

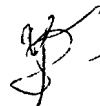
На правах рукописи

Федорова Анна Александровна

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЯ ПО ПОЛОСАМ
CO₂ И ВЛИЯНИЕ АЭРОЗОЛЯ НА ПОЛОСЫ H₂O В СПЕКТРАХ
МАРСА

Специальность 01.03 04 - «планетные исследования»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



МОСКВА 2004

Работа выполнена в Институте космических исследований
Российской академии наук (РАН)

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук
профессор [Мороз В.и] (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук
Шематович В.И. (ИНАСАН)
Доктор физико-математических наук
Иванов В Н. (НПО «Тайфун», ИЭМ)

Ведущая организация:

Институт физики атмосферы
им. А.М. Обухова РАН

Защита диссертации состоится " " декабря 2004 г. в ____ часов на
заседании диссертационного совета Д 002.113.02 в Институте
космических исследований РАН по адресу: 117997, г. Москва, ул.
Профсоюзная, д.84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
космических исследований РАН.

Автореферат разослан " " 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Ткаченко А.Ю.

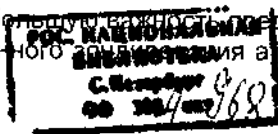
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С началом эры космических исследований началось интенсивное изучение планет Солнечной системы с помощью орбитальных и спускаемых аппаратов. Особое место среди объектов исследований занимает Марс, в связи с непрекращающимися попытками обнаружить жизнь на этой планете. В настоящее время постоянный мониторинг Марса с американского орбитального аппарата «Марс-Глобал-Сервейор» и европейского спутника «Марс-Экспресс» дает неоценимую информацию о тепловом режиме планеты, временных и пространственных вариациях составляющих атмосферы Марса. Полученные недавно с помощью российского прибора HEND (на борту американского аппарата «Марс - Одиссей») результаты о подповерхностном распределении водяного льда добавили множество вопросов о происхождении ледяных областей в приповерхностном слое Марса, стабильности таких образований и гидрологическом цикле на планете. В ближайшие годы планируется интенсивное исследование планеты с помощью европейских и американских спускаемых аппаратов, причем многие научные эксперименты этих миссий поставлены с участием российских ученых.

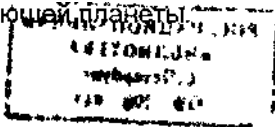
Такое интенсивное исследование необходимо для понимания современного состояния климатической системы планеты. Основными факторами, влияющими на поведение марсианской атмосферы, являются химические и тепловые процессы, происходящие в ней. Построение долговременного прогноза невозможно без длительного глобального наблюдения за основными параметрами атмосферы, их суточными, пространственными и сезонными вариациями, дающими возможность построить модели общей циркуляции. Как и в случае Земли, такой долговременный глобальный мониторинг с хорошим пространственным разрешением можно обеспечить только с помощью орбитальных аппаратов, поскольку спускаемые аппараты ограничены координатами места посадки, хотя нельзя не оценить их значимости в плане наблюдения за суточными и сезонными изменениями атмосферы. В свою очередь, наземные наблюдения имеют плохое пространственное разрешение и ограничены во времени.

В свете всего вышесказанного большое значение представляет развитие новых методов дистанционного



планеты с орбитальных аппаратов. В настоящее время в области исследования атмосферы Марса наиболее актуально стоят вопросы изучения постоянно присутствующего в атмосфере аэрозоля, а также гидрологического цикла на планете.

Несмотря на разреженность, атмосфера Марса содержит значительное количество пыли. Конденсационные облака и пылевая дымка влияют на тепловой баланс атмосферы, участвуя в процессах переноса излучения, испарения и конденсации. Они влияют на атмосферную динамику, процесс обмена веществом атмосферы с поверхностью, и, возможно, участвуют в атмосферных химических реакциях. Понимание истории марсианского климата и его современного состояния невозможно без детального изучения аэрозольной составляющей атмосферы. Основные сведения об аэрозоле на Марсе были получены следующими методами: 1) зондирование аэрозоля в тепловом диапазоне спектра по полосе поглощения минералов 9 мкм и водяного льда 12 мкм с орбиты планеты (TES, IRIS, IRTM) - получены значения оптических толщин, а также проведена идентификация по спектральной зависимости коэффициента поглощения; 2) измерение яркости неба в видимой области на разных угловых расстояниях от Солнца с поверхности планеты - получены оптические характеристики пылевых частиц и распределения частиц по размерам, а также измерения прямого солнечного излучения с поверхности планеты в видимой области спектра - получены непрозрачности атмосферы на луче зрения (1MP/«Марс-Пасфайндер», камера Викингов 3) последовательность наблюдений фазовой функции EPF (emission phase function), когда проводятся непрерывные наблюдения одной точки поверхности с орбиты под разными фазовыми углами (болометрические каналы IRTM и TES) - возможность определения оптических толщин и свойств аэрозоля; 4) метод солнечного просвечивания (Ogust/«Фобос-2») - определение вертикального распределения аэрозоля; 5) распределения яркости по диску Марса и наблюдения лимба в тепловом (Термоскан/«Фобос-2») и видимом диапазоне (КРФМ/«Фобос-2») с возможностью определения вертикального профиля аэрозоля в атмосфере. Измерения оптических толщин аэрозоля в разных областях спектра дает возможность получить информацию о размерах и составе частиц, что важно при моделировании общей циркуляции атмосферы. Поскольку каждый из методов имеет свои трудности при интерпретации результатов, развитие новых методов зондирования аэрозоля даст возможность получения дополнительной информации об аэрозольной составляющей планеты.



Современный цикл и история воды на Марсе являются одной из фундаментальных и наиболее интересных проблем климата этой планеты. И хотя содержание водяного пара в марсианской атмосфере незначительно относительно содержания порядка 10^{14}), он влияет на энергетический баланс атмосферы: например, определяет процессы формирования облаков, которые активно участвуют в переносе радиации. Кроме того, происходит активный обмен водой между атмосферой и реголитом поверхности.

Первые сведения о содержании водяного пара в атмосфере Марса были получены с помощью наземных наблюдений по колебательно-вращательной полосе в области 8200А. Подобные наблюдения связаны с многочисленными трудностями, к тому же полученные результаты в большинстве своем относились к средним по диску значениям. С помощью орбитальных аппаратов содержание водяного пара определялось в основном по инфракрасным полосам H_2O 1,38 мкм и вращательной полосе в диапазоне 20-50 мкм.

До конца 90-х годов XX века наиболее детальным источником информации о глобальном распределении водяного пара в атмосфере и его сезонных вариациях были данные эксперимента MAWD (Mars Atmospheric Water Detector, проект «Викинг-1 и 2»). Наблюдения были выполнены в полосе 1,38 мкм водяного пара, и полученные результаты дали основу для моделирования общей циркуляции атмосферы планеты и гидрологического цикла на Марсе. В конце 1990-х - начале 2000-х годов результаты, полученные прибором TES («Марс-Глобал-Сервейор») по вращательной полосе водяного пара в области 28-42 мкм, дали новую картину глобального сезонного распределения водяного пара в атмосфере планеты и показали расхождения с распределениями, полученными MAWD, в сезон прохождения планетой перигелия. Подобные расхождения могут относиться и к реальным межгодовым вариациям распределения водяного пара, и к неопределенностям, возникающим при восстановлении результатов по разным полосам спектра. Каждый из методов измерения имеет свои трудности при интерпретации и, если в тепловом диапазоне основным фактором, влияющим на результат, будет вертикальное распределение H_2O и температурный профиль атмосферы, то в случае коротковолнового ИК-диапазона - это влияние рассеяния на аэрозоле на глубину полосы поглощения атмосферного газа. Таким образом, построение гидрологического цикла по результатам наблюдений требует уточнения существующих методов восстановления содержания водяного пара и учета основных неопределенностей.

Цели и задачи работы - развитие нового метода дистанционного зондирования аэрозоля в атмосфере Марса; оценка влияния многократного рассеяния на аэрозоле на восстановление содержания малых составляющих марсианской атмосферы в ближней инфракрасной области.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

- Обоснование и исследование возможности аэрозольного зондирования атмосферы Марса по полосе углекислого газа 2,7 мкм.
- Исследование возможности применения метода к реальным наблюдениям с орбитальных космических аппаратов на примере данных, полученных обсерваторией ISO (Infrared Space Observatory).
- Исследование влияния многократного рассеяния на аэрозоле на полосы малых составляющих атмосферы Марса в ближней инфракрасной области.
- Новый анализ данных, полученных прибором MAJЮ/«Викинг-1 и 2». Восстановление содержания водяного пара по полосе 1,38 мкм с учетом многократного рассеяния.
- Анализ сезонного распределения содержания водяного пара, сравнение результатов MAWD и TES.

Научная новизна

- Разработан новый метод дистанционного зондирования марсианского аэрозоля по полосе углекислого газа 2,7 мкм.
- Впервые к обработке реальных спектров применен метод дистанционного зондирования по полосе 2,7 мкм CO₂. В результате получены средние по диску значения оптической толщины аэрозоля в атмосфере Марса в период июль-август 1997 года по данным ISO.
- Получены новые карты распределения водяного пара по данным MAWD с учетом многократного рассеяния на пыли. Обоснована важность учета рассеяния при восстановлении содержания малых составляющих по полосам в ближней инфракрасной области. Сравнение недавних результатов прибора TES и пересмотренных результатов MAWD, возможно, указывают на стабильность водяного цикла на Марсе.

Научная и практическая ценность работы

Разработанный метод дистанционного зондирования аэрозоля в атмосфере Марса планируется использовать при анализе результатов экспериментов ОМЕГА и ПФС, оба прибора прибыли к Марсу 25 декабря 2003 г. на борту аппарата «Марс-Экспресс». Эти спектрометры работают в широком диапазоне спектра: картирующий спектрометр ОМЕГА - диапазон 0,5 - 5,2 мкм, спектральное разрешение $\sim 50 \text{ см}^{-1}$, пространственное разрешение $\sim 3 \text{ км}$; инфракрасный фурье-спектрометр ПФС - диапазон 1,2-40 мкм, спектральное разрешение 2 см^{-1} , пространственное разрешение -20 км. Таким образом, возможно одновременное восстановление содержания газовых и аэрозольных составляющих атмосферы, а также температуры и давления. В настоящее время метод успешно применяется для картирования распределения интегрального содержания аэрозоля по данным эксперимента ОМЕГА.

Полученные значения средней по диску Марса оптической толщины аэрозоля в июле-августе 1997г., что соответствует концу лета в северном полушарии 167 и 157° , показали не только согласие с другими наблюдениями в тот же период («Марс-Пасфайндер» и телескоп имени Хаббла), что может говорить об эффективности метода, но и добавили новые результаты в статистический банк данных о сезонных изменениях аэрозоля на Марсе.

Анализ влияния аэрозольного рассеяния на полосу поглощения водяного пара 1,38 мкм указывает на необходимость учета многократного рассеяния при восстановлении H_2O при воздушных массах больше 3, к тому же незнание вертикального распределения и оптических свойств аэрозоля может привести к значительным неопределенностям в полученном результате. Эти выводы актуальны в свете эксперимента СПИКАМ на борту «Марс-Экспресс», инфракрасный канал которого работает в диапазоне 1-1,7 мкм и одной из научных задач которого является мониторинг водяного пара по полосе 1,38 мкм. Алгоритмы, разработанные для анализа данных MAWD, используются для обработки спектров, полученных СПИКАМ.

Полученная в результате повторного анализа данных MAWD (1976-1979гг.) карта сезонного распределения водяного пара находится в хорошем согласии с картой, построенной по результатам эксперимента TES (1997-2001 г., два марсианских года). Само по себе это может говорить о стабильности водяного цикла на Марсе, что было не очевидно ранее, когда предполагались

межгодовые вариации цикла. Недавние результаты Моделей общей циркуляции марсианской атмосферы (Richardson и Wilson, 2002), а также двухгодичные наблюдения TES говорят о стабильности гидрологического цикла на планете, и расхождения между результатами MAWD и TES, отмеченные в первый год наблюдений последнего, относятся скорее к несовершенствам методов восстановления.

Личный вклад автора

Все работы автора диссертации выполнены в соавторстве. Ему принадлежит равный с другими соавторами вклад в обоснование метода дистанционного зондирования по полосе 2,7 мкм CO₂, а также программная реализация расчета синтетических спектров Марса в полосе 2,7 мкм. В работе над данными ISO автору принадлежит разработка программ для обработки спектров и анализ результатов. В работе по повторному анализу данных MAWD автору принадлежит равный с другими соавторами вклад в методическую и программную реализацию обработки данных, а также в обсуждение сезонного распределения водяного пара по данным MAWD и TES и стабильности водяного цикла, вытекающего из моделей общей циркуляции атмосферы Марса. Автором также выполнено теоретическое обоснование необходимости повторного восстановления содержания водяного пара по полосе 1,38 мкм.

Апробация результатов

Результаты, изложенные в диссертации, обсуждались на семинарах отдела «Физики планет» ИКИ РАН, а также были доложены на следующих конференциях:

1. Международная конференция студентов-физиков, Коимбра, Португалия, 1998.
2. American Astronomical Society, DPS meeting 31, 75.04, Падуа, Италия, 1999.
3. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2001, Санкт-Петербург, 2001.
4. 34-ая генеральная ассамблея COSPAR, Хьюстон, США, 2002.
5. EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Ницца, Франция, 2003.

Структура диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, включая введение, заключения, четырех приложений и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 96 страниц, включая 27 рисунков и 6 таблиц. Список литературы насчитывает 115 наименований.

Содержание работы

Глава I содержит основные теоретические представления о переносе излучения в атмосфере Марса, об актуальности исследования аэрозоля в атмосфере, приводятся основные результаты исследования аэрозоля с помощью приборов на орбитальных и спускаемых аппаратах и основные методы восстановления свойств аэрозоля. Рассматривается гидрологический цикл на Марсе, обзор основных работ по измерению водяного пара в атмосфере Марса с момента его обнаружения в 1963 г. и актуальность как можно более точного восстановления содержания H_2O по инфракрасным данным.

В главе II рассматривается основная идея метода дистанционного зондирования аэрозоля в атмосфере Марса по полосе углекислого газа 2,7 мкм. Метод основан на чувствительности центра насыщенной полосы 2,7 мкм к количеству аэрозоля на луче зрения. Благодаря обратному рассеянию света на аэрозоле часть фотонов отражается обратно в космос, не достигнув поверхности и не успев поглотиться молекулами CO_2 . В главе приводятся модельные расчеты спектров Марса в приближении однократного рассеяния, а также для решения уравнения переноса излучения в случае многократного рассеяния на аэрозоле методом дискретных ординат с помощью кода DISORT, разработанного группой американских ученых (Stamnes и др., 1988). Основным преимуществом метода является слабая чувствительность центра полосы к альбедо поверхности Марса, тем самым удается разделить свойства аэрозоля и подстилающей поверхности, что довольно сложно сделать при получении информации из надирных наблюдений. Оценивается влияние различных параметров атмосферы на центр полосы, в частности, большой эффект оказывает незнание давления у поверхности, т.е. концентрация молекул CO_2 на луче зрения, хотя эти эффекты можно разделить, благодаря различному влиянию аэрозоля и давления на центр и крылья полосы. К тому же, благодаря точным знаниям о топографии

Марса, полученным по данным MOLA (Smithn др., 1998), влияние ошибок давления может быть сведено к минимуму. В качестве модели аэрозоля изначально бралась постоянно присутствующая в атмосфере Марса пылевая дымка с экспоненциальным распределением по высоте. Кроме того, было рассмотрено влияние различного вертикального распределения аэрозоля на форму полосы и сделан вывод, что при тонком анализе возможно разделение влияния различных составляющих аэрозоля (облаков и пылевой дымки). При хорошем разрешении по форме полосы возможно получение вертикального распределения аэрозоля, благодаря тому, что разные участки полосы чувствительны к различным высотам локализации аэрозоля.

Рассматриваются инструментальные ограничения на использование метода и возможность его применения при анализе спектров планирующихся миссий к Марсу. Одним из основных требований к наблюдениям является довольно высокое спектральное разрешение. Второй (и не менее важный) критерий - это эквивалентная яркость шума прибора, которая должна быть достаточно низкой, чтобы мы смогли с приемлемой точностью определить значение оптической толщины аэрозоля. Возможно, приемлемыми характеристиками обладает планетный фурье-спектрометр (ПФС), работающий на европейской миссии «Марс-Экспресс». Именно он в первую очередь рассматривается в работе как возможный кандидат на применение метода.

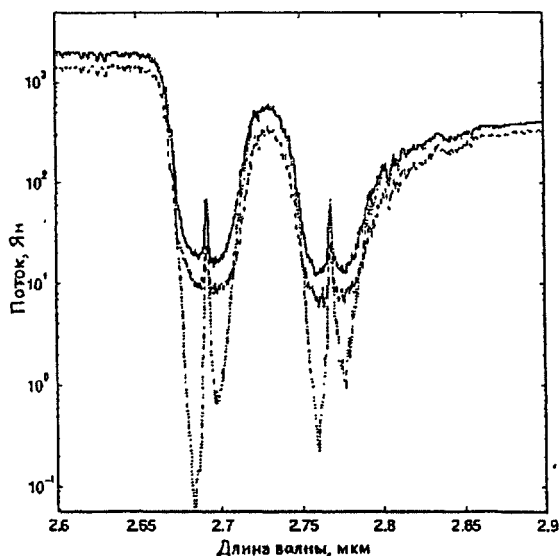


Рис. 1. Спектры Марса, полученные спектрометром SWS/ISO в полосе поглощения атмосферного CO_2 2,7 мкм: орбита 624 (сплошная линия) и 644 (пунктир). Точками показано модельные расчеты в приближении беспылевой атмосферы для спектра орбиты 624.

Глава III посвящена первому применению метода дистанционного зондирования аэрозоля в атмосфере Марса по полосе углекислого газа 2,7 мкм для восстановления оптической толщины пыли по спектрам, полученным обсерваторией ISO (Леллуш и др., 2000). Наблюдения Марса с орбиты Земли проходили в июле-августе 1997г. В результате было получено три спектра, обработка двух из них подробно изложена в этой главе. На спектрах явно прослеживается ненулевая интенсивность в центре полосы 2,7 мкм (см. рис.1, сплошная и пунктирная линии - результаты наблюдений, орбиты 624 и 644; точки - модельный спектр для 624-й орбиты, рассчитанный для беспылевой атмосферы). Хорошее соотношение сигнал/шум, а также известная неопределенность нулевого уровня в спектрах позволяют говорить об ответственности пыли за ненулевую интенсивность в центре полосы. В результате анализа спектров были получены средние по диску оптические толщины пыли, среднее значение составило $\tau=0,35\pm 0,13$. Такой результат довольно хорошо согласуется с данными, полученными в тот же период камерой IMP на спускаемом аппарате «Марс-Пасфайндер» по измерению яркости неба на восходе и заходе Солнца, а также около полудня, и по измерению прямого солнечного излучения в видимой области спектра и последующему восстановлению по закону Бугера (точнее, Бугера-Бэра-Ламберта), а также с наблюдениями, проведенными с помощью космического телескопа имени Хаббла в видимой области спектра. Несмотря на то, что наше значение относится к ИК-диапазону, собранные в настоящее время сведения о марсианской пыли, ее распределении и оптических свойствах позволяют говорить, что в этих областях спектра непрозрачность атмосферы, вызванная пылью, будет приблизительно одного порядка (см. таблицу).

Кроме того, по профилю полосы удалось выявить возможную спектральную зависимость оптических свойств аэрозоля от длины волны. Полученные зависимости указывают на довольно узкую полосу поглощения пылевого аэрозоля в области 2,75 мкм. К сожалению, неопределенности метода не позволили получить четкой зависимости, хотя довольно резкое падение альбедо однократного рассеяния может указывать скорее на присутствие филлосиликатов, таких как монтмориллонит, чем силикатов типа палагонита, у которых полоса поглощения в этой области более широкая (Erard и др., 1997).

Сравнение значений оптической толщины пыли, полученных в июле-августе 1997 г.

Наблюдения	Дата	L_s	Координаты	λ , мкм	τ
ISO (данная работа)	31 июля 21 августа	157 167	24 N, 131 W 20 N, 40 E	2,6	$0,33 \pm 0,13$
HST (Вольф и др., 1999)	27 июня 9 июля	139 145	26N; 11-56W 25,6N, 9,1W	0,41-0,673	0,4 0,4
«Марс-Пасфайндер» (Смит и Леммон, 1999)	с 4 июля 1997	~145	19,2N; 33,55W	0,44-0,99	0,4-0,5

Глава IV относится ко второй части диссертации и посвящена анализу влияния аэрозоля на восстановление малых составляющих атмосферы Марса на примере восстановления водяного пара по полосе 1,38 мкм. В главе представлен повторный анализ данных, полученных прибором MAWD, измерявшим излучение в пяти каналах полосы поглощения водяного пара 1,38 мкм. Наиболее детальная информация о поведении водяного пара на Марсе была получена с помощью спектрометра MAWD, работавших на борту аппаратов «Викинг-1 и 2», и совсем недавно по наблюдениям инфракрасного спектрометра TES (Thermal emission spectrometer)/аппарат «Марс-Глобал-Сервейор». Основные расхождения в поведении водяного пара для этих двух периодов наблюдений относились к моментам прохождения Марсом перигелия, т.е. лета в южном полушарии планеты, и в основном связывались с моментами развития двух глобальных пылевых бурь, происходивших во время наблюдений-«Викингов». Поскольку для восстановления водяного пара по данным TES использовалась вращательная полоса H_2O 240-360 cm^{-1} (28-42 мкм), а в MAWD - полоса 1,38 мкм, Smith (2002) предположил, что различия между наблюдениями TES и MAWD объясняются более слабой чувствительностью длинноволновых спектров TES к присутствию пыли в атмосфере.

Прибор MAWD представляет собой пятиканальный спектрометр относительно высокого разрешения (около 6000) ближней инфракрасной области (колебательно-вращательная полоса H_2O 1,38 мкм). Прибор был установлен на борту орбитального аппарата «Викинг» и проводил измерения отраженного Марсом солнечного излучения, при эффективных воздушных массах от 2 до 10. Измерялись спектральные интенсивности в пяти каналах, причем три детектора измеряли интенсивность в наиболее сильных линиях в полосе поглощения 1,38 мкм: 7242,74; 7232,2; 7223,14 cm^{-1} , а два других приходились на континуум полосы: 7238,5 и 7224,5 cm^{-1} , т.е.

на этих волновых числах отсутствовало поглощение излучения водяным паром. Спектральное разрешение каждого канала - $1,2\text{см}^{-1}$.

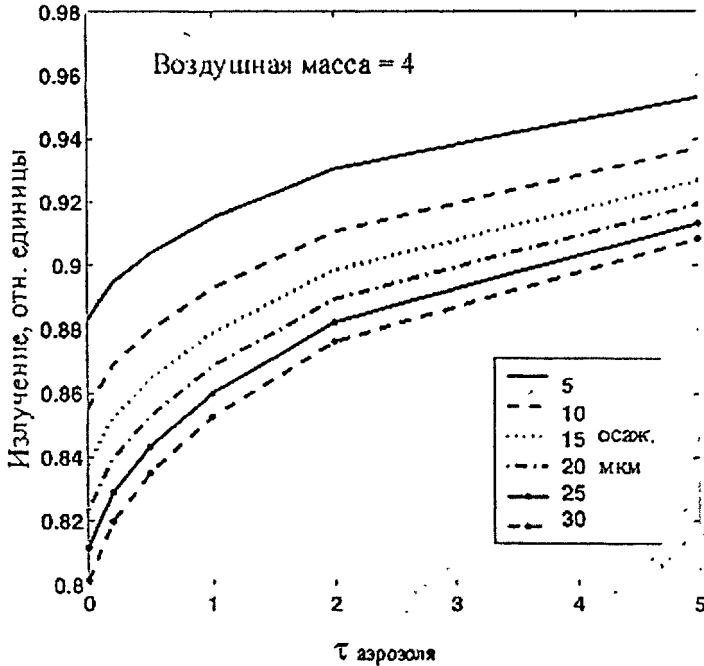


РИС. 2. ЗАВИСИМОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ $I_{\text{д,лоса}}/I_{\text{конт.}}$ (Где $I_{\text{д,лоса}}$ - соответствует интенсивности в каналах, приходящихся на полосы поглощения, $I_{\text{конт.}}$ - интенсивность в континууме) от оптической толщины аэрозоля τ и содержания водяного пара в атмосфере (в разрезе) Зависимости представлены в виде поверхностей для воздушной массы $M=4$ для самого сильного канала, соответствующего частоте $7232,2\text{ см}^{-1}$.

Рассмотрено влияние многократного рассеяния на аэрозоле на восстановление содержания водяного пара в полосе $1,38\text{ мкм}$ с учетом различной геометрии наблюдений, а также неопределенностей в вертикальном распределении и оптических свойствах пыли и произведено повторное восстановление содержания H_2O по данным MAWD с учетом многократного рассеяния. Полученные результаты говорят о необходимости учета рассеяния на пыли при восстановлении воды при воздушных массах >3 . В противном случае неучет пыли и незнание ее оптических

свойств может привести к большим неопределенностям в полученном результате.

Рис. 2 позволяет количественно определить недооценку содержания водяного пара при таких воздушных массах. Например, при $\tau \sim 1$ и реальном количестве $H_2O \sim 30$ осажденных микрон глубина полосы будет соответствовать при восстановлении с $\tau=0$ приблизительно в три раза меньшему количеству воды. Тем не менее, для небольших оптических толщин ($<0,3-0,5$), наблюдения, выполненные при такой воздушной массе, не приведут к значительным ошибкам в оценках содержания H_2O (до -50% величины).

Основываясь на простой модели пылевого аэрозоля и используя пространственное распределение аэрозоля, полученное Инфракрасным термическим спектрометром (Infrared Thermal Mapper, IRTM) по полосе силикатов 9 мкм (Martin и Richardson, 1993), мы пересчитали значения содержания водяного пара с учетом многократного рассеяния, используя данные MAWD, полученные в течение одного марсианского года. Содержание водяного пара усреднялось по 10° широты на 10° долготы и $15^\circ L_s$ ареоцентрической долготы. Так же, как и Jakosky и др. (1982), мы ограничились местным временем в пределах от 10:00 до 16:00, когда содержание воды в атмосфере максимально, чтобы избежать наложения суточных вариаций, а также влияния рассеяния при больших зенитных углах Солнца. Углы падения и отражения были ограничены 60° , что в совокупности дает максимальное значение воздушной массы <4 .

На рис. 3 представлено сезонное зонально-усредненное распределение содержания водяного пара для полного марсианского года. В отличие от результатов Jakosky и др. (1982), представленных на рис. 3 (внизу), новый анализ дает как упоминавшийся выше максимум обилия H_2O над Южным полюсом в сезон перигелия при $L_s - 270-290^\circ$, так и северный тропический максимум на широтах $\sim 0-30^\circ N$, который существует в течение периода от $L_s - 160$ до 360° , т.е. в зимний период с захватом осени и весны. Этот максимум хорошо воспроизводится моделью общей циркуляции атмосферы Марса (Richardson и Wilson, 2002).

Таким образом, повторный анализ данных MAWD указывает на то, что гидрологический цикл на Марсе не претерпел значительных изменений со времен полетов «Викингов», и распределение водяного пара близко к результатам TES. При этом естественно, что пылевые бури оказывают значительное влияние на тепловой режим планеты, поэтому не исключаются реальные вариации содержания водяного пара в период пылевой активности.

В заключении представлены основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

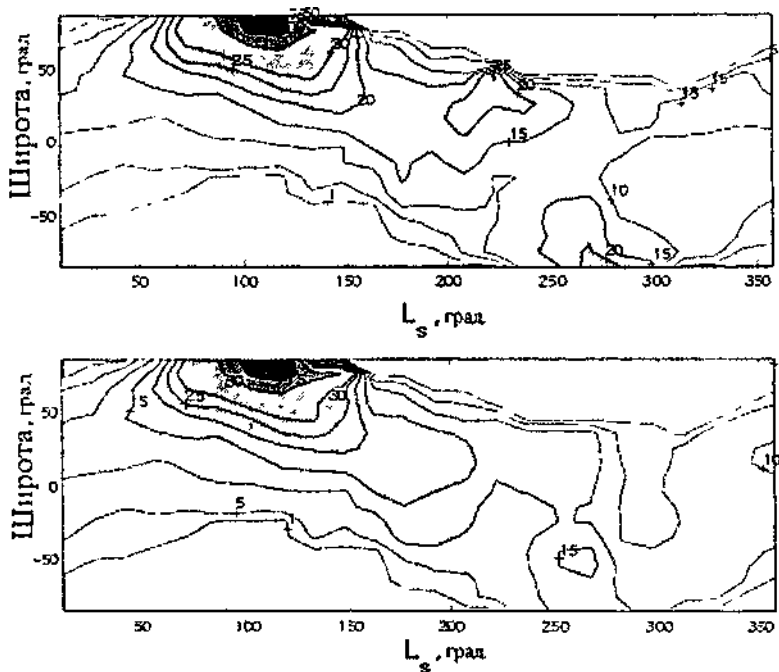


Рис. 3. Сезонное распределение водяного пара. Сверху: с учетом многократного рассеяния на пыли. Снизу: приближение беспылевой атмосферы (Jakosky и др., 1982).

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Разработан новый метод дистанционного зондирования аэрозоля в атмосфере Марса по полосе $2,7 \text{ мкм CO}_2$.
2. Определена оптическая толщина марсианского аэрозоля по данным, полученным с помощью обсерватории ISO: значение интегральной оптической толщины аэрозоля $\tau = 0,33 \pm 0,13$ на длине волны $2,6 \text{ мкм}$.
3. Получена спектральная зависимость альбеда однократного рассеяния, параметра асимметрии и фактора эффективности ослабления Q_{ext} аэрозоля, указывающая, возможно, на

присутствие филлосиликатов в спектре пыли (узкая полоса поглощения в районе 2,7-2,8 мкм).

4. Проведена оценка влияния многократного рассеяния на аэрозоле на полосы поглощения малых газовых составляющих, атмосферы Марса в ближней инфракрасной области на примере полосы поглощения водяного пара 1,38 мкм.
5. Проведен повторный анализ данных прибора Mars Atmospheric Water Detector (MAWD), входившего в состав орбитальных аппаратов «Викинг-1 и 2» с учетом многократного рассеяния на пыли. Полученные результаты свидетельствуют о важности учета рассеяния при восстановлении содержания малых составляющих в ближней инфракрасной области. Неучет рассеяния может привести к значительным неопределенностям результата при воздушных массах наблюдений больше 3.
6. Небольшое количество водяного пара, полученное в приближении беспылевой атмосферы на Южном полюсе Jakosky и Farmer (1982), шло в разрез с результатами Smith (2002 и 2004) по данным ИК-спектрометра TES. Учет многократного рассеяния привел к достаточно- ярко выраженному максимуму обилия паров воды на Южном полюсе, хотя он представлен не так четко, как в результатах Smith (2002 и 2004).
7. Откорректированная карта сезонного распределения водяного пара свидетельствует о стабильности гидрологического цикла на Марсе.

Работы, опубликованные по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Федорова А.А., Титов Д.В., Хаус Р. О возможности аэрозольного зондирования атмосферы Марса в полосе 2,7 мкм CO₂ // Космические исследования. 1999. Т. 37. N. 5. С. 498-506.
2. Titov D.V., Fedorova A.A., Lellouch E., de Graauw T., Feuchtgruber H. Sounding the Martian dust from ISO spectroscopy in the 2.7 um CO₂ bands // Abstracts of American Astronomical Society. 1999. DPS meeting 31. 75.04.
3. Titov D.V., Fedorova A.A., Haus R. A new method of remote sounding of the Martian aerosols by means of spectroscopy in the

- 2.7 microns CO₂ band // Planetary and Space Science. 2000. V.48. P. 67-74.
4. **Федорова А.А.**, Леллуш Э., Титов Д.В., де Граау Т., Фойхтгрубер Х. Дистанционное зондирование марсианского аэрозоля в полосе 2,7 мкм CO₂ по данным коротковолнового спектрометра на борту Инфракрасной космической обсерватории ISO // Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2001, 6-12 августа, 2001 года, Санкт-Петербург, тезисы докладов, НИИХ СПбГУ, С. 179.
 5. **Fedorova A.A.**, Lellouch E., Titov D.V., de Graauw T., Feuchtgruber H., Remote sounding of the Martian dust from ISO spectroscopy in the 2.7 microns CO₂ bands // Planetary and Space Science. 2002. V. 50. P. 3-9.
 6. **Fedorova A.A.**, Baklanova I.V., Rodin A.V. Behavior the Mars atmospheric water vapor: comparison of MAWD and TES observation // Paper presented at 34th COSPAR general assembly, Huston 2002, COSPAR02-A-01768.
 7. **Fedorova A.A.**, Baklanova I.V., Rodin A.V. Mars atmospheric water vapor in the Southern hemisphere: MAWD revisited // Advances of Space Research. 2004. V. 34. Issue 8. P. 1677-1682.
 8. **Fedorova A.A.**, Rodin A.V., Baklanova I.V. Revision of MAWD observations: seasonal behavior of Mars atmospheric water vapor, comparison MAWD and TES observations // EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 - 11 April 2003, abstract №13099.
 9. **Fedorova A. A.**, Rodin A.V., Baklanova I.V. MAWD observations revisited: seasonal behavior of water vapor in the Martian atmosphere // Icarus. 2004. V. 171. Issue 1. P. 54-67.
 10. Федорова А. А., Родин А.В., Бакланова И.В. Сезонный цикл водяного пара в атмосфере Марса по данным наблюдений эксперимента MAWD / «Викинг 1 и 2» // Астрономический вестник. 2004. Т.38. №6. С. 483-496.

Список литературы

1. Stamnes K., Tsay S.-C., Wiscombe W., Jayaweera K. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media // Applied Optics. 1988. V. 27. P. 2502-2509.
2. Richardson M. I., Wilson R. J. Investigation of the nature and stability of the Martian seasonal water cycle with a general

- circulation model // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. 10.1029/2001JE001536.
3. Smith D.E., Zuber M.T., Frey H.V., Garvin J.B., Head J.W., Muhleman D.O., Pettengill G.H., Phillips R.J., Solomon S.C., Zwally H.J., Banerdt W.B., Duxbury T.C. Topography of the northern hemisphere of Mars from the Mars Orbiter Laser Altimeter // Science. 1998. V. 279. P. 1686-1692.
 4. Lellouch E., Encrenaz T., de Graauw T., Erard S., Morris P., Crovisier J., Feuchtgruber H., Girard T., Burgdorf M. The 2.4-45 mm spectrum of Mars observed with the Infrared Space Observatory // Planetary and Space Science. 2000. V. 48. Issues 12-14. P. 1393-1405.
 5. Erard S., Calvin W. New composite of Mars, 0.4-5.7 mm // Icarus. 1997. V. 130. P. 449-460.
 6. Smith M.D. The annual cycle of water vapor on Mars as observed by the Thermal Emission spectrometer // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. E11. P. 25-1. Site ID 5115.
 7. Martin T.Z., Richardson M.I. New dust opacity mapping from Viking infrared thermal mapping data.// J. Geophys. Res. 1993. V. 98. E6. P. 10941-10949.
 8. Jakosky B.M., Farmer C.B. The seasonal and global behavior of water vapor in Mars atmosphere: complete global results of the Viking atmospheric water detector experiment // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. No.B4. P. 2999-3019.

055(02)2

Ротап rint ИКИ РАН

117997, Москва, Профсоюзная 84/32Подписано к печати 10.11.2004Заказ *i969*

Формат 70x108/32

Тираж 100

0,8 уч.-изд.л.

#24180