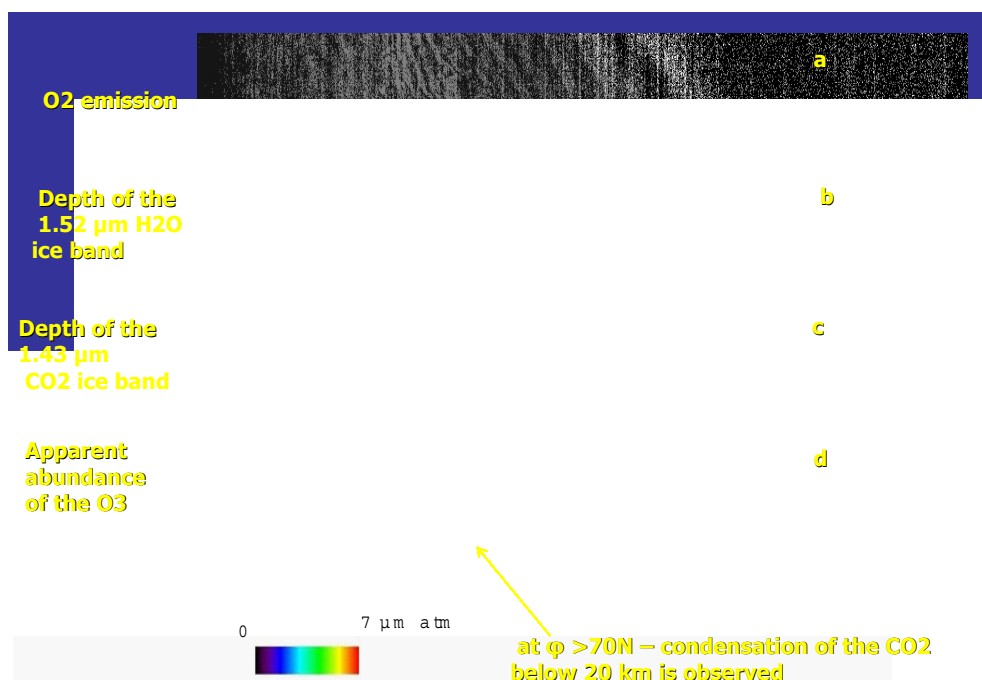


Рис. 3. Результаты ОМЕГА: а — распределение эмиссии O₂ 1,27 мкм; б — изображение в полосе поглощения водяного льда 1,52 мкм; с — изображение в полосе поглощения углекислого льда 1,43 мкм; d — распределение озона

3.5.1.4. Вертикальные профили озона по лимбовым измерениям OMEGA

По абсолютной интенсивности эмиссии O_2 1,27 мкм можно определить содержание озона, так как при фотодиссоциации озона 90 % молекул дают O_2 в возбужденном состоянии, при излучении с которого и возникает эмиссия 1,27 мкм. Ниже некоторого уровня (15–20 км) становится существенной деактивация столкновениями и полученное содержание озона ниже этих уровней может быть заниженным. При лимбовых наблюдениях можно найти содержание озона на луче зрения. Максимальные содержания получены над областями Argire и Noachis (рис. 4).

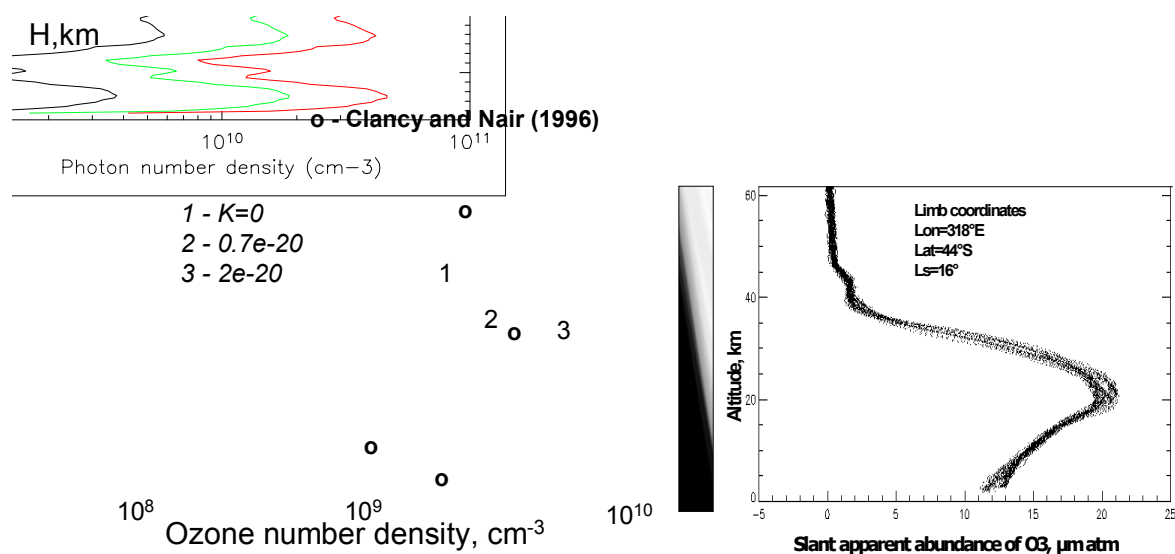


Рис. 4. Вертикальный профиль озона над Argire Planitia и максимальное содержание озона: $\varphi = -44^\circ N$, $\lambda = 318^\circ E$, $L_s = 16^\circ$, $L_t = 10,8h$. Этот утренний профиль имеет также пик при 40–50 км как результат ночного озонового слоя

3.5.1.5. Сезонные вариации термической структуры Марсианской атмосферы

С помощью Планетного Фурье Спектрометра (PFS) можно получить поле температуры в координатах высота-широта для каждой орбиты. ПФС позволяет получить температурные профили и оптическую толщину для аэрозоля для единственного спектра или путем усреднения по многим спектрам на той же орбите (для увеличения отношения сигнал/шум) (рис. 5).

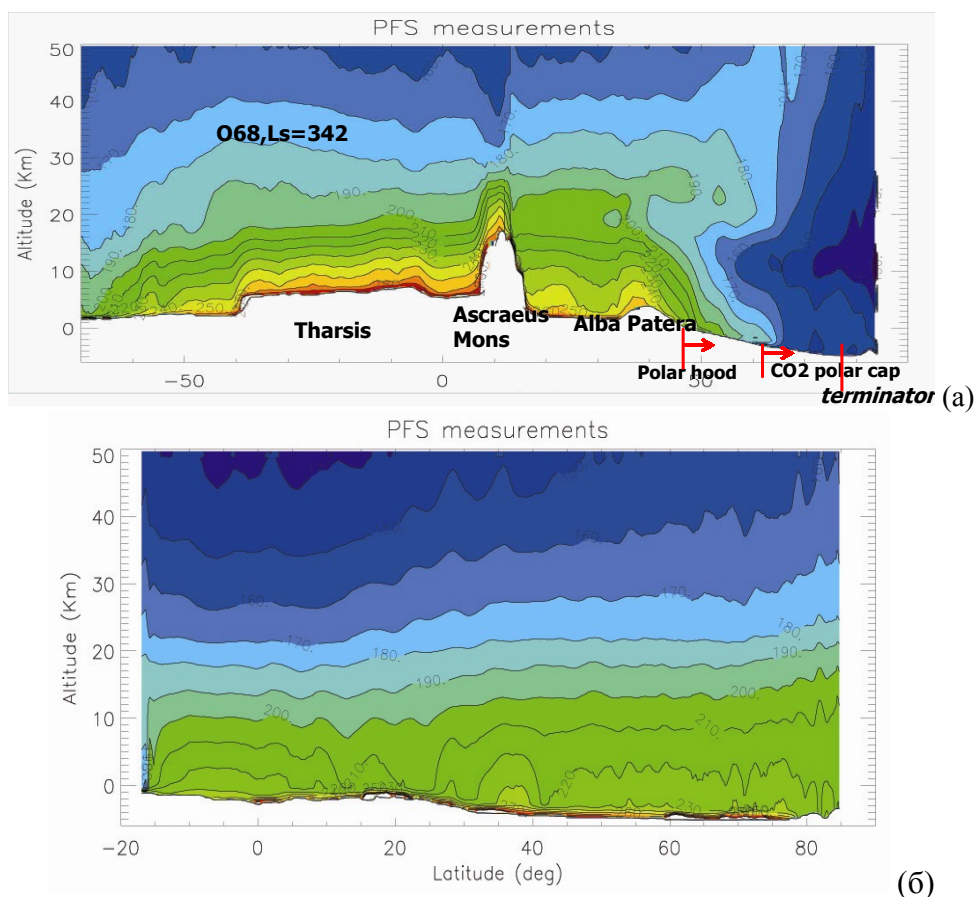


Рис. 5. Примеры температурных полей по данным ПФС: а) — $L_s = 342^\circ$ (поздняя северная зима); б) — $L_s = 97^\circ$ (лето)

Некоторые важные выводы

1. Наблюдаемая температурная инверсия (на высоте 10–20 км) связана с нисходящей ветвью ячейки Хэдли. Эта инверсия в полярном вихре исчезает в период равноденствия, когда меняется циркуляция.

2. Спектральное разрешение ПФС ($1,8 \text{ см}^{-1}$) с аподизацией позволяет получать температурные профили сложной формы в случае инверсии. Температурные профили для ночного периода (зима) в полярных областях, ночные наблюдения в низменных областях (Hellas) и на высоте (вулканы) получены.

3. Найдены близкие к изотермическим температурные профили на северном полюсе летом для малых высот и облака из водяного льда в приповерхностном слое. Выше 20 км температура увеличивается с увеличением широты.

3.5.1.6. Пыль и облака из водяного льда по измерениям PFS Mars Express

1. Как было установлено, рельеф важен при наблюдениях аэрозоля в атмосфере. Найдено, что в период позднего южного лета вдоль орбиты проходящей через низменные области фиксировалась только пыль, вертикальное распределение которой определяется шкалой высот 11 км

(в среднем вдоль орбит от 70° S до 40° N). Вдоль орбиты проходящей через вулканы наблюдались и облака водяного льда, и пыль, с преимущественным преобладанием водяных облаков над вулканами.

2. На основании наблюдений ПФС можно выделить несколько типов облаков водяного льда.

Орографические облака. Облака над вулканами наблюдались во все сезоны. Орографические облака из водяного льда идентифицированы над вулканами в конце южного лета и их толща возрастает с приближением к афелию. Олимп (орбита 37) и Ascræus Монс (орбита 68) наблюдались около полудня в сезон $L_s = 337^{\circ}$ и 342° соответственно. Эффективный радиус частиц оценен, равным 1–3 мкм: он изменяется вдоль склона. Соответствующая визуальная оптическая толща равна 0,2–0,4 над Олимпа и 0,1–0,6 над Ascræus Монс. В случае Ascræus Монс облака из водяного льда наблюдались на южном склоне с максимальной оптической толщиной над вершиной вулкана с южной стороны. В случае Олимп облака были найдены по обе стороны вершины. Изображение Ascræus Монс, полученное видимым каналом ОМЕГА одновременно с PFS, подтверждает присутствие облаков из водяного льда. Показана асимметрия облаков над вулканами Tharsis: во все сезоны наиболее интенсивные облака наблюдаются на южном склоне.

Орбита 913 ($L_s = 97$) проходит через Pavonis Монс. Если на южном склоне оптическая толща облаков из водяного льда достигает нескольких единиц, то на северном склоне она минимальна (<1). Наблюдения видимого канала ОМЕГА показывают оптически толстые облака над вулканами в афелии. На широтах южнее 50° S на поверхности конденсируется лед CO_2 . Южный полярный воротник (облака из водяного льда) наблюдался южнее 47° S при $L_s = 97^{\circ}$ вблизи афелия.

Водяные облака в афелии. Экваториальный пояс облаков наблюдался на широте 20° S, 40° N и имел оптическую толщину на 825 см^{-1} от 0,1 до 0,5. Эффективный размер частиц составлял 1–3 мкм. Над северным полюсом обнаружены облака из водяного льда вблизи поверхности над тающей полярной шапкой. Облака состоят из частиц размером 1–1,5 мкм, оптическая толща на 825 см^{-1} достигает единицы.

Полярный воротник (полярный капюшон). Северный полярный воротник наблюдался начиная с орбиты 10, $L_s = 331^{\circ}$ (в конце зимы в северном полушарии). Граница находилась на широте 40° , с течением времени граница быстро движется на север и при $L_s = 13^{\circ}$ она уже на широте 58° . Полярный капюшон исчезает летом и появляется осенью.

Ниже уровня 1 мб обнаружена инверсия в температурных профилях с температурным максимумом в районе уровня 0.6 мб. Эта инверсия типична для зимнего сезона и наблюдается как в северном, так и южном полярном районе. Она связана с нагревом в нисходящей ячейке Хэдли. Эта инверсия исчезает, вблизи равноденствия, когда изменяется характер глобальной циркуляции. Эта инверсия не столь ярко выражена в южном полушарии в зимний период, так как в это время Марс находится в афелии, и все процессы менее выражены в этот период.

Наблюдение утренней дымки в долине Маринеров. Одновременно PFS и ОМЕГА наблюдали утреннюю дымку в долине Маринера на орбите 448 при $LT = 9h$ и $Ls = 38^\circ$ — осень в южном полушарии.

По спектрам ПФС показано, что дымка состоит из водяного льда с эффективным размером частиц 2–3 мкм и оптической толщиной 0,42 на волновом числе 825 см^{-1} . Температура поверхности и атмосферы внутри долины ниже приблизительно на 10 К, чем вне долины. Одновременно производились измерения спектрометром ОМЕГА и стерео камерами HSRC. Одно из изображений, синтезированных по наблюдениям в видимом канале ОМЕГА, показано на рисунке.

Экваториальный пояс облаков на этой орбите наблюдался на широтах $0\text{--}30^\circ\text{ N}$, оптическая толща изменялась 0,05 до 0,4 на 825 см^{-1} (усредненная по полю зрения ПФС).

3.5.1.7. Исследования современного климата Марса с помощью модели общей циркуляции атмосферы

Проведена модернизация модели общей циркуляции атмосферы Марса, построенной на основе модели Лаборатории геофизической гидродинамики США. Модель переведена на сетку с более высоким пространственным разрешением ($2\times 2,4^\circ$). Усовершенствована физическая параметризация процессов коагуляции аэрозолей и их оптических свойств. В модель включена субмикронная фракция аэрозольных частиц, что улучшило согласие с наблюдениями температурных профилей и обеспечило постоянное наличие в атмосфере свободных ядер конденсации.

Проведено моделирование гидрологического цикла Марса с целью достижения согласия с наблюдениями КА «Марс-Экспресс». На настоящий момент модель дает в несколько (2-3) раз большее содержание водяного пара в тропической атмосфере, чем наблюдается прибором СПИКАМ. Широтное распределение водяного пара и его сезонный ход качественно совпадает с наблюдаемым, однако для достижения совпадения требуется привлечь дополнительный источник пыли на полюсах для снижения широтного температурного контраста и как следствие — интенсивности циркуляции ячейки Хэдли. Исследован вклад стационарных и квазистационарных планетарных волн в меридиональный перенос воды, показано, что области повышенного содержания водорода в Аравии и к ЮЗ от Олимпа могут быть результатом ускоренного накопления атмосферной влаги в указанных областях за счет стационарной волны с зональным числом 2.

3.5.1.8. Микрофизическая модель аэрозольной дымки Титана

Целью моделирования был поиск согласия с данными поляриметрических и фотометрических наблюдений спускаемого аппарата

«Гюйгенс», которые предполагают вертикально однородную структуру аэрозольного слоя в диапазоне наблюдений (0–160 км), причем размер мономера порядка 0,05 мкм, а типичный размер кластера — около 1 мкм. Была построена подробная одномерная модель фотохимического аэрозоля, самосогласованно учитывающая процессы коагуляции, зарядки частиц за счет фотоэффекта и столкновений, турбулентную диффузию и оседание в гравитационном поле. Уравнение Смолуховского для фотохимических частиц решается при помощи неявной схемы Якобсона, обеспечивающей высокую точность. Показано, что близкий к наблюдаемому размер мономера $r_m \sim 0,05$ мкм достигается, если ограничить степень ионизации частицы единичным зарядом.

3.5.1.9. Российский эксперимент ХЕНД на борту космического аппарата НАСА «Марс Одиссей»

В настоящее время на борту космического аппарата НАСА «Марс Одиссей» успешно работает российский прибор ХЕНД (High Energy Neutron Detector, HEND), который регистрирует нейтронное излучение с поверхности Марса. «Марс Одиссей» был запущен с космодрома на мысе Канаверал в апреле 2001 года и в октябре того же года вышел на орбиту вокруг Марса (рис. 1). С тех пор прибор ХЕНД совместно с другими научными приборами этого проекта проводит непрерывные измерения Марса с орбиты. Прибор ХЕНД разработан в Институте космических исследований РАН по заказу Федерального космического агентства.

Вследствие тонкой атмосферы Марса космические лучи свободно проникают на его поверхность и создают вторичное ядерное излучение нейтронов и гамма-лучей. Измерения этого излучения с орбиты позволяют оценить концентрации основных породообразующих элементов в грунте Марса. Нейтронное излучение особенно чувствительно к присутствию под поверхностью Марса водорода, так как водород существенно влияет на эффективность термализации нейтронов в процессе их диффузного выхода с поверхности.

Основным водородосодержащим веществом в грунте Марса является вода, поэтому регистрация нейтронов с круговой полярной орбиты аппарата «Марс Одиссей» позволяет построить карту распространенности воды (или водяного льда) в грунте красной планеты (рис. 6).

На основе данных российского прибора ХЕНД было установлено, что содержание водяного льда в грунте Марса на широтах выше 60° составляет более 30–50 % по массе, то есть водяной лед фактически является основным породообразующим веществом. Кроме этого оказалось, что высокое содержание воды до 10 % по массе также наблюдается в грунте Земли Аравии и в районе юго-западу от горы Олимп, которые расположены вблизи экватора Марса (рис. 7). Результаты эксперимента ХЕНД имеют важное значение для выяснения процессов глобальной эволюции Марса. Эти

результаты будут также использоваться при подготовке будущих исследовательских экспедиций на Марс.

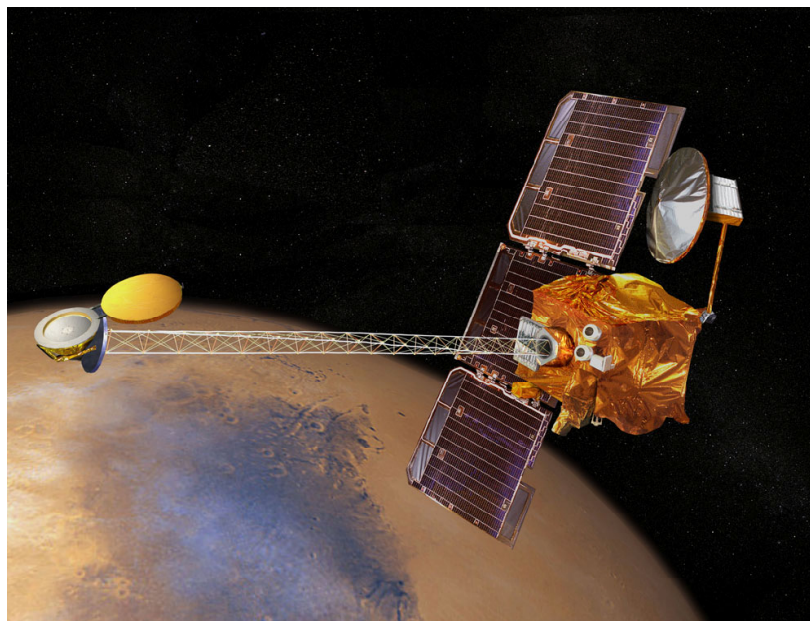


Рис. 6. Космический аппарат НАСА «Марс Одиссей» с российским прибором ХЕНД на борту

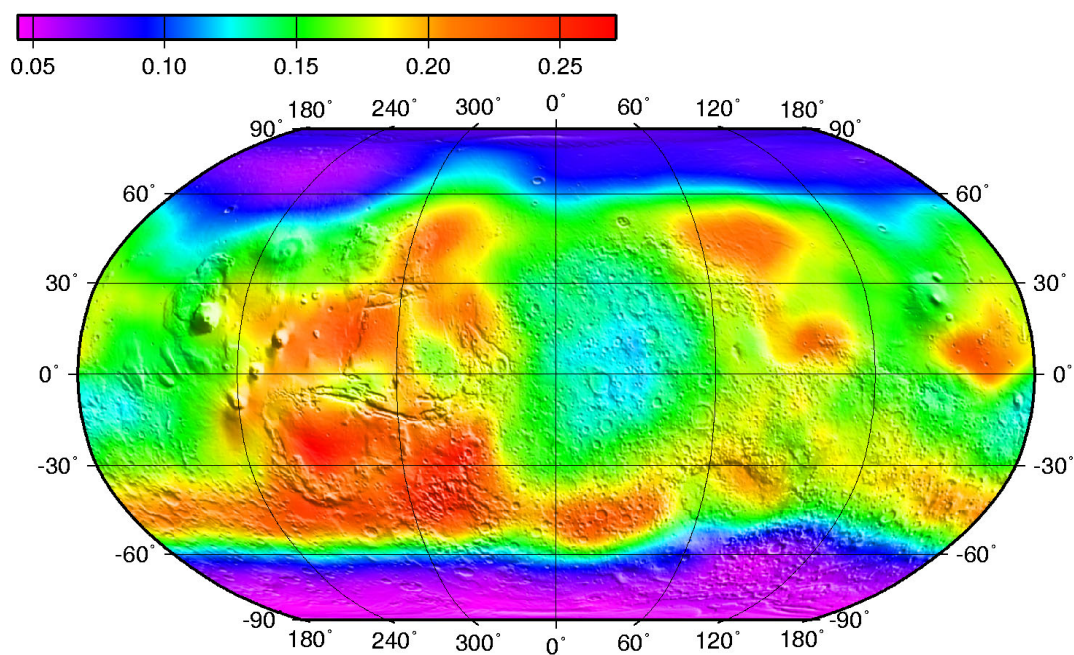


Рис. 7. Карта потока эпитепловых нейтронов с поверхности Марса по данным измерений российского прибора ХЕНД с борта космического аппарата НАСА «Марс Одиссей». Различные цвета отображают динамический диапазон темпа счета нейтронов (отсч./с) в детекторе MD, красный и фиолетовый цвета представляют максимум и минимум, соответственно. Для высоких широт северного полушария $>50^\circ \text{C}$ данные измерений получены в сезон северного лета $L_s = 0-180^\circ$, для высоких широт южного полушария $>50^\circ \text{ЮШ}$ данные соответствуют сезону южного лета $L_s = 330-20^\circ$

Осаждение атмосферной углекислоты на поверхность Марса зимой изменяет элементный состав в слое, который излучает не нейтроны, поэтому данные наблюдений прибором ХЕНД позволяют выполнить оценку толщины слоя «сухого льда» из углекислоты в различных участках поверхности Марса. На основе обработки данных непрерывных нейтронных измерений прибора ХЕНД удалось построить сезонный профиль изменения массы осаждаемой углекислоты в северном и южном полушариях планеты (рис. 8, 9).

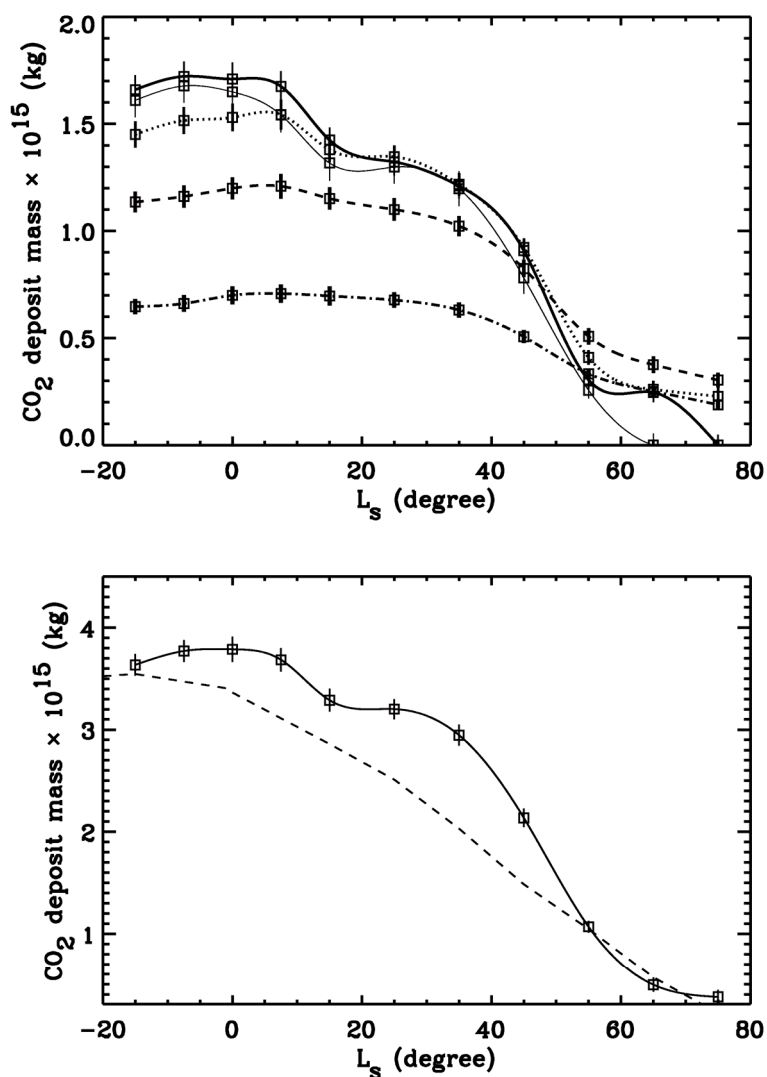


Рис. 8. Измерения массы осаждаемого CO₂ в северном полушарии в зависимости от времени марсианского года. На верхнем рисунке: тонкая кривая соответствует измерению массы осаждаемой углекислоты в широтном поясе 60–70° СШ, толстая кривая соответствует измерению массы осаждаемой углекислоты в широтном поясе 65–75° СШ, точечная кривая соответствует измерению массы осаждаемой углекислоты в широтном поясе 70–80° СШ, пунктирная кривая соответствует измерению массы осаждаемой углекислоты в широтном поясе 75–85° СШ, и штрих-пунктирная кривая соответствует измерению массы осаждаемой углекислоты в широтном поясе 80–90° СШ. На нижнем рисунке: сплошная кривая показывает измерение полной осаждаемой массы по данным нейтронных измерений, пунктирная кривая соответствует предсказаниям атмосферной модели Марса GCM

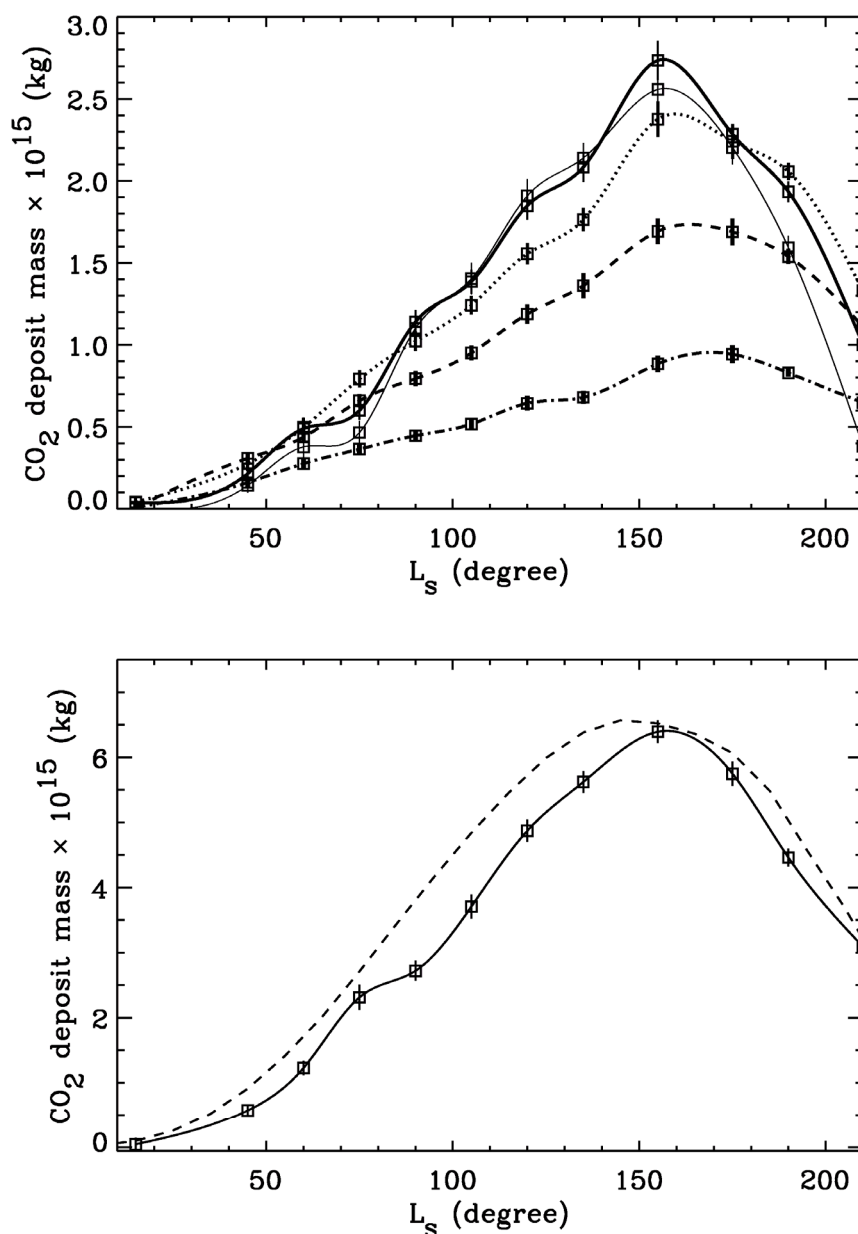


Рис. 9. Измерения массы осажденного CO₂ в южном полушарии в зависимости от времени марсианского года. На верхнем рисунке: тонкая кривая соответствует измерению массы осажденной углекислоты в широтном поясе 60–70° ЮШ, толстая кривая соответствует измерению массы осажденной углекислоты в широтном поясе 65–75° ЮШ, точечная кривая соответствует измерению массы осажденной углекислоты в широтном поясе 70–80° ЮШ, пунктирная кривая соответствует измерению массы осажденной углекислоты в широтном поясе 75–85° ЮШ, и штрих-пунктирная кривая соответствует измерению массы осажденной углекислоты в широтном поясе 80–90° ЮШ. На нижнем рисунке: сплошная кривая показывает измерение полной осажденной массы по данным нейтронных измерений, пунктирная кривая соответствует предсказаниям атмосферной модели Марса GCM

Продолжение эксперимента ХЕНД на космическом аппарате «Марс Одиссей» в 2007–2009 гг. позволит получить достаточный объем данных для проверки гипотезы о слоистом характере водосодержащего грунта во влажных районах Марса вблизи экватора. Эти данные также позволят

выяснить, в какой форме (адсорбирования, химически связанная, свободный лет) вода присутствует в грунте на низких широтах. Благодаря тому, что «Марс Одиссей» будет находится на околомарсианской орбите несколько марсианских лет, можно будет выполнить сравнение сезонных вариаций в северном и южном полушариях и сделать выводы о стабильности климата Марса.