



К. Я. Кондратьев «ВИКИНГИ» на Марсе

Гидрометеиздат Ленинград 1977

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Поиски места посадки

2. Анализ изображений поверхности с орбитального аппарата АМС

«Викинг»

3. Анализ изображений поверхности со спускаемого аппарата АМС

«Викинг»

4. Тепловое картирование и альbedo

5. Свойства грунта

6. Газовый состав атмосферы

7. Структурные параметры

8. Эволюция атмосферы

9. Метеорологические наблюдения

Заключение

Список литературы

Обсуждены результаты исследований атмосферы, поверхности и верхнего слоя грунта Марса на основе предварительного анализа данных измерений при помощи аппаратуры, установленной на орбитальном и спускаемом аппаратах АМС «Викинг-1, -2». Полученные результаты содержат обширную информацию о структурных параметрах и составе атмосферы. Большое число изображений с орбиты и поверхности планеты позволило значительно углубить существующие представления об особенностях структуры и минералогии поверхности Марса. Впервые получен обширный комплекс данных прямых измерений на поверхности планеты, характеризующих свойства поверхности и нижних слоев атмосферы.

Рассмотренные результаты имеют важное значение для понимания закономерностей погоды и климата на Марсе, открывают новые перспективы с точки зрения сравнительной метеорологии планет.

The results of investigations of the atmosphere, the surface and the upper layer of the soil of Mars are discussed on the basis of a preliminary analysis of measurement data obtained with the help of instrumentation installed on the orbital and descent vehicles Viking-1, -2. The results obtained contain comprehensive information on the structural parameters and composition of the atmosphere. Numerous images from the orbit and the planet's surface made it possible to improve essentially the existing notion of the structure and mineralogy of the Martian surface. For the first time, a comprehensive complex of data of direct observations on the surface of the planet has been obtained which characterizes the properties of the surface and the lower atmosphere. The results considered are of great importance for understanding the weather and climate-forming processes on Mars; they open up new perspectives from the point of view of the comparative meteorology of planets.

20807-231
К069(02)-77 БЗ № 52-77(005)

© Гидрометеиздат, 1977 г.

Введение

Опыт исследований планет показал, что наиболее перспективным является комплексное применение наземных средств наблюдений, а также автоматических межпланетных станций (АМС), состоящих из орбитального аппарата (ОА), который выводится на орбиту искусственного спутника планеты, и спускаемого аппарата (СА), используемого для вертикального зондирования при спуске СА через атмосферу и прямых измерений параметров атмосферы и грунта после посадки СА. Несомненный приоритет принадлежит прямым измерениям при помощи аппаратуры, устанавливаемой на СА, что было блестяще продемонстрировано еще данными АМС «Венера-4». Успешный запуск АМС «Венера-9» и «Венера-10» и связанный с ним вывод на орбиты двух искусственных спутников Венеры, а также посадка двух СА явились первым примером комплексных исследований Венеры при помощи летательных аппаратов, функционирующих в режиме искусственных спутников и спускаемых аппаратов, совершивших посадку на поверхности планеты [7, 10]. Осуществление программы АМС «Викинг-1» и «Викинг-2» явилось продолжением аналогичного направления исследований с целью получения новых данных об атмосфере и поверхности Марса.

Получение обширной новой информации о свойствах атмосфер и поверхностей Венеры и Марса открывает широкие перспективы с точки зрения решения задач сравнительной метеорологии планет [8, 9]. В этой связи сопоставление данных по Венере и Марсу является особенно интересным. Это касается, в частности, данных о составе атмосфер.

Составленная Коннеллом [73] табл. 1 характеризует современные данные о составе атмосферы Марса и надоблачной атмосферы Венеры, для которых характерны преобладание углекислого газа и его фотодиссоциация (в атмосфере Марса — вплоть до поверхности планеты, а на Венере — выше уровня верхней границы облаков). Заметим при этом, что, хотя COS пока еще не был обнаружен, его присутствие является очень вероятным.

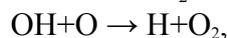
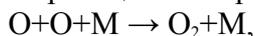
Таблица 1

Отношения смеси различных компонент атмосфер
Марса и Венеры

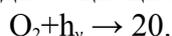
Компоненты	Марс	Венера
CO ₂	0,75-1,0	0,95-1,0
CO	8·10 ⁻⁴	5·10 ⁻⁵
O ₂	10 ⁻³	<10 ⁻⁶
H ₂ O	10 ⁻³	10 ⁻⁶
O ₃	2-60 мкм	<2 мкм
HCl	<10 ⁻⁷	6·10 ⁻⁷
COS	<6·10 ⁻⁷	<10 ⁻⁷

При диссоциации CO₂ на CO и O₂ отношение концентрации этих двух компонент должно быть равно двум. Фактически оно составляет около 0,5 на Марсе (это можно объяснить избытком O₂, возникающим в результате фотолиза водяного пара, который сопровождается диссипацией атомарного водорода) и превосходит 50 на Венере. Последнее требует присутствия на Венере источников молекулярного кислорода.

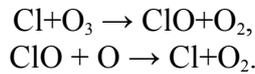
На обеих планетах наиболее вероятными реакциями образования кислорода являются:



тогда как сток кислорода определяется фотодиссоциацией

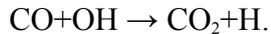


Помимо указанных, на Венере возможны еще и две следующие реакции, продуцирующие кислород:

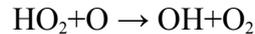
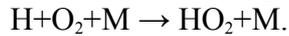


Интересно, что это именно те реакции, которые привлекли за последнее время большое внимание в связи с проблемой антропогенных воздействий на слой земного атмосферного озона. Малое содержание CO и O₂ в атмосферах Марса и Венеры составляет до сих пор не решенную проблему.

Основной для Марса и Венеры является проблема стабильности углекислотной атмосферы. Преобладающее мнение состоит в том что рекомбинация CO₂ катализируется нечетным водородом HO_x = H + OH + HO₂ + H₂O₂. При этом главной является реакция

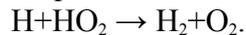


Каталитический цикл завершается восстановлением гидроксила в результате двух реакций:



Достаточно надежные выводы по рассматриваемому вопросу затрудняет отсутствие адекватных данных о скоростях реакций.

Главным источником молекулярного водорода на обеих планетах является, по-видимому, реакция



Важным фактором устойчивости состава атмосфер служат каталитические эффекты химически активных радикалов, имеющих очень малую концентрацию. В верхней атмосфере Марса для поддержания малых отношений смеси O и CO должен существовать быстрый перенос продуктов диссоциации CO₂. Для этого необходим коэффициент вертикальной турбулентной диффузии порядка 10⁸ см²/с. Аналогичные условия могут преобладать и на Венере. Эти предположения приводят, однако, к значениям концентрации O, которые находятся в противоречии с ионосферными данными, а, возможно, — и результатами измерений свечения верхней атмосферы, хотя согласуются с потоком диссипирующих атомов водорода.

Альтернативным является предположение, что верхняя атмосфера состоит главным образом из атомов кислорода, которое требует разработки модели взаимодействия с солнечным ветром для обеспечения согласия с ионосферными данными и выявления процесса, обуславливающего большую нетепловую диссипацию атомов водорода. Такого рода предположение можно согласовать с данными по свечению верхней атмосферы. Для обеих планет остается нерешенной проблема теплового баланса термосфер.

Важные результаты в этом направлении получены М. Н. Изаковым и С. К. Морозовым [3, 4]. На основе численного интегрирования системы гидродинамических уравнений с учетом источника тепла за счет поглощения солнечной ультрафиолетовой радиации и стоков тепла, обусловленных инфракрасным излучением атмосферы и отводом тепла теплопроводностью в нижние слои атмосферы, в работе [4] построена модель суточных вариаций температуры, плотности и ветров в экваториальной зоне Марса в период равноденствия.

Основным упрощением модели является рассмотрение двухмерной термосферы лишь в экваториальной плоскости при пренебрежении меридиональным растеканием. Поскольку рассматривается сравнительно тонкий слой атмосферы (75—200 км), для этого слоя приняты постоянные значения ускорения силы тяжести, теплоемкости, теплопроводности и вязкости, взятые для высоты, соответствующей середине слоя. Предполагается, что термосфера состоит из чистого углекислого газа, но получены также оценки с учетом присутствия 25% аргона.

Вычисления показали, что марсианская мезопауза располагается на высотах 90—100 км, где находится максимум стока тепла за счет радиационного выхолаживания и температура составляет около 150 К. Вертикальный профиль температуры становится примерно изотермическим на высотах более 170 км на дневной и 140 км — ночной стороне планеты. На высоте 200 км плотность изменяется в суточном ходе в 5 раз, а температура — от 280 до 430 К. Последнее хорошо соответствует наблюдаемой температуре около 340 К при той же умеренно высокой солнечной активности, рассмотренной в расчетах.

При отсутствии горизонтального переноса нагревание атмосферы происходит от восхода до захода Солнца, тогда как ветры несколько уменьшают амплитуду солнечно обусловленных вариаций температуры и сдвигают как максимум, так и минимум на более раннее время. Уменьшение амплитуды суточного хода температуры (примерно в 1,5 раза) вызывают и вертикальные движения, что, по-видимому, обусловлено влиянием адиабатического нагревания и охлаждения. Для поля ветра

характерно наличие ночью горизонтальной составляющей (порядка 100 м/с), направленной в основном в сторону вращения планеты, а днем (при скорости до 150 м/с) — в противоположную сторону. Учет наличия аргона привел к изменению температуры, достигающей 20 К.

Выше упомянуты лишь некоторые аспекты исследований состава и физики верхних атмосфер Венеры и Марса, выявляющие необходимость дальнейшего изучения состава и строения атмосфер при помощи наиболее надежных средств прямых измерений. Обратимся теперь к детальному обсуждению предварительных результатов, полученных при помощи АМС «Викинг-1, -2».

Осуществлению двух миссий по программе АМС «Викинг» целью которой были исследования атмосферы и поверхности Марса путем вывода двух орбитальных аппаратов на орбиты искусственных спутников Марса (ИСМ) и посадка двух спускаемых аппаратов (СА) на поверхность планеты, предшествовали длительные поиски наиболее подходящих районов посадки.

1. Поиски мест посадки

Поиски мест посадки для АМС «Викинг-1, -2» были тесно связаны с общей проблемой топографии поверхности Марса. Билле и Феррари [19] на основе использования данных радиорефракционных, наземных радарных, спектральных и оптических измерений, а также применения методики Фурье-анализа (учтены гармоники вплоть до двенадцатой) определили основные параметры глобальной топографии Марса. Согласно [19], средний радиус планеты составляет $3389,91 \pm 0,009$ км, а средняя плотность равна $3,9332 \pm 0,0018$ г/см³. Центр фигуры Марса смещен относительно центра масс на $2,92 \pm 0,25$ км. Топографическая сплюснутость составляет ($— 3,994 \pm 0,077$) $\cdot 10^{-3}$ и равна сплюснутости, обусловленной гравитационными факторами и вращением планеты, если принять угловую скорость вращения 77 580 с (21 ч 33 мин), которая сильно отличается от наблюдаемой угловой скорости, что свидетельствует о значительном нарушении гидростатического равновесия. Этот факт побуждает выразить сомнения относительно надежности всех полученных ранее оценок момента инерции Марса, поскольку они основаны на использовании уравнения Дарвина—Радау, предполагающего гидростатическое равновесие.

Радарные наземные наблюдения Марса в сантиметровом диапазоне, выполненные в мае — июле 1976 г., позволили получить сведения о шероховатости и отражательной способности марсианской поверхности для трех потенциальных мест посадки спускаемого аппарата АМС «Викинг-1» [107]. Шероховатость характеризуется распределением углов наклона элементов поверхности с горизонтальной протяженностью порядка 1—10 м. Данные измерений отражательной способности служат индикатором плотности поверхностного слоя грунта толщиной порядка нескольких сантиметров.

Результаты, полученные в работе [107], показали, что шероховатость поверхности в точке посадки СА «Викинг-1» ($47,5^\circ$ з. д., $22,4^\circ$ с. ш.) больше средней, а отражательная способность близка к средней. Определение свойств поверхности в точке с координатами $43,4^\circ$ з. д., $23,4^\circ$ с. ш. привело к выводу, что этому участку соответствуют аномальные радарные характеристики, указывающие на очень сильную мелкомасштабную шероховатость и (или) очень низкую плотность грунта. Малое отношение сигнала к шуму по данным наблюдений первоначально предполагавшейся основной точки посадки (34° з. д., $19,5^\circ$ с. ш.) свидетельствует о том, что этот участок обладает шероховатостью, которая по крайней мере вдвое превышает среднюю. Поскольку радарные данные связаны с большим пространственным осреднением, важное значение имеет их совместное использование вместе с изображениями, характеризующими детальную структуру рельефа поверхности.

Выполненный в работе [31] анализ полученного с АМС «Маринер-9» изображения высокого разрешения области *Chryse*, где планировалась посадка СА АМС «Викинг-1», обнаружил не выявленные ранее на Марсе формы рельефа. Следы выветривания, наличие расчлененных и скульптурированных склонов, линейных гребней в форме террас свидетельствуют о значительной эоловой трансформации плоскогорий и мез. Каналы, которые «вытекают» из бассейна *Chryse* и имеют более крупные размеры, нерепрезентативны по сравнению с типичными каналами флювиального происхождения, поскольку в этом случае первоначальные структуры рельефа сильно искажены под влиянием ветровой эрозии. Присутствие кратеров указывает на то, что эоловая

трансформация флювиальных форм рельефа произошла сотни миллионов лет назад. На отдельных участках поверхности наблюдается высокая концентрация малых кратеров.

Анализ наиболее подходящих мест для посадки спускаемого аппарата АМС «Викинг» (для каждого СА выбирались основная и запасная точки), начатый на основе использования наземных радарных данных и изображений поверхности Марса, которые были получены при помощи АМС «Маринер-9», был завершён в июне—июле 1976 г. с использованием изображений с орбитального аппарата «Викинг-1». Рассмотрение всей совокупности данных наблюдений привело к выводу, что основная точка посадки «Викинга-1» в районе *Chryse* более изменчива в геологическом отношении и более опасна, чем предполагалось первоначально.

Это вынудило предпринять поиски другой точки, которая была окончательно выбрана на $47,5^\circ$ з. д. и $22,4^\circ$ с. ш. на основе компромисса между выбором характеристик места посадки по данным анализа изображений с орбиты и наземным радарным данным, характеризующим шероховатость марсианской поверхности и плотность верхнего слоя грунта. Окончательно выбранная точка посадки находится на расстоянии около 900 км к северо-западу от первоначальной основной точки. В работе [71] подробно описаны данные наблюдений всех исследовавшихся точек посадки и характеристики их рельефа.

Данные доплеровского радиослежения со спускаемого аппарата АМС «Викинг-1» за первые несколько суток функционирования СА позволили осуществить предварительное определение координат СА на поверхности Марса ($22,27^\circ$ с. ш., $48,00^\circ$ з. д.), радиуса планеты в точке посадки (3389,5 км) и ориентации оси вращения Марса относительно среднего экватора Земли: прямое восхождение равно $317,35^\circ \pm 0,06^\circ$, а склонение $52,71 \pm 0,1^\circ$ [78].

АМС «Викинг-1 и 2» были запущены 20 августа и 5 сентября 1975 г. соответственно. 19 июня и 7 августа 1976 г. эти АМС были выведены на орбиты ИСМ. Периапсис орбиты АМС «Викинг-1» (период обращения равен 24,6 часа, а угол наклона $37,74^\circ$) располагался вблизи точки посадки спускаемого аппарата с координатами $19,5^\circ$ с. ш., 34° з. д. Расстояние орбитального аппарата (ОА) от центра планеты в периапсисе составляет 4900 км, а в апоапсисе — 36 000 км. Синхронная орбита обеспечивает прохождение ОА над СА на каждом витке на расстоянии около 1500 км, что позволяет принимать данные со спускаемого аппарата в течение промежутка времени до 40 мин. Принимаемая информация запоминается и вскоре после этого передается на Землю. Продолжительность ежедневных сеансов связи со спускаемым аппаратом составляет около одного часа, а передача научных данных, получаемых при помощи аппаратуры ОА, происходит почти непрерывно.

Потребовалось четыре недели для телевизионной съёмки поверхности Марса с орбиты и анализа результатов съёмки (а также наземных радарных данных) прежде, чем было принято решение о посадке СА, которая была совершена в бассейне *Chryse Planitia* в точке с координатами $22,5^\circ$ с. ш., $48,0^\circ$ з. д. 20 июля 1976 г. в 11 ч 53 мин по среднему Гринвичскому времени (рис. 1)¹. Сразу после посадки были получены два панорамных изображения поверхности, принятые на Земле примерно через час [103]. В этот момент местное время составляло примерно 16 ч, а время года соответствовало лету северного полушария спустя 7 марсианских суток после дня летнего равноденствия.

¹ Автор выражает признательность директору Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института Д-ру Б. Муррэю за предоставление воспроизведенных далее фотографий Марса.

Таблица 2 характеризует всю совокупность научных экспериментов. Соффен и Снайдер [103] детально описали особенности конструкции орбитальных отсеков АМС «Викинг», которые представляют собой усовершенствованную модификацию АМС «Маринер», а также конструкцию СА. Охарактеризовано функционирование АМС по мере их движения к Марсу, а также упомянуто об основных особенностях научной аппаратуры.

Как отметили Мазурский и Крабилл [72], поиск места посадки для спускаемого аппарата АМС «Викинг-2» был более продолжительным, чем в случае АМС «Викинг-1». Ещё с орбитального аппарата АМС «Викинг-1» была исследована поверхность Марса общей площадью около 4,5 млн. км². По этим данным оказалось возможным выбрать два места посадки в районах *Cydonia* (В1) и *Capri* (С1), расположенных на 44° ю. ш. и 5° с. ш. соответственно. При этом полоса широт В ($40—50^\circ$ с. ш.) рассматривалась как наиболее интересная в силу других, чем в точке посадки СА «Викинг-1», геологических условий, более высоких содержания водяного пара в атмосфере и температуры поверхности, возможности существования вечной мерзлоты.

Таблица 2

Научная программа АМС «Викинг»

Исследования	Аппаратура
	Орбитальный отсек
Получение изображений	Две телевизионные камеры
Картирование распределения водяного пара	Инфракрасный спектрометр
Тепловое картирование	Инфракрасные радиометры
Вход в атмосферу	
Свойства межпланетной плазмы	Анализатор с замедляющим потенциалом
Состав и структура атмосферы	Масспектрометр, датчики температуры, давления и плотности
	Спускаемый аппарат
Получение изображений	Две факсимильные камеры
Биология	Три анализа метаболизма, роста и фотосинтеза
Молекулярный анализ	Газовая хроматография-масспектрометрия
Неорганический анализ	Рентгеновский флуоресцентный спектрометр
Метеорология	Датчики давления, температуры, скорости ветра
Сейсмология	Трехосный сейсмометр
Магнитные свойства	Магнит на штанге для взятия проб грунта
Физические свойства	Различные инженерные датчики
	Радионаблюдения
Межпланетная среда, атмосфера и планета по данным радионаблюдений с орбитального и спускаемого аппаратов	Радио— и радарные системы орбитального и спускаемого аппаратов

Попытки найти по данным «Викинга-1» в районе В1 достаточно гладкую поверхность в форме эллипса размером 100 X 260 км («посадочный эллипс») не привели к успеху в силу преобладания изрезанного рельефа с большим числом кратеров. Поэтому выбор места посадки был продолжен после вывода на орбиту ИСМ «Викинг-2». С этой целью получены телевизионные изображения и выполнены измерения инфракрасного теплового излучения обширных площадей в районах *Arcadia* и *Utopia Pianitia* (В3), где наблюдается равнинный рельеф с большим числом «ударных» кратеров, но в некоторых секторах имеют место участки, сглаженные под влиянием ветровой эрозии и покрытые «мантией» осадочных пород.

Данные измерений теплового излучения позволили оценить тепловую инерцию и размер зерен материала, формирующего поверхность, а также определить содержание водяного пара в толще атмосферы. Все это привело к окончательному выбору в качестве места посадки района *Utopia Pianitia* примерно в 200 км к западу от крупного (диаметром около 100 км) кратера *Mie*. Успешная посадка совершена 3 сентября 1976 г. в 3 ч 58 мин 20 с после полудня (по Тихоокеанскому дневному времени) в точке с координатами 47,89° с. ш., 225,86° з. д.

2. Анализ изображений поверхности с орбитального аппарата АМС «Викинг»

Благополучная посадка спускаемых аппаратов АМС «Викинг-1, -2» и успешное функционирование научной аппаратуры позволили выполнить почти всю намеченную программу исследований [104]. В частности, с СА «Викинг-1» за первые полтора месяца после посадки получено более 300 изображений поверхности и неба. 7 августа 1976 г. на орбиту искусственного спутника Марса (ИСМ) была выведена АМС «Викинг-2». Период обращения ИСМ составляет 27,42 ч при периапсисе 1501 км и апоапсисе около 33 000 км. Угол наклона орбиты к плоскости экватора равен 55° . Периапсис был расположен первоначально вблизи точки с координатами 46° с.ш., 320° з.д., а затем на 18-м витке был совершен маневр с переводом периапсиса в точку 48° с.ш., 226° з.д. СА совершил посадку в точке 48° с. гл., 228° з. д.

Радиорефракционные наблюдения позволили определить радиус Марса и некоторые параметры атмосферы, а измерения на СА — свойства поверхности [79]. Ареоцентрические долготы, широты и радиусы Марса для точек посадки спускаемых аппаратов «Викинг-1, -2» оказались равными соответственно: $22,272^\circ \pm 0,006$ с. ш., $47,94^\circ \pm 0,2^\circ$ з.д. и $3389,38 \pm 0,8$ км; $47,669^\circ \pm 0,006^\circ$ с.ш., $225,71 \pm 0,2^\circ$ з.д. и $3381,88 \pm 0,22$ км. Соответствующие ареографические широты равны $22,483^\circ$ с.ш. и $47,968^\circ$ с.ш. Сидерическая скорость вращения Марса равна $350,891986^\circ \pm 0,000\ 012^\circ/\text{сут}$, что соответствует 24 ч 37 мин $22,663 \pm 0,004$ с. Для эпохи 1950,0 значения прямого восхождения α_0 и склонения σ_0 оси вращения Марса, определенные относительно среднего положения земного экватора и точек равноденствия, составляют: $\alpha_0 = 317,340^\circ \pm 0,006^\circ$; $\sigma_0 = 52,710^\circ \pm 0,004^\circ$. Столь высокая точность свидетельствует о возможности слежения за движениями оси вращения.

Доплеровские радиорефракционные измерения, относящиеся к району *Vastitas Borealis* ($63\text{—}69^\circ$ с.ш.; $80\text{—}121^\circ$ з.д.), дали значения атмосферного давления и температуры у поверхности, варьирующие в пределах $6,5\text{—}7,5$ мбар ($\pm 0,5$ мбар); $210\text{—}180$ К (± 10 К), при планетоцентрическом расстоянии $3377\text{—}3376$ км (± 1 км). Анализ условий распространения сигналов передатчика спускаемого аппарата «Викинг-1» (частота 400 МГц) привел к выводу, что относительная диэлектрическая постоянная грунта вблизи СА равна $3,5 \pm 0,5$, а электропроводность варьирует в пределах $10^{-3}\text{—}10^{-5}$ мо/м. Это соответствует данным для пемзы или туфа.

Анализ изображений поверхности Марса с орбитального и спускаемого аппаратов указывает на многочисленные следы вулканизма, водной и ветровой эрозии и осадения мелкодисперсного материала на поверхности. Число кратеров на различных равнинах примерно в 10 раз меньше, чем на Луне. Сохранение мелких кратеров свидетельствует о медленных процессах ветровой эрозии.

На рис. 2 приведен пример монтажа изображений поверхности, иллюстрирующий присутствие потоков лавы, разделенных разломами, которые образуют гребни. Обращает на себя внимание большое количество рассеянных по рассматриваемому участку поверхности метеоритных кратеров. Отчетливо выделяются изогнутые «русла рек».

Интересным ареологическим образованием является вулканическое плато (одно из предполагавшихся мест посадки АМС «Викинг-2» — В2), изображенное на рис. 3. Поверхность планеты изоборждена здесь многими разломами. Заметны небольшие каналы, имеющие больший возраст, чем разломы. Различный вид метеоритных кратеров также указывает на разнообразие их возрастов.

Значительно моложе других ареологических образований оказалось дно каньона Vallis Marinaris, указывая на современность происходящих там процессов. Морфология продуктов вулканических извержений выявляет, что они возникли в результате растекания по поверхности, а не баллистического выброса как на Луне или Меркурии. Северные равнины представляют собой обширные районы многоугольных структур, напоминающих наблюдаемые в арктических районах Земли. Вблизи СА «Викинг-1» наблюдается большое количество камней разнообразных форм, цвета, текстуры и размеров. Все камни покрыты слоем мелкой красной пыли.

Выполненный ранее Мазурским [70] анализ телевизионных изображений поверхности Марса с АМС «Маринер» привел к выводу о существовании пяти типов каналов на Марсе: 1) широких каналов, 2) извилистых каналов среднего размера, 3) разветвленных сетей малых каналов, 4) совокупности пересекающихся прямолинейных желобов, 5) отчетливых каналов, возникающих в

центрах вулканов. Каналы первых четырех типов обнаруживают признаки водной эрозии. Их извилистые русла и разветвляющиеся притоки, сглаженные профили и форма дна, указывающая на существование протоков, побуждают предположить, что эти каналы являются высохшими руслами рек.

Изображения, полученные при максимально высоком пространственном разрешении, свидетельствуют о большом сходстве структуры дна марсианских каналов и речных протоков и перекатов на Земле. Каналы пятого типа имеют, по-видимому, вулканическое происхождение. Некоторые из них выходят из кратеров вулканов, а другие располагаются вдоль каналов в форме валов, напоминающих потоки лавы, или возникают в полях лавы и образуют извилистые каналы без притоков или протоков.

Все исследованные каналы пятого типа, за исключением двух случаев, могут быть определенно интерпретированы как потоки лавы. Исключения составляют случаи структур, объединяющих в себе характерные черты каналов обеих групп и, по-видимому, имеющих комбинированное происхождение. По степени вырождения каналов в результате появления в их руслах небольших кратеров, оползней и других признаков «стирания» характерного рельефа каналов в работе [70] приближенно оценен их возраст. Очень старые каналы «вырождены» в такой мере, что их трудно различать.

Взвешенные в марсианской атмосфере частицы пыли придают небу розовый цвет и определяют большую оптическую толщину атмосферы. Атмосфера является хорошо перемешанной. Масс-спектрометрические измерения состава атмосферы обнаружили значения отношений концентрации изотопов азота и аргона, которые отличаются от наблюдаемых в земной атмосфере и свидетельствуют о специфичности эволюции атмосферы Марса. Измерения содержания водяного пара выявили наличие пространственно-временной изменчивости. Высокое содержание водяного пара характерно для северных полярных районов летом. Измерения температуры в южных полярных районах указывают на вероятность конденсации летучих компонентов атмосферы.

Элементный анализ образцов грунта показал, что грунт представляет собой гидратированные минералы с высоким содержанием железа, являющиеся по своей природе базальтовыми. Значительная часть материала поверхности (5—10%) является магнитной. Анализ двух образцов грунта не обнаружил органических соединений. Предел обнаружения составляет 10—100 частей на миллиард. Биологический эксперимент дал неопределенные результаты, но был очень полезен с точки зрения химии поверхности. Рассмотрим теперь результаты отдельных исследований более обстоятельно.

После трех месяцев функционирования АМС «Викинг» стало ясно [115], что оказались решенными три следующих вопроса, которые долгое время оставались открытыми: происхождение марсианских каналов, природа полярных шапок, состав атмосферы в геологическом прошлом. Анализ структуры рельефа в ряде районов на изображениях, полученных с орбитальных аппаратов (ОА) «Викинг» с полной определенностью свидетельствует об их флювиальном происхождении, причем нет никакой альтернативы для гипотезы о том, что жидкостью, ответственной за формирование каналов, была вода. Вероятнее всего, что вода появлялась на поверхности не в результате дождей, а вследствие просачивания из грунта или таяния подповерхностного льда.

По мнению Мазурского, существует три типа каналов различного происхождения: 1) каналы сложной структуры с притоками, появившиеся под влиянием дождя; 2) большие каналы, образовавшиеся в результате выхода на поверхность грунтовых вод из подземных озер геотермального происхождения; 3) небольшие каналы, являющиеся результатом медленного просачивания подпочвенных вод. Поскольку таяние подповерхностного льда естественно связать с вулканической активностью, предполагается, что в процессе эволюции Марса было несколько периодов формирования каналов, связанных с усилением вулканической активности.

Данные спектроскопических измерений с ОА указывают на возрастание содержания водяного пара в атмосфере с широтой до максимального значения над полюсом, что свидетельствует о наличии в области полярной шапки водного льда. Этот вывод подтверждается результатами ИК измерений, которые привели к столь высокой температуре поверхности (205 К), что должно происходить испарение углекислотного льда. Следует считать, что зимой (соответственно, южного и северного полушарий) на полюсах аккумулируется большое количество сухого льда и размеры

полярной шапки возрастают, тогда как летом происходит таяние и уменьшение размеров полярных шапок за счет испарения сухого льда.

Остается пока неясным, как много водного льда аккумуляровано полярными шапками. Возможно, что толщина льда составляет несколько сотен метров, что достаточно для образования глобального слоя воды толщиной около 0,5 м при полном таянии льда. Вода может существовать в форме вечной мерзлоты и вне полярных шапок.

Измерения состава марсианской атмосферы со спускаемых аппаратов «Викинг» привели к значениям концентрации азота и благородных газов, которые свидетельствуют о возможности существования в прошлом гораздо более плотной углекислотной атмосферы. Данные об аргоне свидетельствуют о том, что атмосферное давление у поверхности могло достигать 100 мбар, а данные об азоте допускают давление до 1000 мбар. По-видимому, первая оценка является более достоверной, чем вторая.

В течение первых 30 витков на орбите вокруг Марса при помощи двух телевизионных камер, установленных на АМС «Викинг-1», получено около 1000 изображений поверхности планеты, которые имеют разрешение от 100 м до немногим более 1 км [25]. Поскольку основной задачей, решавшейся в течение рассматриваемого периода, был выбор места посадки СА, а в качестве возможных мест посадки изучались участки в районе *Chryse Planitia*, *Cydonia* и вблизи *Capri Chasma*, большая часть изображений относится к упомянутым районам. Использование шести светофильтров позволило получить изображения в шести участках спектра и поэтому располагать возможностью составления цветных изображений.

Наличие перекрывающихся изображений высокой разрешающей способности дало возможность детально проанализировать особенности рельефа поверхности в рассматриваемых районах и, в частности, выявить существование флювиальных и эоловых форм рельефа [25]. Так, например, в бассейне *Chryse Planitia* над содержащими небольшие кратеры равнинами, которые представляют собой, по-видимому, потоки лавы базальтового состава, возвышаются плато со струеобразными структурами (рис. 4).

Значительная эродированность материала плато и формы рельефа позволяют предположить флювиальное происхождение наблюдаемых структур рельефа. В пользу такой гипотезы говорит и регулярная террасированность многих плато, что могло быть связано с прогрессирующим понижением флювиальных уровней.

Анализ форм рельефа в районе *Cydonia* указывает на очень сложную историю его формирования под влиянием вулканических, тектонических, эоловых и, возможно, перигляционных процессов. Все это привело к большому разнообразию форм рельефа.

Интересный пример рельефа флювиального происхождения представлен на рис. 5, где изображен крупнейший канал района *Chryse*.

Следы на дне канала указывают, по-видимому, направление потока воды. Под влиянием водной и ветровой эрозии формы рельефа островов оказались изрезанными и расслоенными. Можно различить семислойную структуру.

Изучение изображений, относящихся к району близ *Capri Chasma* — ветви системы экваториального каньона, выявляет наличие относительно гладких равнинных участков, расположенных между многочисленными кратерами с плоским дном (рис. 6). Наиболее впечатляющим является вид самого каньона, на стенах которого заметны ясные следы оползней. Стены каньона высотой до 2 км обнаруживают присутствие нескольких стратиграфических единиц, претерпевших процессы дифференциальной эрозии. Для верхних слоев характерно присутствие крупных блоков породы, тогда как нижние слои имеют вид «текучего» материала со слабым сцеплением частиц. Большая часть дна каньона лишена каких-либо характерных структурных особенностей, что свидетельствует о его относительно молодом возрасте. Присутствие ярких полос и полей дюн указывает на активное влияние эоловых процессов. По-видимому, постепенное разрушение стен каньона и влияние ветровой эрозии обусловили расширение каньона.

Ярким примером эолового рельефа являются изображенные на рис. 7 гигантские песчаные дюны, расположенные в нескольких градусах широты к югу от экватора. Отдельные дюны имеют поперечник до 500 м. По-видимому, они сформированы ветром, дующим с запада (нижний левый угол). На востоке (правый верхний угол) дюны вплотную подступают к стенам каньона. Вероятно,

стены образовались главным образом в результате оползней, размельченные продукты которых удаляются ветром, что приводит к постепенному расширению каньона.

Анализ изображения северной части рассматриваемого района подтверждает вывод, сделанный по данным «Маринера-9» о том, что существует тесная связь между флювиальными чертами и хаотической структурой рельефа (рис. 8). Это вытекает, в частности, из того, что участку хаотического рельефа с поперечником около 50 км (в правой части рис. 8) предшествуют серии флювиальных структур рельефа, протянувшихся на расстоянии примерно 400 км.

Изображения кратеров выявляют существование на Марсе свежих кратеров (чего не было замечено раньше), структура которых отлична от структуры кратеров Луны или Меркурия (ранее предполагалось подобие кратеров Марса и Меркурия, определяемое близкими значениями ускорения силы тяжести) [27]. Свежие кратеры окружены крутыми откосами и гребнями, за пределами которых в некоторых случаях располагаются лучеобразные структуры рельефа и скопления вторичных кратеров (существование значительного количества малых кратеров свидетельствует о медленных процессах эрозии на Марсе).

Лучеобразные структуры являются индикатором распространения продуктов извержения (рис. 9). Наблюдаются четыре типа изменяющихся структур рельефа: 1) яркие полосы, связанные с кратерами; 2) яркие полосы, приуроченные к небольшим холмам; 3) темные полосы, связанные с кратерами; 4) поля песчаных дюн.

Сопоставление с перекрывающимися изображениями с «Маринера-9» (1972) выявило значительно большее количество деталей рельефа, но обнаружило лишь очень слабые изменения структур рельефа за пятилетний срок. Так, например, в некоторых местах появились новые яркие полосы или увеличился размер темных полос. Отмечается совпадение направлений темных струй и ветрового потока. По-видимому, яркие полосы являются более устойчивыми, чем темные, и не подвержены влиянию слабых ветров.

Большой интерес представляет изображение тающей северной полярной шапки (рис. 10) по данным АМС «Викинг-2», полученным за несколько дней до посадки СА. В середине лета в северном полушарии Марса полярная шапка сократилась в результате таяния до минимальных размеров. Яркие белые полосы на рис. 10, становящиеся более слитными по направлению к северу (верхняя часть рисунка), представляют собой, по-видимому, как лед из твердой углекислоты, так и водный лед.

Свободные от льда темные полосы располагаются в форме спиралей, сходящихся к центру полярной шапки. Возможно, что отсутствие здесь льда обусловлено влиянием ветров, дующих от центра полярной шапки. Южная граница полярной шапки располагается около 82° с. ш., а Северный полюс находится у заметного в правой верхней части фотографии края диска планеты.

30 сентября 1976 г. АМС «Викинг-2» (В-2) перешла на орбиту с углом наклона 75° , что позволило получать изображения всего северного полярного района Марса при благоприятных условиях солнечного освещения. Осуществленный в работе [32] анализ примерно 700 изображений высокой разрешающей способности, полученных в октябре 1976 г., подтвердил сделанные ранее выводы о наличии в областях полярных шапок протяженных слоистых отложений, покрытых главным образом отложениями многолетних льдов. Неоднородности расслоения указывают на сложную эволюцию климата в период формирования отложений. Впервые обнаружены опоясывающие полюс скопления дюн, состоящие из очень темных материалов.

На всей рассматриваемой части планеты площадью около 800 тыс. км² не найдено свежих ударных кратеров, но встречаются круговые структуры размером 2—8 км, которые могут быть остатками ударных кратеров, что следует рассматривать как свидетельство быстрой эрозии отложений. Данные В-2 указывают на существование трех типов геологических структур: 1) слоистых отложений в центральном полярном районе; 2) прилегающей к нему зоны дюн; 3) покрытой кратерами плоской поверхности, которая является, по-видимому, стратиграфической «подложкой» двух первых геологических структур.

Многолетняя полярная шапка, которая, согласно данным инфракрасных измерений с В-2, состоит из водного льда, располагается главным образом в пределах периметра слоистых образований. Следует думать, что эрозия слоистых отложений является причиной наблюдаемых на изображениях террасированных склонов. Большая протяженность террас указывает на то, что они отображают существование непрерывных тонких слоев протяженностью порядка тысяч квадратных километров.

Наиболее вероятным механизмом образования слоев является оседание пыли из атмосферы, на которое, по-видимому, оказывают влияние распределение ледяного покрова и модуляция климатическими изменениями, связанными с вариациями параметров орбиты Марса.

Наличие дюн, протянувшихся как в долготном, так и поперечном ему направлениях; дюн, гребни которых расположены как регулярно и не изменяют направление на расстояниях более 100 км, так и изменчивых от точки к точке, свидетельствует об особенностях поля ветра. Нестабильные формы дюн отображают большую изменчивость среднего направления и скорости ветра в соответствующих районах. По-видимому, дюны образуются из части материала слоистых отложений, который подвергался ветровой эрозии. Следует при этом предположить, что составляющая отложения осевшая атмосферная пыль подвергалась аккреции, в процессе которой образовались более крупные агломераты, имеющие достаточно большие размеры для участия в процессе сальтации, играющей важную роль при образовании дюн (возможно, однако, что сальтация не имеет на Марсе столь существенного значения, как на Земле).

В работе [32] обсуждены наблюдаемые соотношения между распределениями многолетних льдов, дюн и слоистых отложений, анализ которых позволяет высказать предположения относительно происхождения этих природных образований. За время наблюдений ледяного покрова полярной шапки с В-2 не было замечено каких-либо изменений в распределении льдов. Вывод о том, что эти льды имеют водную природу побуждает пересмотреть высказанные ранее предположения о факторах, определяющих их годовой ход. По-видимому, изменчивый ледяной покров представляет собой очень тонкий слой льда (это предположение требует дальнейшей проверки).

Каттс с соавторами [32] предложили два вероятных варианта геологической эволюции полярной зоны, обусловленной различными изменениями климата. Один из вариантов климата связан с мелкомасштабным расслоением, отражающим наличие регулярной короткопериодической изменчивости. Для второго типа климата характерна долгопериодичность изменений (превосходящая периодичность изменений первого типа на два—три порядка величины) и отсутствие регулярности вариаций. Подобный климат выражается в более радикальных изменениях, следствием которых может быть переход от режима формирования слоистых отложений к режиму эрозии.

Пока что нет никаких доказательств того, что изменения полярного климата связаны с теми предполагаемыми вариациями климата, которые сопровождают образование марсианских каналов. По-видимому, первые являются гораздо более слабо выраженными, чем мощные вариации температуры и давления, необходимые для флювиальной активности в экваториальной зоне. Известно также, что марсианские каналы являются очень старыми, тогда как процессы эрозии в полярных районах — современными. Хотя нельзя полностью исключить возможность того, что формирование слоистых отложений происходило одновременно с образованием каналов, но даже и в этом случае эрозия отложений имела место позднее.

Вероятно, слоистые отложения могли играть важную роль в эволюции летучих компонентов на Марсе. Так, например, большая часть воды, выделенной твердой оболочкой с момента ее образования, могла в смеси с пылью сформировать льды полярных областей. Интересно, что события, наиболее близкие к современной эволюции полярных областей, остаются самыми неясными (процессы формирования слоистых отложений, дюн и др.).

Анализ изображений позволяет выявить многочисленные явления, происходящие в атмосфере. Изображения, полученные при подходе АМС к Марсу, показали, что в южном полушарии атмосфера была достаточно ясной, тогда как в северном полушарии на всех долготах имели место слои дымки, затруднявшие наблюдения поверхности. Основной целью интерпретации изображений с точки зрения атмосферных явлений было изучение запыленности атмосферы в зоне посадки СА. Изображения края диска планеты выявляют присутствие многослойной дымки на высотах до 25 км. Единичной оптической толщине (вдоль луча зрения по направлению к горизонту) соответствует высота, равная 15 км.

Обнаружено несколько форм дискретных облаков (их следует отличать от региональной диффузной дымки): классические белые облака в области Tharsis; диффузные яркие облака, состоящие из отдельных пятен, размером порядка нескольких километров; экваториальные облака (типичные облака, состоящие из конденсата и имеющие, по-видимому, конвективную природу);

протяженные волнообразные облака, которые наблюдаются в околополуденные часы в зоне экватора и состоят, по-видимому, из льда (длина волны облаков составляет около 10 км).

Волнообразные облака могут служить индикатором направления ветра и условий устойчивости атмосферы. Иногда наблюдаются яркие пятна, которые можно интерпретировать как туман или изморозь из водного льда на поверхности (скорее всего это туман). Изображения, полученные в течение первой фазы функционирования АМС «Викинг-1», не выявляют присутствия пылевых облаков. Примером могут служить облака, хорошо проявляющиеся на рис. 11, относящемся к району гигантского вулкана Olympus Moris, высота которого достигает 24 км, поперечник кальдеры (вулканического кратера) — 80 км, а основания вулкана — примерно 800 км. По-видимому, эти облака состоят из водного льда и образуются при адиабатическом выхолаживании воздуха, поднимающегося вдоль склона. Максимальная высота верхней границы облаков составляет около 19 км.

Облака наиболее развиты к западу от вулкана (левая часть фотографии). Отчетливо проявляющаяся система волнообразных облаков протянулась на расстоянии нескольких сотен километров (левый верхний угол изображения). В левом верхнем углу фотографии ясно виден край диска планеты, а также заметны расположенные в атмосфере слои дымки.

По-видимому, наблюдаемые облака состоят преимущественно из водного льда и сформировались в результате конденсации водяного пара в атмосфере при выхолаживании воздуха, поднимающегося вдоль склонов вулкана. Как показали выполненные ранее наблюдения с Земли, облака в этом случае становятся заметными в послеполуденное время и обладают отчетливым годовым ходом: их можно наблюдать преимущественно весной и летом в северном полушарии.

С орбитального аппарата (ОА) «Викинг» впервые получены данные, позволяющие построить цветные изображения и определить колориметрические характеристики различных участков поверхности планеты [102]. Телевизионные камеры ОА снабжены набором светофильтров для видимой области спектра 0,35— 0,65 мкм. Применяя фиолетовый ($0,45 \pm 0,02$ мкм), зеленый ($0,53 \pm 0,04$ мкм) и красный ($0,59 \pm 0,03$ мкм) фильтры, удалось построить три цветных изображения. Анализ этих изображений, а также многоканальных изображений для нескольких спектральных интервалов показал большую информативность таких данных с точки зрения различения разнообразных природных образований (мелкозернистые и скалистые грунты и др.) и выявления их связей с локальной ареоморфологией и процессами трансформации поверхности.

Красно-фиолетовое отношение оказалось очень чувствительным индикатором атмосферной дымки и облаков, особенно вблизи терминатора. Зелено-красное отношение характеризует главным образом изменчивость материала поверхности планеты. Сопоставление двух колориметрических отношений открывает возможность различения эффектов атмосферы и поверхности.

Колориметрические данные подтверждают выводы наземных наблюдений, согласно которым яркие участки поверхности Марса являются более красными, чем темные участки. Последние могут быть разделены по меньшей мере на два класса, один из которых характеризуется примерно на 10% большей яркостью в фиолетовом участке спектра. Более голубые темные участки поверхности связаны с темными «струями», исходящими из бывших кратеров. Более красные темные участки располагаются в зоне экваториальных равнин.

3. Анализ изображений поверхности со спускаемого аппарата АМС «Викинг»

Две камеры, установленные на СА «Викинг-1», позволили получить первые изображения поверхности Марса со спускаемого аппарата [82]. Идентичные камеры представляют собой многоканальные сканирующие радиометры, основанные на системе оптико-механического сканирования. Совокупность 12 кремниевых фотодиодов обеспечивает четыре широкодиапазонных канала с переменным фокусом для получения изображений очень высокого разрешения, один широкодиапазонный канал для быстрого обзора, шесть узкополосных (около 0,1 мкм) каналов для получения многоспектральных изображений (цветных и в близкой ИК области спектра) и один узкополосный канал для сканирования Солнца. Мгновенное поле зрения равно $0,04^\circ$ в случае четырех каналов очень высокого разрешения и $0,12^\circ$ для остальных каналов. Ширина поля зрения

охватывает углы + 40 и -60° относительно горизонта и диапазон 0—342,5° по азимуту. Изображения запоминаются бортовым магнитофоном.

Анализ изображений района посадки, полученных с орбитального отсека, показал, что этот район может быть охарактеризован как топографически гладкий (рис. 12). По-видимому, формирование наблюдаемого здесь рельефа было обусловлено совокупностью флювиальных процессов, вулканизма, метеорных ударов, ветровой эрозии и переноса, химического выветривания. На основе анализа изображений, полученных со спускаемого аппарата, в работе [82] детально описаны особенности поверхности Марса вблизи точки посадки — мелкодисперсного грунта с размерами частиц порядка десятых долей миллиметра, покрытого многочисленными кусками горных пород, которые имеют резко очерченные грани. На одном из панорамных изображений виден участок, занятый небольшими песчаными дюнами и пересекающей их полосой темных камней.

Изображение высокой пространственной разрешающей способности, приведенное на рис. 13, характеризует детали морфологии поверхности Марса, покрытого камнями разнообразных размеров и форм. Обращает на себя внимание отсутствие явно выраженных следов трансформации поверхности ветром. В частности, — пыль, осевшая при посадке на опору СА, осталась неизменной в течение двух суток после первого подобного изображения, принятого со спускаемого аппарата. Указанное стрелкой зачерненное пятно на поверхности обусловлено оседанием частиц при ударе о поверхность сброшенного со спускаемого аппарата защитного цилиндрического покрытия рычага для взятия проб грунта (это покрытие находится в данном случае вне поля зрения).

Рассеянные по поверхности куски горных пород имеют самые разнообразные формы и размеры. Построение распределения числа камней по размерам обнаружило сходство с аналогичными данными для Луны (кратер Тихо). Наблюдаются россыпи гравия, указывающие на влияние ветровой эрозии и следы воздействия на горные породы. «Хвосты» мелкозернистого материала позволяют оценить направление ветра.

Цветные изображения показывают, что типичный для поверхности Марса красноватый оттенок, напоминающий земной лимонит, имеют валуны, камни и мелкие частицы грунта. Спектрометрические измерения показали, однако, что лимонит не может быть основным компонентом марсианской пыли. Возможно, что цвет поверхности Марса определяется образованием лимонита на поверхности горных пород в результате их окисления и гидратации. Если эта гипотеза справедлива, то процесс окрашивания должен был произойти в геологическом прошлом, когда в атмосфере Марса было значительно больше кислорода и водяного пара.

Через 25 с после посадки СА «Викинг-2» на поверхность Марса в районе *Utopia Planitia* (47,89° с.ш., 225,86° з.д.) 3 сентября 1976 г. в 09 ч 48 мин 58 с местного марсианского времени начала функционировать панорамная камера СА. Анализ полученных изображений (за время до 5 ноября 1976 г. получено около 575 изображений) показал [84], что участок поверхности в районе посадки представляет собой плоскую каменистую красноватую пустыню, рассеченную сравнительно свободными от камней ложбинами (шириной около 1 м и глубиной 15 см), которые, по-видимому, образуют сетку в форме многоугольника.

Вероятны по крайней мере четыре процесса, которые могут быть ответственны за образование ложбин: растрескивание лавы в результате сжатия при ее охлаждении; тепловое расширение и сжатие мерзлого грунта, которое, по-видимому, сопровождается таянием; растрескивание при высыхании насыщенных водой глинистых минералов; флювиальные процессы (последнее, однако, мало вероятно).

Горизонт является исключительно плоским, не выявляя какого-либо крупного рельефа. К востоку от СА видно плато, совпадающее с направлением «языка» продуктов выброса из кратера вулкана *Mie*. Камни в месте посадки «Викинга-2» являются, как правило, более пористыми, чем на участке «Викинга-1». Хотя пористость камней естественнее всего истолковать как результат их вулканического происхождения, могут быть предложены и другие объяснения (например, влияние ветровой эрозии).

По сравнению с камнями близ «Викинга-1», характеризующимися разнообразием альбедо, формы и текстуры, камни на месте посадки «Викинга-2» имеют близкие значения альбедо и сходную пористую текстуру. Выходов коренных пород не обнаружено. Мелкие частицы грунта на обоих

участках посадки имеют очень небольшие размеры (≤ 100 мкм) и, по-видимому, образуют поверхностную корку.

Анализ панорамных изображений указывает на сравнимую яркость марсианского неба и поверхности. Отношение r наблюдаемой яркости неба на угловом расстоянии от Солнца 90° и угловой высоте 15° к вычисленной яркости диффузно отражающей марсианской поверхности (с учетом расстояния от Марса до Солнца) при нормальном падении солнечных лучей дает $r \approx 0,2$ для панорамы, полученной вскоре после посадки СА (эффективная длина волны составляет в данном случае $0,73$ мкм). В случае релеевского рассеяния расчет дает яркость неба, которая эквивалентна лишь $0,003$ наблюдаемого r .

Таким образом, наблюдаемая яркость неба полностью определяется влиянием пылевого аэрозоля. Приближенный расчет приводит к оптической толщине атмосферы, равной $0,2$, что эквивалентно типичным континентальным условиям на Земле. Колор-индекс C , равный отношению r для красных и голубых лучей, составляет около $1,9 \div 2,5$ и свидетельствует о значительно более сильном рассеянии красного света, что и определяет оттенки цвета неба от оранжевых до розовых. Наиболее вероятными компонентами аэрозоля являются поднятые ветром частицы грунта и кристаллы льда, образующиеся при сублимации водяного пара в атмосфере. Существование ледяных кристаллов в атмосфере Марса было обнаружено Н. А. Козыревым [6] еще в 1954 г. С учетом вклада отражения поверхностью ледяные частицы обуславливают $C \approx 1,1$. Поэтому с точки зрения цвета неба более вероятно, что аэрозоль состоит из частиц грунта с нижним пределом размеров около $0,1$ мкм, которые должны сильно поглощать в голубых лучах и рассеивать — в красных. Подобный аэрозоль следует рассматривать как глобальный фоновый, ввиду его большой устойчивости от дня к дню и отсутствию пыльных бурь в период наблюдений.

В случае «Викинга-2» яркость неба также сравнима с яркостью поверхности планеты и почти полностью определяется вкладом аэрозольного рассеяния [84]. Оптическая толщина атмосферы оказалась, однако, меньшей, составляя около $0,25$ на длине волны $0,67$ мкм, чем это было в случае «Викинга-1» ($0,35$). После оседания облака пыли, поднятого при посадке СА, не наблюдалось каких-либо изменений ландшафта, кроме тех, которые были связаны с взятием проб грунта. Это согласуется с данными о слабости ветра.

Предпринятый в работах [54а, 110] анализ поля изофот, построенных по данным АМС «Маринер-9» для фазового угла около 60° , выявил, что поле излучения Марса не может быть описано на основе использования функции Миннарта, а также предположений изотропного или релеевского рассеяния. Наблюдаемое поле изофот согласуется с расчетным лишь в случае сильно вытянутых вперед индикатрис рассеяния, вычисленных по формулам Ми и модели полубесконечного пылевого облака, характеризуемого значительной изменчивостью оптических свойств и микроструктуры частиц. Подобной модели соответствуют умеренно поглощающие частицы минералов, размеры которых не должны значительно превышать 1 мкм. Достаточно хорошее согласие с наблюдениями получается и в случае модели пылевого облака конечной оптической толщины, ограниченного снизу ламбертовой отражающей поверхностью.

Произведенная в работах [93, 94] обработка ультрафиолетовых спектров Марса, зарегистрированных с АМС «Маринер-9» в период пыльной бури 1971 г., с целью определения произведения яркости рассеянного света (индикатрисы рассеяния) на альбедо однократного рассеяния показала, что показатель поглощения пылевых частиц (определенный путем исключения влияния индикатрисы рассеяния на основе использования расчетных данных) возрастает с уменьшением длины волны в диапазоне $350—210$ нм, но резко уменьшается в области более коротких волн. Структура спектра характеризуется наличием «плеча» на участке длин волн $240—250$ нм.

Поскольку отмеченные особенности спектра поглощения пыли хорошо соответствуют структуре спектра двуокиси титана (анатаз), авторы [93] предполагают, что этот минерал входит в состав пыли и, следовательно, марсианского грунта. Отсутствие селективности в спектре анатаза для интервала $500—400$ нм согласуется с данными наблюдений Марса в видимой и инфракрасной областях спектра. Высокий показатель преломления двуокиси титана может объяснить сильное лучепреломление марсианской пыли. По-видимому, доля содержания частиц из анатаза составляет несколько процентов.

Присутствие большого количества поглощающих пылевых частиц означает их сильное влияние на тепловой режим атмосферы, в результате чего вертикальный градиент температуры в верхней тропосфере может быть меньше адиабатического, а развитие конвекции днем ограничивается более тонким слоем атмосферы, чем при отсутствии пыли. В значительной толще атмосферы может существенно проявляться суточный ход температуры, порождающий соответствующие изменения давления и ветра.

Обнаружение яркого неба побуждает сделать вывод о необходимости пересмотра полученных ранее с Земли, во время пролета или с орбитальных АМС, данных о фотометрических характеристиках поверхности Марса. На это указывает и тот факт, что, если по данным съемки с орбитального отсека альbedo окрестности места посадки выше среднего, то данные СА приводят к противоположному выводу. Предварительный анализ изображений поверхности со спускаемого аппарата за первые десять суток не выявил каких-либо изменений, обусловленных ветром, что следует объяснить сравнительной слабостью ветра. Не обнаружено также и каких-либо следов жизни.

4. Тепловое картирование и альbedo

Установленная на орбитальном аппарате АМС «Викинг» аппаратура для теплового картирования (АТК) поверхности и атмосферы планеты состоит из четырех телескопов, каждый из которых представляет собой семиканальный радиометр [56]. АТК предназначена для измерений теплового излучения марсианской поверхности в четырех диапазонах длин волн: 6,1—8,3; 8,3—9,8; 9,8—12,5; 17,7—24 мкм. Измерения в пределах каждого из первых двух диапазонов осуществляются при помощи трех датчиков, а третьего и четвертого — семи датчиков. Датчик для интервала в 14,56—15,41 мкм в центре полосы углекислого газа использован для определения температуры стратосферы. Семь датчиков для диапазона 0,3—3,0 мкм позволяют измерять отраженную солнечную радиацию.

Наличие V-образно расположенных датчиков и высокой пространственной разрешающей способности (поле зрения составляет 5,2 мрад) позволило осуществить по данным АТК «Викинга-1» построение тепловых карт Марса за период наблюдений с 3-го по 22-й виток (22 июня—11 июля 1976 г.). Когда АМС проходит участок орбиты от апоаписа до точки, находящейся в 2 ч от периаписа, удается получить данные для всего диска планеты, представляющего собой преимущественно ее ночную сторону. Поле теплового излучения выявляет в этом случае широтные вариации радиационной температуры, обусловленные особенностями инсоляции в рассматриваемое время года (лето северного полушария), и быстрый подъем температуры поверхности после восхода Солнца. Так, например, по данным для 29 июня 1976 г. радиационная температура для диапазона 17,7—24 мкм варьирует от более 240 К в полдень на экваторе до менее 140 К вблизи Южного полюса. Значительные неоднородности поля температуры поверхности приурочены к особенностям рельефа.

Наблюдения южной полярной шапки с АМС «Маринер-7» позволили сделать вывод, что сезонные полярные шапки состоят главным образом из сухого льда. Однако состав остаточных полярных шапок подвергался длительной дискуссии. Изобилие флювиальных форм рельефа на Марсе позволяет считать, что марсианская атмосфера была в прошлом гораздо более плотной и постоянные резервуары CO_2 в виде отложений сухого льда в полярных шапках могли способствовать периодическим перестройкам атмосферы и, в частности, служить холодной «ловушкой», которая сильно влияет на динамику водяного пара.

Убедительным свидетельством отсутствия сухого льда было обнаружение в полярных районах температур поверхности, которые существенно превосходят температуру конденсации (148 К) углекислого газа при среднем давлении 6,1 мбар. Отсюда следует, что углекислый газ может быть «сконденсирован» в форме углекислотноводного клатрата $\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ при эффективной плотности CO_2 , равной 0,33 г/см³, что может происходить при температуре на 5 К выше, чем точка конденсации чистого CO_2 . Если же температура выше 155 К, то это означает невозможность существования сухого льда на поверхности Марса.

ИК измерения в интервалах 18—24 мкм и 10—13 мкм, осуществленные с борта АМС «Викинг-2» в районе Северного полюса поздним летом (31 августа 1976 г.), выявили соответствие между структурой полей излучения в видимой и ИК областях спектра [57]. Если яркостные температуры больших темных участков $T_{20} = 235$ К, то остальная часть остаточной полярной шапки имела температуру, близкую к 205 К, а ее альbedo составляет около 43%. Сравнительно низкое альbedo льда указывает на его загрязненность. Почти для всех точек справедливо соотношение $T_{20} = 240 - 146(A - 0,2) \pm 5$ К, где A — альbedo поверхности.

Следует, таким образом, считать, что остаточная полярная шапка и ее ответвления представляют собой лед с грязевыми включениями, состоящими из осевшей пыли. Высокие температуры полностью исключают возможность того, что постоянная полярная шапка является углекислотной. Возможно, однако, что существует подповерхностный сухой лед. Постоянство ледовых отложений в течение пяти лет указывает на их значительную толщину, которая может варьировать от нескольких сантиметров до 1 км (надежные данные о толщине отсутствуют).

Анализ результатов ИК измерений с орбитальных аппаратов «Викинг» в различные моменты времени днем позволил выполнить расчеты суточного хода температуры на различных глубинах в грунте и сделать прогноз годового хода температуры в местах посадки СА «Викинг» [58]. Хотя положенная в основу расчетов модель однородного грунта с плоской поверхностью не позволяет описать поле яркостной температуры вполне адекватно, расчеты дают значения температуры грунта и его поверхности, которые согласуются с данными наблюдений в пределах 5 К.

Параметрами, входящими в расчетные формулы, являются: альbedo и излучательная способность поверхности, а также тепловая инерция $I = \sqrt{\rho kc}$, где k — теплопроводность, ρ — плотность, c — теплоемкость грунта. Тепловая инерция грунта принята равной $(9 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ и $(8 \pm 1,5) \cdot 10^{-3}$ кал/(см²·с·К) соответственно.

Результаты вычислений обнаружили существенно различный тепловой режим мест посадки спускаемых аппаратов «Викинг-1, -2» (САВ-1, САВ-2). Для места посадки САВ-1 характерен слабый годовой ход температуры, тогда как на участке САВ-2 имеет место резко выраженный годовой ход. Полуденная температура достигает максимума в период, близкий к осеннему равноденствию, но не в середине лета, и имеет вторичный максимум в период весеннего равноденствия. Этот полугодовой ход температуры обусловлен влиянием эксцентриситета орбиты Марса.

Анализ стереоизображений с САВ-1 и САВ-2 показал, что 8,6 и 17% поверхности соответственно покрыто камнями размером 5 см и больше. Исследование изображений для оценки той части теплового излучения, которая обусловлена камнями, дал возможность оценить суточный ход температуры грунта (исключая влияние камней) на различной глубине (до 25 см).

Температура поверхности на участках САВ-1 и САВ-2 варьирует в пределах 183—263 К и 183—268 К соответственно. Амплитуда суточного хода температуры убывает экспоненциально с глубиной при показателе экспоненты, равном 5 см. Температура на глубине 24 см близко соответствует средней температуре поверхности. Расчет максимальной температуры грунта под камнями на участке посадки САВ-2 дал значение, равное 230 К, а минимальной — 201 К. Поскольку период функционирования САВ-2 совпадал со временем наивысших температур, можно считать, что температура грунта в этом случае никогда не превышает 234 К.

Выполненное в работе [56] построение глобальной карты отраженной солнечной радиации привело к оценке среднего ламбертова альbedo поверхности $A_L \approx 0,25$, изменчивость которого отчетливо коррелирует с распределением темных и светлых областей марсианской поверхности. Наблюдается усиление яркости, которое следует приписать влиянию утренних приземных туманов или изморози на поверхности. Аномально ярким ($A_L \geq 0,35$) оказался район *Argyre Planitia*, что, по-видимому, обусловлено наличием на поверхности льда из углекислоты (здесь температура поверхности ниже точки сублимации углекислого газа). В районе четырех главных вулканов имеет место усиление градиентов яркости, которое можно объяснить влиянием склонов.

Интересно сопоставить результаты, полученные при помощи ИСМ, с данными наземных наблюдений альbedo Марса. На основе анализа фотографий Марса, полученных в 1971 и 1973 гг. с использованием красного светофильтра, Капен [23, 24] исследовал закономерности пространственно-временной изменчивости альbedo планеты. По данным за 1973 г. рассмотрены шесть примеров регулярного годового хода и один случай вековой изменчивости потемнения. Как правило, трансформация темных деталей Марса в 1973 г. не была следствием пыльной бури 1971 г., а

проявилась под влиянием усиления яркости соседних участков. Наблюдения 1975 г. выявили значительные изменения альbedo в районе *Sabaeus—Deltoton*.

Две серии фотографий, относящиеся к 1971 г. (весна южного полушария) и 1973 г. (лето южного полушария), подверглись фотометрической обработке. В обоих случаях условия геометрии визирования и характеристики изображений были сходными. Были выявлены существенные сезонные различия альbedo светлых и темных участков и обнаружена зависимость годового хода яркости от широты, не соответствующая, однако, классической концепции «волны потемнения». Короткопериодическая изменчивость альbedo наиболее сильно выражена весной, особенно в случае светлых участков. Корреляция между короткопериодической и долгопериодической изменчивостью отсутствует. Для лета южного полушария характерно ослабление относительных контрастов яркости. Не обнаружено какой-либо зависимости от фазового угла в пределах исследованного диапазона фазовых углов.

В работе [59] обсуждены результаты исследования теплового режима и температуры марсианской атмосферы, а также отражательной способности поверхности по данным измерений при помощи аппаратуры теплового картирования, установленной на АМС «Викинг» с целью выявления закономерностей: 1) суточного хода температуры воздуха; 2) поля температуры поверхности в высоких широтах и районах нескольких кратеров; 3) угловой зависимости характеристик излучательных и отражательных свойств поверхности в месте посадки спускаемого аппарата «Викинг-1» (САВ-1).

Интерпретация данных измерений уходящего излучения на длине волны 15 мкм, относящихся к широте места посадки САВ-2 (48° с.ш.), выявила наличие сильной широтной изменчивости температуры в южном полушарии и значительного суточного хода с амплитудой не менее 15 К при максимуме температуры, наступающем примерно через 2,2 часа после полудня — в северных широтах. Этот суточный ход обусловлен главным образом поглощением солнечной радиации взвешенной в атмосфере пылью на высотах до 30 км. Выше 20 км вертикальный профиль температуры имеет волнообразный характер, что следует приписать влиянию тепловых приливов.

Температура вершины вулкана *Arsia Mons* изменяется в течение суток почти вдвое. Ярко выраженный суточный ход температуры характерен для плоскогорья района *Tharsis*, что свидетельствует о наличии здесь грунта, обладающего малой тепловой инерцией. Обнаружено, что тепловая инерция материала дна нескольких типичных крупных кратеров выше, чем окружающей местности. Вероятно, это обусловлено селекцией кратерами эолового материала. Яркостная температура в месте посадки САВ-1 уменьшается с ростом угла относительно вертикали. Угловая зависимость интенсивности отраженной солнечной радиации от геометрии поверхности оказалась более сложной, чем ожидалось, что может быть связано с совместным влиянием рассеяния как атмосферой, так и поверхностью. Относящиеся к району *Chryse Planitia* данные измерений в диапазоне 9,8—12,5 мкм указывают на существование сильного суточного хода температуры поверхности и не согласуются с моделью однородного грунта, обладающего тепловой инерцией 0,009 кал/(см² Хс^{1/2}·К) $A_L=0,26$.

5. Свойства грунта

Для получения сведений о физических свойствах марсианского грунта могут быть использованы изображения поверхности, анализ проб грунта и показания ряда инженерных датчиков. Анализ панорамных изображений поверхности выявляет наличие образовавшихся в результате ударов метеоритов кратеров разных размеров, при формировании которых происходил выброс материала горных пород, составляющих поверхностные слои. Наблюдаются ясные признаки ветровой эрозии выброшенного материала.

Первое впечатление состоит в том, что ландшафт марсианской поверхности является промежуточным между ландшафтами лунных морей и земных пустынь, подвергающихся влиянию ветровой эрозии. Изображения поверхности вблизи опор СА содержат следы эрозии, обусловленной работой двух тормозных двигателей СА. Деформация грунта свидетельствует о том, что он является более прочным и (или) плотным, чем «номинальный» лунный грунт. Одна из опор, зафиксированная

на изображении, проникла в грунт на глубину около 3,6 см. Устройство для забора проб грунта произвело кратер глубиной 1 см и диаметром 9 см.

В работах [100, 101] обсуждены результаты исследования свойств грунта за первые 36 суток пребывания СА «Викинга-1» и 58 суток — «Викинга-2» на поверхности Марса. Расположение САВ-1 было очень удачным с точки зрения изучения свойств грунта, поскольку одна из его опор находилась на мягком грунте, значительно проникая в глубь грунта, а другая — на жестком материале. Для забора проб были проделаны семь желобов в грунте на участках «песчаных равнин» (мелкозернистый грунт) и «скалистых равнин» (скалистый грунт, покрытый мелкодисперсным материалом). В табл. 3 приведены различные параметры, характеризующие свойства грунта по данным САВ-1 и САВ-2.

Рассматриваемые параметры получены на основе анализа данных о динамике посадки СА, деформации грунта, сдуве частиц ветром и других наблюдений. При планировании посадки СА предполагались разнообразные модели грунта: 1) лёсс, 2) песчаные дюны, 3) грунт типа лунного, 4) гравий, 5) обнаженные скалы. САВ-1 совершил посадку на участке, который обладает чертами всех этих моделей.

Таблица 3

Свойства грунта по данным САВ-1 и САВ-2

Свойство	САВ-1		САВ-2
	песчаные участки	участки горных пород	Бонневиль и Бэта
Плотность, г/см ³	1-1,6	1,8	1,5-1,8
Концентрация частиц различных размеров (на поверхности и вблизи поверхности):			
10-100 мкм, %	60	30	30
100-2000 мкм, %	10	30	30
Угол внутреннего трения, °	20-30	40-45	40-45
Сопротивление проникновению в грунт, дин/(см ² ·см)	3·10 ⁴	6·10 ⁵	6·10 ⁵
Сила сцепления, дин/см ²		10 ³ -10 ⁴	10 ⁴
Сила прилипания, дин/см ²		10 ¹ -10 ²	
Коэффициент трения скольжения		0,55-0,65	

Участок поверхности Марса в непосредственной близости от точки посадки САВ-2 покрыт камнями размером до 0,23 X 0,65 м, часть которых погружена в мелкодисперсную породу, и мелкодисперсным реголитом. Этот участок является более однородным, чем поверхность близ САВ-1, состоит из более грубодисперсного материала, обширная его часть покрыта коркой, более заметны следы эрозии, обусловленной работой двигателя мягкой посадки САВ-2.

Неожиданным оказалось отсутствие дюнообразных форм рельефа. При заборе проб грунта с САВ-2 впервые удалось сдвинуть камень и взять пробу мелкодисперсного грунта на участке под камнем, который не подвергался облучению УФ радиацией и процессу ветровой эрозии. В работе [101] детально описаны участки получения проб грунта и операции по взятию проб.

Анализ данных обнаруживает как сходство, так и важные различия свойств грунта на участках посадки САВ-1 и САВ-2. Так, например, во втором случае частота встречаемости камней размером 10 см и больше примерно вдвое выше. Камни близ САВ-2 характеризуются более пористой поверхностью. Благодаря сохранению установленного на опоре № 2 САВ-2 датчика температуры, который предназначался для измерений во время спуска на парашюте, этот датчик использован для оценки температуры (поскольку опора проникла в грунт только на 2,5 см, вероятнее всего, что датчик не находится в контакте с поверхностью), имеющей ярко выраженный суточный ход, близкий к расчетному ходу температуры поверхности, за исключением того периода, когда датчик был

затенен. Планируется дальнейшее взятие проб грунта как САВ-1, так и САВ-2, после начала продленной миссии 11 января 1977 г.

Предпринятый в работах [82—84] анализ изображений поверхности Марса, полученных со спускаемого аппарата АМС «Викинг-1», выявил ветровую эрозию, проявляющуюся в наличии параллельных полос мелкодисперсного материала на подветренных сторонах крупных камней, которые совпадают по направлению с ветровыми «струями» грунта, обнаруженными на изображениях с орбитального аппарата; в накоплении смешанных мелких частиц (размером 10—100 мкм) в форме полос («сугробов») к северо-востоку от СА, где имеет место повышенная шероховатость поверхности, обусловленная присутствием камней размером 2—3 м. Как правило, полосы имеют высоту порядка десятков сантиметров, ширину около нескольких метров и расположены в направлении, перпендикулярном ветру.

Полосы имеют значительно менее регулярно топографическую конфигурацию, чем земные дюны. Между полосами видна расположенная под слоем мелкозернистого материала скальная порода. По крайней мере в двух местах заметна стратификация полос, указывающая на большую вероятность того, что они образованы процессом дефляции, а не осаждения частиц. Возможно, что полосы появились в результате осаждения частиц в период пыльной бури, а затем подвергались влиянию дефляции. Не исключена, однако, и вероятность того, что они являются древними (это согласуется с выводом об очень медленной эрозии на Марсе) или появились в результате сдувания частиц толстого (порядка нескольких метров) слоя мелкодисперсного материала, покрывавшего всю поверхность рассматриваемого района. Поскольку в апреле 1977 г. ожидается очередная глобальная пыльная буря, наблюдения в этот период должны иметь важное значение для выявления природы полос.

Для мелких частиц, составляющих полосы, характерно сильное сцепление (до 10^4 дин/см²), что должно оказывать значительное влияние на процесс ветровой эрозии. В связи с этим наиболее легко перемещаемыми должны быть частицы размером 100—200 мкм. Поскольку в полосах доминируют частицы 10—100 мкм, при отсутствии переноса частиц с других участков планеты поверхность в рассматриваемом районе должна быть очень устойчивой даже во время пыльных бурь. Одной из причин отсутствия частиц больше 100 мкм мог быть их перенос в другой район. Другой возможной причиной является разрушение частиц при столкновении.

Изучение процессов переноса и сдувания частиц на поверхности Марса имеет важное значение в связи с решением проблемы происхождения глобальных пыльных бурь [8, 9]. За последние несколько десятилетий глобальные пыльные бури на Марсе возникали в 1956 и 1971 гг. как направленные к востоку вторжения пылевых облаков из зоны утреннего терминатора в области *Noachis—Hellas*.

В работе [110] высказаны соображения о совокупности условий, которые могут благоприятствовать возникновению пыльных бурь во время прохождения Марсом района перигелия его орбиты.

Исследования эффективности ветровой эрозии привели к выводу, что с точки зрения учета этого фактора наиболее благоприятные условия возникают в зонах высокой плотности воздуха (таких, как наиболее низко расположенные участки области *Hellas* или северная полярная шапка) в ночное время суток зимой. Если проанализировать влияние состояния устойчивости атмосферы, то оказывается, что дестабилизирующее воздействие пограничного слоя, обусловленное нагреванием поверхности за счет поглощения солнечной радиации, в 2—2,5 раза более эффективно как фактор переноса к поверхности горизонтального компонента количества движения, обусловленного ветром свободной атмосферы, чем перемешивание, связанное с адиабатическими условиями.

Поскольку ночью преобладает устойчивость атмосферы, следует предположить, что наиболее благоприятные условия подъема частиц в воздух осуществляются ранним утром на обращенных к солнцу склонах при ясном небе. Вместе с тем в этот период возникают сильные склоновые ветры, направленные вверх по склону, которые обусловлены температурными контрастами подстилающей поверхности. Наблюдения показали, однако, что первоначальное облако пыльной бури перемещается вниз по склону. На этом основании можно предположить, что первоначальные условия, обеспечивающие триггерный механизм формирования пыльной бури, связаны с наличием гравитационного потока вниз по склону, который аналогичен земной боре. Если применить земные аналоги, то можно исходить из того, что достаточно интенсивным источником холодного воздушного потока является струя полярного воздуха.

Как показал Конрат [30], существенное влияние как фактор, стимулирующий начало глобальной пыльной бури, может оказывать эффект взаимодействия атмосферных приливов и топографии марсианской поверхности. Подобный вывод основан на том, что восстановление поля температуры в марсианской атмосфере по данным измерений уходящего теплового излучения при помощи установленного на АМС «Маринер-9» инфракрасного интерференционного спектрометра (ИКИС) привело к выводу, что в период глобальной пыльной бури 1971—72 гг. отчетливо наблюдались орографически обусловленные возмущения поля температуры, налагающиеся на сильный суточный тепловой прилив.

Так, например, атмосфера теплее над понижениями рельефа и холоднее над горами в утреннее время, а в поздние послеполуденные часы ситуация изменяется на обратную. Эти возмущения возникают в результате обусловленных влиянием топографии дополнительных приливных мод, которые не следуют за Солнцем, являясь результатом кинематического взаимодействия распространяющейся на запад солнечной суточной волны с крупномасштабными особенностями рельефа.

Конрат [30] сделал расчеты в приближении возмущений первого порядка, которые показывают, что орографическая долготная компонента с волновым числом, равным 2, представляет собой сильный источник возмущения. Особенно сильно возбуждается ею мода $\theta_1^{1, -1}$, которая соответствует перемещающейся на восток волне с волновым числом 1 в слое толщиной порядка высоты однородной атмосферы. Фазовая скорость этой волны равна по величине, но противоположна по направлению солнечно обусловленной скорости. В приближении, учитывающем лишь возмущения первого порядка, модуляция тепловых солнечных приливных волн крупномасштабной орографией проявляется в возбуждении волн с долготными волновыми числами, равными сумме или разности волнового числа нулевого порядка и орографического волнового числа. Фазовые скорости этих волн отличаются от скорости солнечно обусловленных приливных волн.

Хорошее согласие расчетных и наблюдаемых возмущений поля температуры свидетельствует о надежности идентификации основных приливных мод. Полученные результаты соответствуют также сделанному ранее Зуреком [113] выводу о том, что мода $\theta_1^{1, -1}$ должна оказываться сильно возбужденной. Оценки приливных компонентов полей ветра вблизи марсианской поверхности выявили существенный вклад топографически обусловленных мод низких широт. Вблизи 30° ю. ш., где имеют место наиболее сильные ветры, амплитуда изменяющегося в течение суток зонального ветра возрастает в некоторых районах до 40 м/с.

Хотя грубость модели определяет предварительность рассмотренных количественных результатов, они несомненно свидетельствуют о возможности обусловленного крупномасштабной топографией усиления ветра, которое может в некоторых районах вносить существенный вклад в инжекцию пыли в атмосферу в периоды пыльных бурь.

Расчеты Конрата [30] обнаружили также наличие орографически обусловленных мод, распространяющихся в вертикальном направлении. Эти моды не оказывают сколько-нибудь значительного влияния на поля температуры и ветра в нижних слоях атмосферы, но приводят к появлению сильного потока энергии вверх от поверхности. Подобные моды являются, таким образом, возможным источником энергии для верхней атмосферы в период пыльной бури. Однако для количественной оценки распространения энергии в верхнюю атмосферу необходимо более детальное моделирование атмосферы, чем рассмотренное выше.

Согласно работам [53, 54, 65], определенный вклад в стимуляцию процесса развития пыльной бури может вносить сальтация (беспорядочные движения частиц вверх и вниз вблизи поверхности в результате соударения с нею падающих частиц). Изучение физики процесса эрозии и первоначального механизма формирования пыльных бурь вызвало большой интерес к исследованиям условий подъема частиц марсианского грунта с поверхности как путем численных экспериментов, так и моделирования в аэродинамических трубах при условиях, эквивалентных марсианским.

В работе [108] выполнены численные эксперименты с использованием двухмерной модели потока, разработанной для исследования подъема частиц с поверхности в земных условиях, в которую были введены эмпирические поправки с целью учета специфики марсианских условий. Подъем и перенос частиц грунта определяются соотношением подъемной силы и силы трения, которые сильно зависят от числа Рейнольдса.

Как на Земле, так и на Марсе, подъемная сила имеет решающее значение для начала процесса сальтации. Эквивалентность теоретического описания этого процесса определяется из условия равенства отношений динамической скорости v^* к пороговой динамической скорости v_{*t} , определяющей начало сальтации. В табл. 4 приведены значения v^* для Земли и Марса при различных диаметре частиц D (мкм) и плотности частиц ρ_p (г/см³).

Главная специфика Марса состоит в том, что в этом случае сальтация имеет место в пограничном слое, содержащем вязкий подслой, тогда как для Земли характерен диапазон v_{*t} , соответствующий переходной зоне. Толщина вязкого подслоя на Марсе составляет около 1 см. Сравнение траекторий частиц на Земле и Марсе при идентичных v^*/v_{*t} показало, что в условиях Марса траектории выше (до 40%) и длиннее. Отношение длины к высоте траекторий на Марсе значительно выше, а угол соударения с поверхностью существенно меньше (обычно меньше 30°), чем на Земле (5—15°). Максимальная вертикальная составляющая скорости частиц w/v^* равна примерно одной десятой по отношению к земной, а горизонтальная составляющая скорости (вдоль направления ветра) в марсианских условиях значительно больше, что должно обуславливать более интенсивную эрозию. На основе сочетания экспериментальных данных и двухмерной модели в работе [108] получены оценки, относящиеся к трехмерной модели потока при наличии кратера. Полученные оценки показывают, что в этом случае значительно усиливается процесс эрозии на «теневой» стороне кратера. Этот вывод объясняет природу образования «струй» пылевого материала на поверхности вблизи некоторых кратеров.

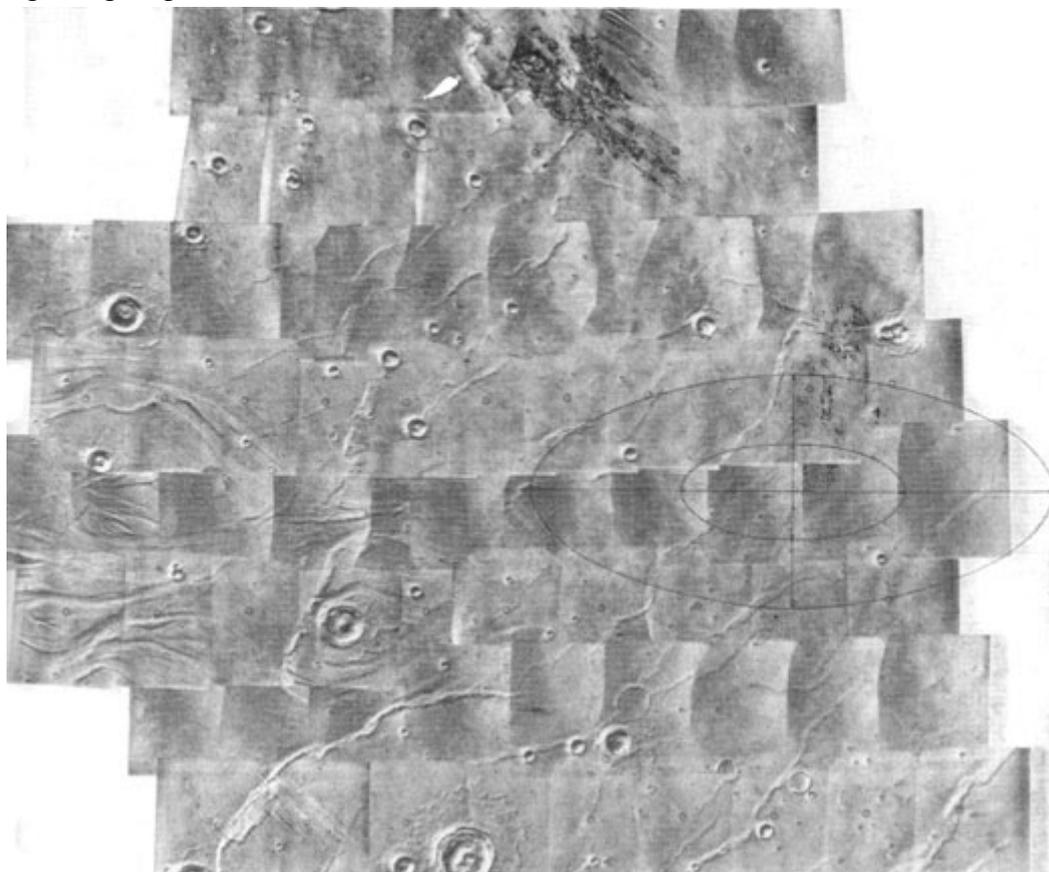


Рис. 1. Место посадки спускаемого аппарата АМС «Викинг-1». Центр посадочного эллипса на монтаже телевизионных изображений, полученных с АМС «Викинг-1» 9 июля 1976 г.

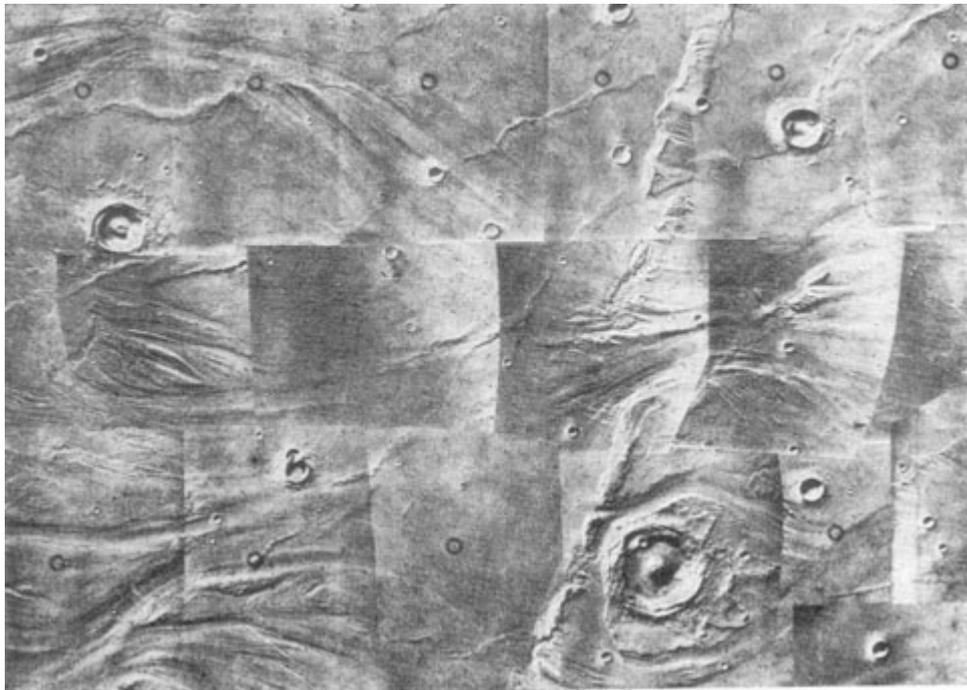


Рис.2. Мозаика 15 телевизионных изображений, полученных с АМС «Викинг-1» 9 июля 1976 г. при расстоянии до поверхности около 1630 км.

Все изображение охватывает площадь 250 X 200 км к западу-северо-западу от места посадки СА.

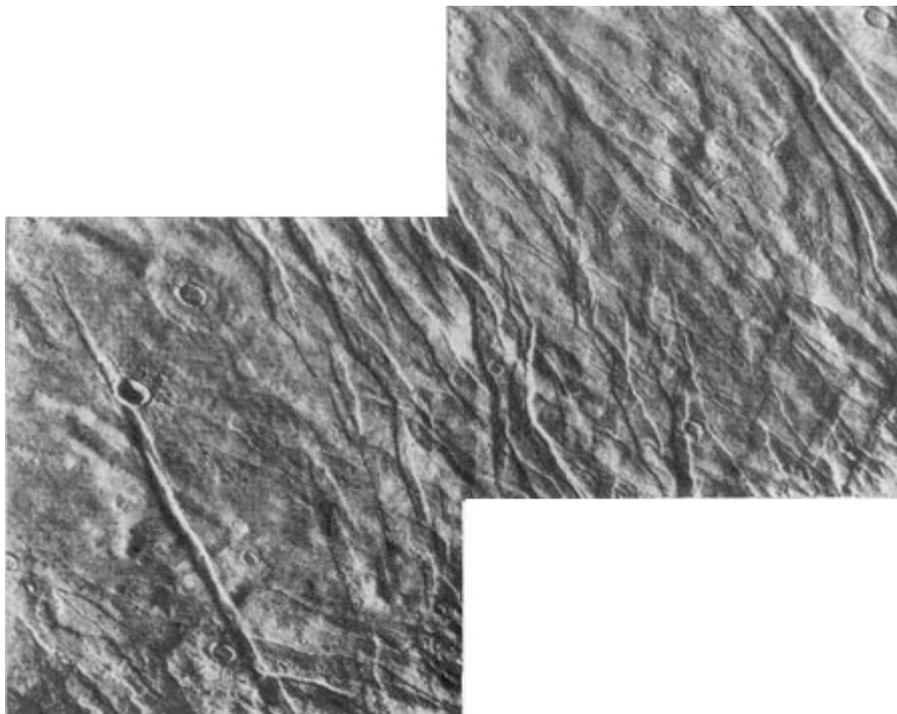


Рис. 3. Два изображения западной части вулканического плато *Alba Patera*, полученные с АМС «Викинг-2» 15 августа 1976 г. при расстоянии до поверхности около 3950 км. Каждое изображение охватывает площадь 175 X 175 км.

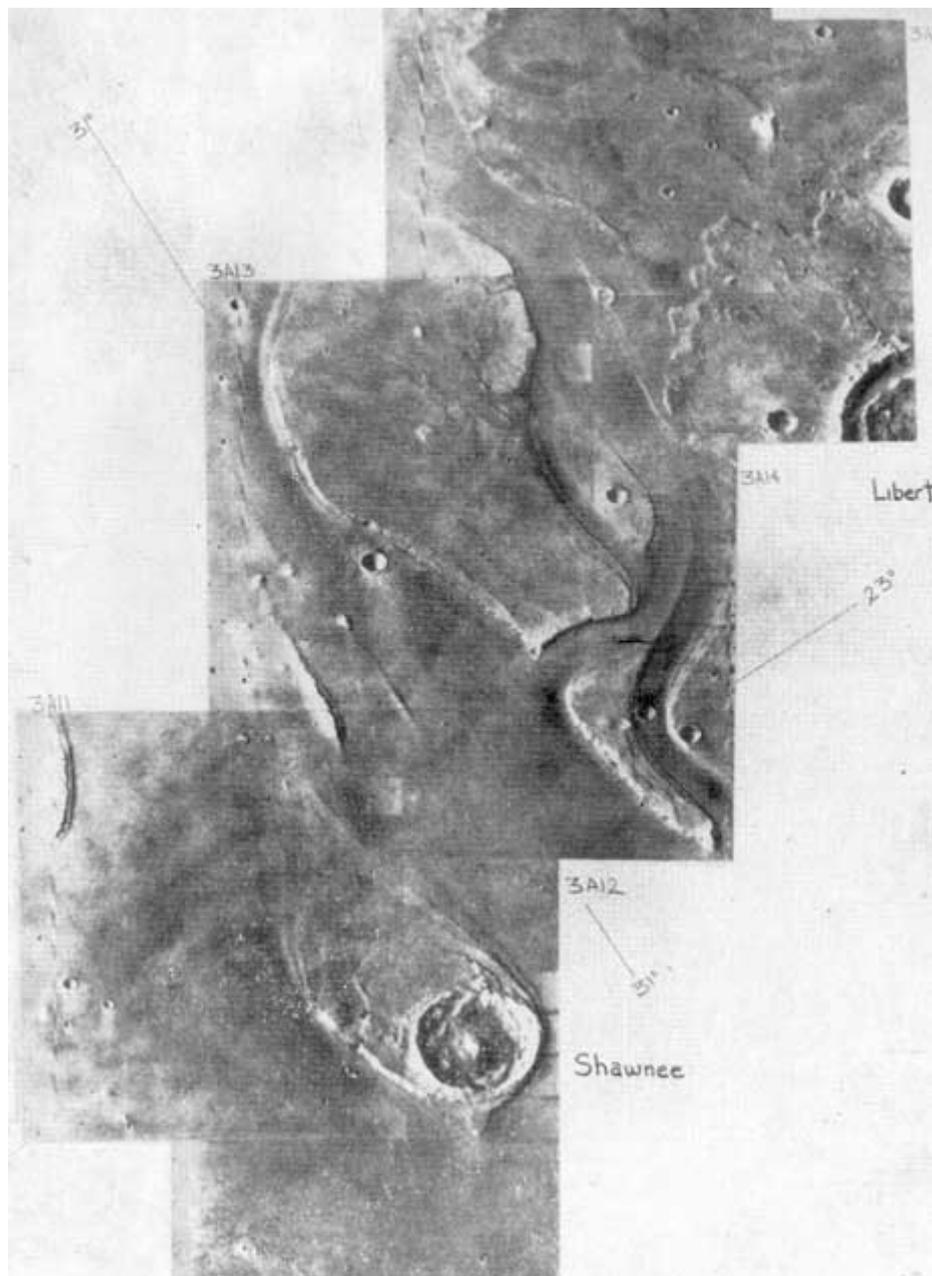


Рис. 4. Монтаж шести изображений района *Chryse*, полученных 22 июня 1976 г. с АМС «Викинг-1».

Отчетливо выявляющиеся меандрирующие каналы побуждают высказать предположение об их флювиальном происхождении.



Рис. 5. «Острова» в канале района *Areas Valley* на двух изображениях высокого пространственного разрешения, полученного с АМС «Викинг-1» 23 июня 1976 г. Изображения получены с интервалом времени 9 с при расстоянии до поверхности, равном 1723 км.

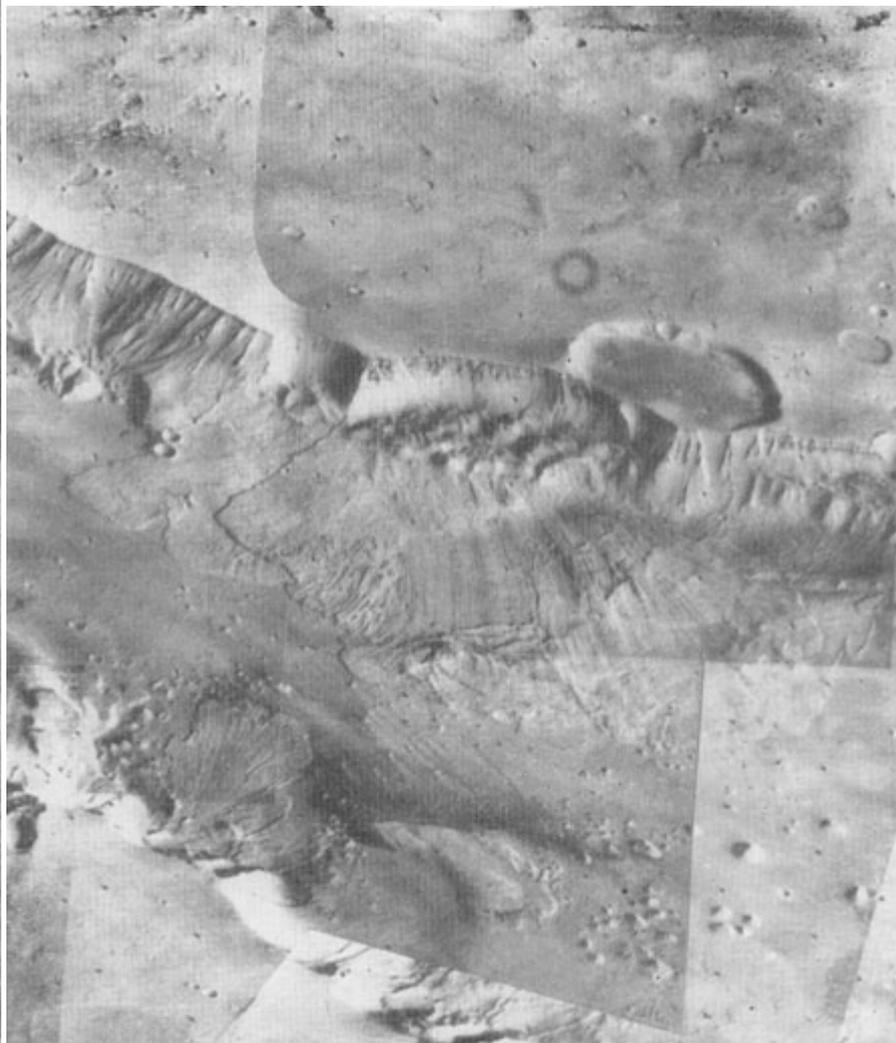


Рис. 6. Изображение гигантского экваториального каньона глубиной около 2 км в районе *Capri Chastna*, полученное с АМС «Викинг-1» 3 июля 1976 г. с расстояния около 2000 км. Размер изображения 70x150 км.

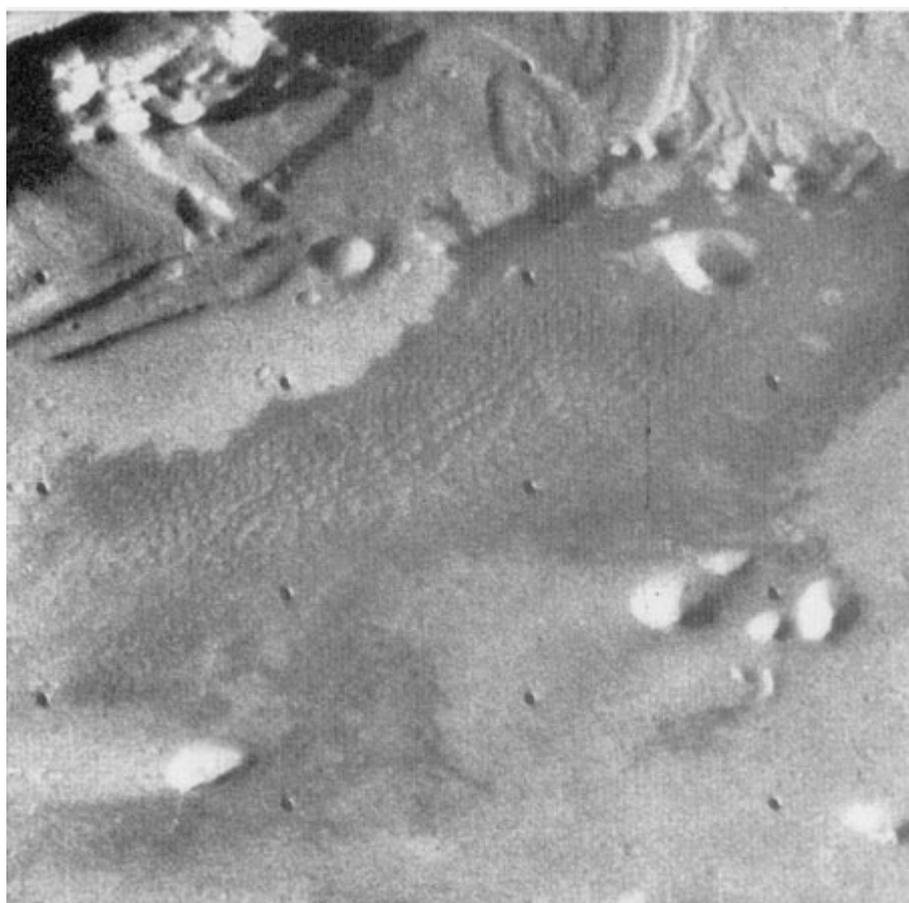


Рис. 7. Изображение дюн на дне района *Gangis Chasma—Ganges Chasm* — ветви системы экваториального каньона Марса, полученное с АМС «Викинг-1» 1 июля 1976 г. с целью выявления возможных мест посадки АМС «Викинг-2». Изображение охватывает площадь 50 X 20

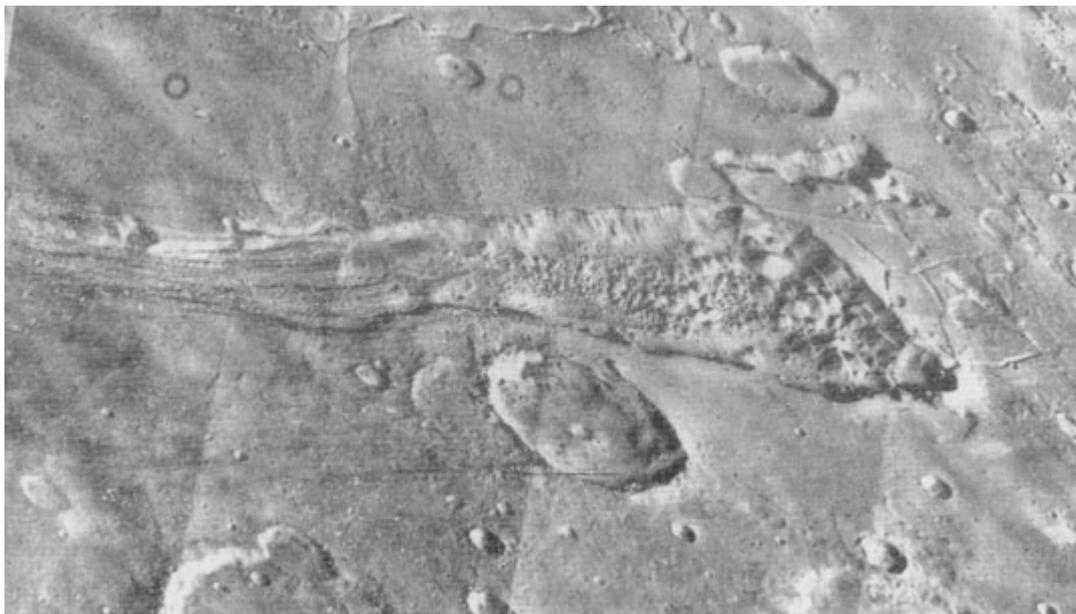


Рис. 8. Мозаика изображений покрытого каналами участка поверхности близ района *Capri Chasma*, полученных с АМС «Викинг-1» 3 июля 1976 г. с расстояния 2300 км.

Площадь изображения составляет около 300Х300 км. Возможно, что опускание участка хаотического рельефа в правой части изображения было частично обусловлено таянием подповерхностного льда.

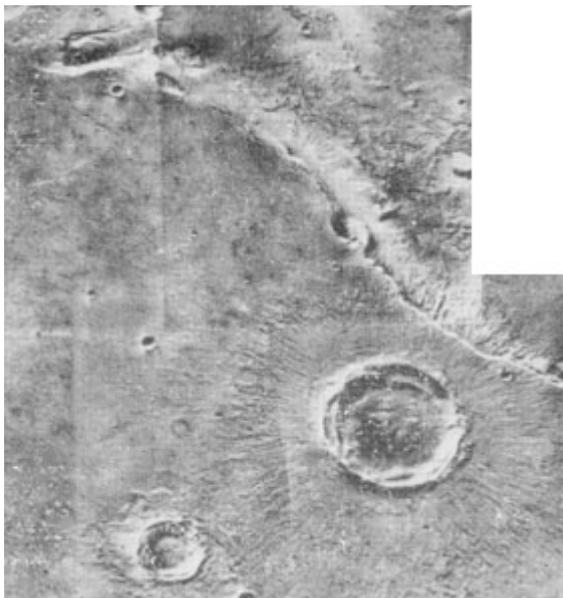


Рис. 9. Изображение свежего молодого кратера диаметром около 30 км, расположенного в районе *Lunae Planum* (правый нижний угол фотографии).

Центр изображения, полученного с АМС «Викинг-1» 11 июля 1976 г. с расстояния 1760 км, расположен в точке 23° с. ш., 52° з. д.

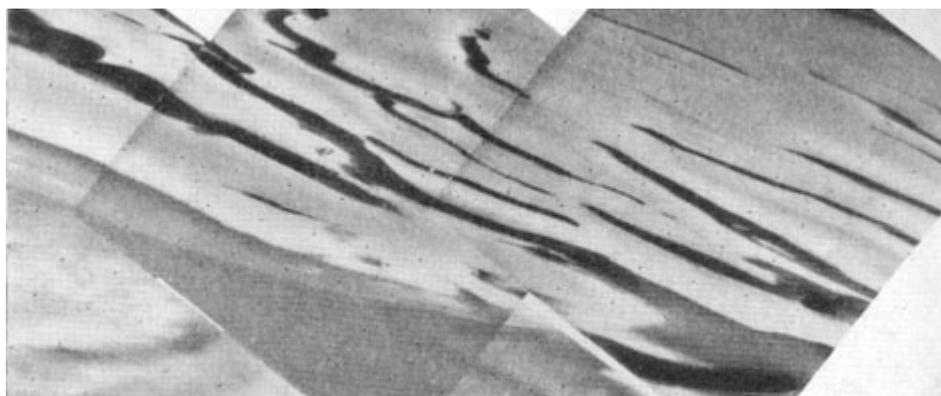


Рис. 10. Монтаж из трех изображений зоны северной полярной шапки, полученных с АМС «Викинг-2» 30 августа 1976 г. при расстоянии до поверхности около 4000 км.

Рис. 11. Изображение облачного покрова в области вулкана *Olympus Mons*, полученное с АМС «Викинг-1» 9 августа 1976 г. с расстояния 8000 км в утреннее время.



Рис. 12. Изображение поверхности Марса, полученное со спускаемого аппарата АМС «Викинг-1» 6 августа 1976 г.

В конце выдвижной стрелы СА установлены метеорологические датчики.

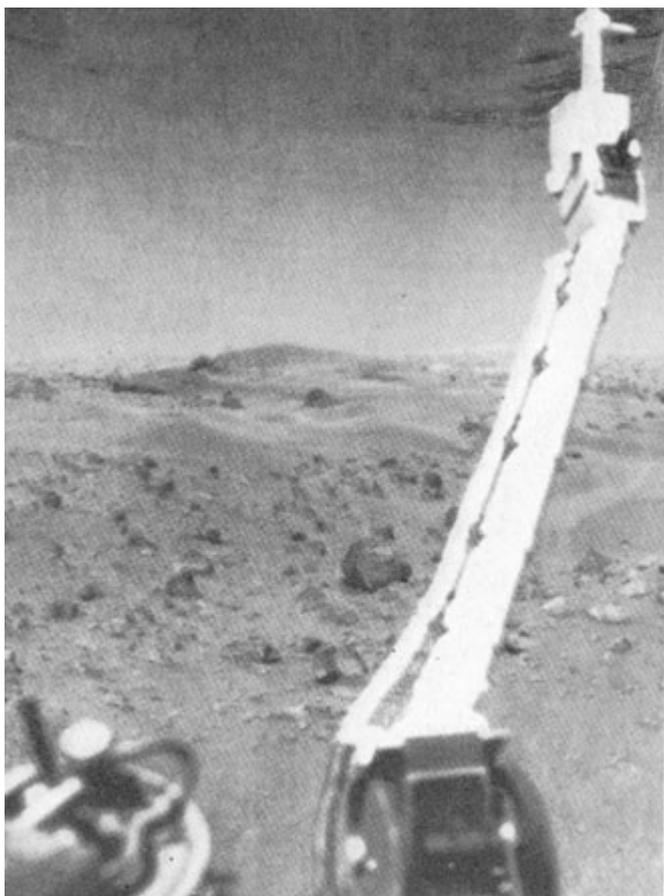


Рис. 13. Изображение поверхности Марса вблизи одной из опор спускаемого аппарата СА «Викинг-1». 22 июля 1976 г.

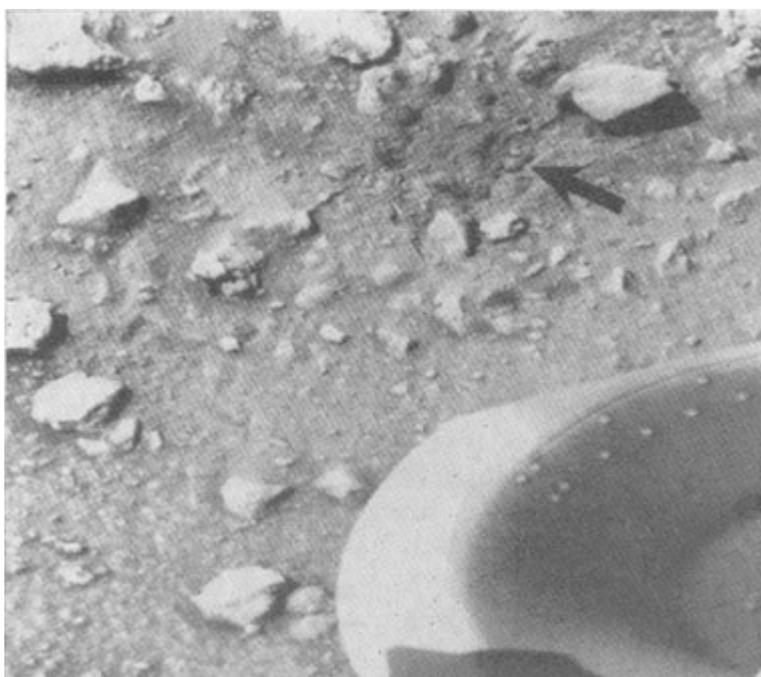


Таблица 4

Пороговые значения динамической скорости на Земле и Марсе

D, мкм	Плотность					
	1,55	2,58	3,61	1,55	2,58	3,61
	Земля			Марс		
50	16,2	20,9	21,9	275	292	308
150	16,5	21,3	25,2	228	267	299
250	21,3	27,5	32,5	234	279	315
350	25,2	32,5	38,4	242	293	331
450	28,5	36,9	43,6	251	306	349
550	31,5	40,7	48,2	260	319	366
650	34,3	44,3	52,4	268	331	383
750	36,9	47,5	56,3	276	342	400
850	39,2	50,6	29,9	283	354	415
950	41,5	53,5	63,3	290	364	429
1050	43,6	56,3	66,6	297	373	441

В работе [54] сопоставлены результаты оценки зависимости пороговой динамической скорости от диаметра частиц (10— 10 000 мкм) для условий Земли, Марса и Венеры. В случае учета сил сцепления между частицами всегда имеет место минимум динамической скорости, соответствующий оптимальному диаметру частиц, которые наиболее легко сдуваются ветром. При отсутствии сцепления наблюдается монотонное увеличение динамической скорости с ростом диаметра. Оптимальный диаметр частиц варьирует от 50 мкм на Венере до 75 мкм на Земле и 150 мкм на Марсе. При этом минимальные пороговые значения динамической скорости испытывают скачкообразные изменения примерно на порядок величины: от 2,2 до 20,5 и 250 см/с соответственно.

Частицы, которые имеют диаметр меньше 20; 52 и 250 мкм (соответственно на Венере, Земле и Марсе), оказываются взвешенными в атмосфере при достижении порогового значения скорости. Частицы, обладающие диаметром больше критического, будучи приведены в движение, остаются преимущественно в состоянии сальтации. Они становятся взвешенными лишь в случае, если достигается такое отношение динамической скорости к ее пороговому значению, при котором скорость ветра примерно равна динамической скорости.

Анализ цветных изображений неба в период сумерек (± 20 мин по отношению к моменту захода Солнца) свидетельствует о присутствии в атмосфере большого количества красной пыли с размером частиц около 1 мкм. Для эффективной длины волны 0,67 мкм оптическая толщина атмосферы составляет около 0,45. Возможно, что низкая прозрачность и высокая запыленность атмосферы являются следствием кумулятивного эффекта местных пыльных бурь.

Установленный на СА «Викинг-1» рентгеновский флуоресцентный спектрометр позволил осуществить измерения концентрации в марсианском грунте элементов с $Z > 12$, к которым принадлежат наиболее геохимически существенные и целый ряд малых компонентов грунта. В работе [106] приведены результаты анализа взятой на 8 сол первой пробы, выполненного в период 8—30 солов. Основными компонентами грунта оказались железо, кальций, алюминий, кремний и сера. Титан присутствует в малых количествах. Эти результаты согласуются с предположением, что марсианский грунт состоит из смеси обладающих прочным сцеплением частиц мелкозернистого силиката и минералов из окислов со значительной примесью сульфатов (возможно,— гидратированных).

Окислы железа (их минералогическая идентификация пока невозможна) являются, по-видимому, компонентом, ответственным за красноватую окраску поверхности Марса. Если они покрывают зерна силикатов, подобное покрытие должно быть очень тонким (тоньше 2 мкм) или несплошным. Характерные черты спектров свидетельствуют о высокой концентрации железа, относительно малом

содержании алюминия, рубидия, стронция и циркония, а также высоком отношении концентраций Са/К.

Предварительная обработка данных привела к следующим значениям относительной весовой концентрации (%): железо 14 ± 2 ; титан < 1 ; сера $2-5$; Са/К > 5 [106]. Малое содержание стронция, рубидия и циркония по сравнению с земными изверженными породами указывает на то, что исследованный образец грунта, по крайней мере частично, содержит продукты выветривания. По-видимому, сера присутствует главным образом в форме сульфатов (сульфаты кальция, магния, железа или щелочных металлов являются наиболее вероятными), но не исключено и наличие сульфидов. Поскольку полученные данные о составе грунта укладываются в рамки разнообразных минералогических и литологических моделей грунта, необходимы дальнейшие исследования.

Осуществленный при помощи рентгеновского флуоресцентного спектрометра элементный анализ мелкодисперсного компонента марсианского реголита привел к неожиданно сходному химическому составу грунта в далеко удаленных друг от друга (около 6500 км) местах посадки СА «Викинг-1, -2» [29]. Полученные количественные результаты приведены в табл. 5.

Как видно, в составе поверхностного слоя реголита преобладают кремний и железо при значительном содержании магния, алюминия, серы, кальция и титана. Концентрация кремния в форме двуоксида кремния составляет в районе посадки СА «Викинг-1» $45 \pm 5\%$, т. е. меньше значений концентрации ($60 \pm 10\%$), полученных по данным орбитальной инфракрасной спектроскопии взвешенного в атмосфере материала в период глобальной пыльной бури 1971 г.

Таблица 5

Элементный состав мелкодисперсной фракции (размер частиц ≤ 100 мкм) марсианского грунта (в % по весу) в точке посадки «Викинга-1» (S1) и разность концентраций в двух местах посадки (S2—S1)

Элемент	S1	S2-S1	Элемент	S1	S2-S1
Mg	$5,0 \pm 2,5$	ДО	K	$< 0,25$	0
Al	$3,0 \pm 0,9$	ДО	Ca	$4,0 \pm 0,8$	-0,2
Si	$20,9 \pm 2,5$	-0,1	Ti	$0,51 \pm 0,2$	2
S	$3,1 \pm 0,5$	+0,7	Fe	$12,7 \pm 2,0$	-0,1
Cl	$0,7 \pm 0,3$	+0,1	O*	$50,1 \pm 4,3$	ДО
			X*	$8,4 \pm 0,8$	ДО

Примечание. * — суммарные концентрации неидентифицированных окислов (O) и не обнаруженных компонентов (X, в том числе H_2O , Na_2O , CO_2 и NO_x). ДО — данные отсутствуют.

Концентрация серы на один—два порядка величины выше, а калия — примерно в 5—8 раз ниже соответствующих средних значений для земных природных образований (почвы, горные породы). Значения концентрации серы близко соответствуют, однако, найденным в хондритных метеоритах, которые обычно рассматриваются как протопланетное вещество. Высокое содержание серы на Марсе налагает ограничения на диапазон и количество возможных соединений, содержащих серу. Можно считать вероятным лишь сульфаты натрия, магния, кальция и железа или сульфид железа (исключая пирит).

Обнаружены следы стронция, иттрия, и, возможно, циркония, которые имеют относительную концентрацию порядка 10^{-4} . Мелкие камни типа гальки в районе *Chryse* содержат больше серы, чем мелкодисперсная фракция реголита, и, возможно, являются кусками сцементированной сульфатами поверхностной корки. Ранее было показано, что если предполагать, что красная или оранжевая пигментация реголита является результатом покрытия камней и мелкодисперсных частиц пленкой из геотита или гематита, то толщина такой пленки не должна превосходить 1—2 мкм. Данные табл. 5 определяют необходимость уменьшения максимально возможной толщины пленки до 0,26 мкм, так

как в противном случае результаты рентгеновского флуоресцентного анализа на Mg, Al и Si оказались бы значительно искаженными.

Оценка плотности образцов S1 дала значение, равное $1,10 \pm 0,15$ г/см³. Поскольку приведенный в табл. 5 элементный состав ограничивает плотность диапазоном 2,3—3,2 г/см³, это означает, что пористость частиц составляет около $60 \pm 15\%$. Забор и анализ последовательных проб грунта привел к выводу, что мелкодисперсная фракция реголита в районе *Chryse* обладает гораздо более сильной адгезией (слипанием), чем исследованные в лабораторных условиях земные аналоги.

Рассмотренный состав марсианского реголита естественнее всего интерпретируется как результат выветривания мафических (темных) изверженных пород. В работе [16] построена минералогическая модель, согласно которой марсианский мелкодисперсный реголит представляет собой смесь примерно 80% богатых железом глин, около 10% сульфата магния (кизерита ?), 5% карбоната (кальцита) и 5% окислов железа (гематит, магнетит, магемит, гетит ?). В табл. 6 представлены три модели состава реголита в сравнении с данными анализа мелкодисперсной фракции в месте посадки «Викинга-1» (51).

Таблица 6

Модели химического состава мелкодисперсного реголита

Компонент	Смесь			51
	1	2	3	
Окислы				
SiO ₂	55,1	46,0	43,6	44,7
Al ₂ O ₃	8,3	8,0	6,9	5,7
Fe ₂ O ₃	19,5	19,0	18,4	18,2
MgO	10,1	9,6	9,0	8,3
CaO	2,4	2,0	5,6	5,6
K ₂ O	0,0	0,0	0,0	0,1
TiO ₂	0,0	0,0	0,9	0,8
SO ₃	0,0	9,4	7,3	7,7
Минералы				
Нонтронит	51	52	48	
Монтмориллонит	19	21	17	
Сапонит	30	13	15	
Кирезит		16	13	
Кальцит			7	
Рутил			1	

Наличие богатых железом глин означает, что для их образования из мафических горных пород на Марсе должно было иметься (или имеется) достаточное количество воды или льда. По-видимому, мафическая природа мелкодисперсного компонента грунта, имеющего глобальное распространение, и горных пород, которые являются источником этого компонента, предотвращает крупномасштабную планетарную дифференциацию, подобную земной.

Установленные на СА «Викинг» комплексы масс-спектрометров (МС) и газовых хроматографов (ГХ) позволили осуществить анализы состава марсианской атмосферы и грунта, причем главной целью был поиск органических компонент. Пробы грунта подогревались в трех небольших печах за 30 с до температуры 200, 350 и 500°C для извлечения летучих компонентов и продуктов пиролиза. МС выполняет повторное и непрерывное сканирование спектра масс *m/e* в интервале 12—200 (время регистрации каждого масс-спектра составляет 10 с) и имеет динамический диапазон 1 : 10⁷. Каждый спектр воспроизводится как совокупность 3840 точек (чисел).

После посадки СА «Викинг-1» были взяты три пробы грунта на 8, 14, 31-м солах [17, 18]. Проба, полученная на 8-м соле, представляет собой тонкозернистый материал (преимущественно с глубины 4—6 см), перемешанный с материалом поверхности (его доля не превышает 10%). Проба, относящаяся к 14-му солу, была практически идентичной и поэтому не подвергалась анализу. Проба

31-го сола была взята на расстоянии около 3 м от места первой пробы и состоит преимущественно из гранулированного материала поверхности.

Анализ обеих проб при помощи ГХ не обнаружил каких-либо органических компонентов в количествах, превосходящих несколько частей на миллиард. При нагревании до 350 и 500°C выделялись заметные количества воды (от 0,1 до 1%), которая является, по-видимому, составной частью гидратов минералов. Не обнаружено сернистого газа, свободной серы и сероводорода. Полученные результаты исключают возможность какого-либо эффективного современного процесса, продуцирующего органические компоненты (разумеется, общность такого вывода ограничивается фрагментарностью анализа).

6. Газовый состав атмосферы

Предпринятые ранее измерения общего содержания водяного пара в марсианской атмосфере обнаружили, что водяной пар появляется в середине лета соответствующего полушария и его содержание становится максимальным примерно через два месяца, достигая 50 мкм при характерных горизонтальных масштабах порядка 10^3 км (наибольшее влагосодержание атмосферы наблюдается в умеренных широтах). В работах [35, 37] обсуждены предварительные результаты измерений с АМС «Викинг-1», выполненных в течение периода, начавшегося за двое суток до вывода АМС на орбиту искусственного спутника Марса и продолжавшегося до 30-го витка вокруг Марса, когда произошло отделение СА. Этот период соответствует началу «влажного» сезона в северном полушарии.

Рассматриваемые наблюдения охватывают южное (сухое) полушарие и северные широты до 20° при наличии нескольких изолированных серий измерений в полосе $40\text{--}50^\circ$ с. ш. Прибор, предназначенный для определения общего влагосодержания (датчик водяного пара на Марсе — ДВПМ), представляет собой спектрометр с дифракционной решеткой, функционирующей в 7200 см^{-1} ($1,4\text{ мкм}$) полосе поглощения водяного пара при спектральном разрешении $1,2\text{ см}^{-1}$, что позволяет обеспечить измерения влагосодержаний меньше 1 мкм атм. ДВПМ обычно работает как пятиканальный радиометр, три канала которого расположены вблизи центра полосы ($7223, 13; 7232, 20; 7242,74\text{ см}^{-1}$), а два — в окнах прозрачности. Приемниками излучения для всех каналов служат радиационно охлаждаемые сернисто-свинцовые фотоспротивления. Иногда осуществлялось сканирование по частоте с целью измерений спектрального распределения излучения в диапазоне $7215\text{--}7251\text{ см}^{-1}$. Поле зрения ДВПМ составляет 2×16 мрад, что соответствует «пятну» на местности 3×24 км при высоте периаписа 1500 км. За счет ступенчатого сканирования на 15 шагов вдоль короткой стороны поля зрения достигается охват площади около 20×45 км (в периаписе) за период сканирования $4,48$ с.

Наличие данных пятиканальных измерений позволяет определить не только общее влагосодержание, но также температуру и атмосферное давление вблизи уровня «центра тяжести» слоя водяного пара. Данные наблюдений свидетельствуют об очень малом влагосодержании ($0\text{--}30\text{ мкм}$) марсианской атмосферы в южном полушарии и постепенном увеличении влагосодержания при перемещении в северное полушарие. Максимальные значения достигали $20\text{--}30\text{ мкм}$, причем наибольшее значение (30 мкм) зарегистрировано в районе *Elysium Amazonis* при измерениях перед выводом АМС на орбиту вокруг Марса. Большой интерес представляют наблюдения дневного хода влагосодержания, отражающие особенности фазовых превращений воды в течение суточного цикла. Условия наблюдений позволили осуществить слежение за вариациями влагосодержания с рассвета до полудня в трех точках: $10,83^\circ$ с. ш., $15,69^\circ$ ю. ш. и $17,77^\circ$ ю. ш. Для первой из этих точек обнаружена регулярная воспроизводимость дневного хода с максимумом влагосодержания в местный полдень. Наблюдаются различия в дневном ходе для разных точек планеты. Водяной пар располагается близко к поверхности планеты и, по-видимому, находится в насыщающем равновесии по отношению к приповерхностной дымке или туману в течение большей части дня. По меньшей мере 80% водяного пара должно переходить в твердую фазу в период между полуднем и последующими утренними сумерками.

В работе [36] приведены результаты измерений содержания водяного пара в околополярной зоне марсианской атмосферы, выполненных с АМС «Викинг-2» в течение двухнедельного периода, близкого к дню летнего солнцестояния в северном полушарии.

Общее содержание водяного пара оказалось максимальным в полосе $70\text{--}80^\circ$ с. ш., а его абсолютные значения выше когда-либо наблюдавшихся ранее. Широтный профиль общего содержания водяного пара на 180° з. д. характеризуется возрастанием от нулевых значений в южном полушарии до $70\text{--}80$ мкм в полосе $70\text{--}80^\circ$ с. ш. и несколько убывает (до 55 мкм) вблизи Северного полюса (точность отдельных измерений составляет $10\text{--}15\%$, а средних значений $\pm 4\%$). Аналогичные результаты дало построение меридиональных профилей для других долгот.

Столь значительное влагосодержание атмосферы предполагает наличие у поверхности планеты таких высоких температур (>204 К), которые не допускают сохранения полярной шапки из твердой углекислоты (в этом случае температура должна быть равна 150 К). Отсюда вытекает, что доминирующим компонентом летней остаточной северной полярной шапки является лед. Грубая оценка толщины периферийной части ледового покрова полярной шапки приводит к значениям порядка 1—2 км. Толщина льда в центральной (сплошной) части полярной шапки должна быть такой же или большей.

Поскольку содержание водяного пара в атмосфере Марса очень мало, весьма вероятно, что мощным резервуаром водяного льда является планетарный реголит. Важной целью дальнейших исследований должно стать выяснение вопроса о том, является ли этот полярный резервуар в настоящее время суммарным источником или стоком атмосферного водяного пара на протяжении промежутков времени больше марсианского года.

В работе [86] рассмотрены результаты измерений состава и структурных параметров марсианской атмосферы, осуществленных при входе СА «Викинг-1» в атмосферу планеты 20 июля 1976 г. Состав атмосферы на высотах более 100 км измерялся при помощи масс-спектрометра для нейтральных газовых компонентов в диапазоне масс 1—50. Для измерений параметров ионосферы служил анализатор с замедляющим потенциалом (АЗП), позволяющий измерять температуру, состав и концентрацию ионов, а также энергетический спектр электронов (главной целью было в данном случае изучение взаимодействия солнечного ветра с верхней атмосферой). Датчики давления, температуры и ускорения предназначались для измерений на высотах ниже 100 км. Эта аппаратура вместе с гироскопом и радарным альтиметром орбитального отсека дала возможность получить вертикальные профили плотности, давления, температуры и ветра в широком диапазоне высот.

Анализ данных масс-спектрометра для высоты 135 км выявляет наличие отчетливых пиков при массах 40 и 20, свидетельствующих о наличии аргона. Оценка его отношения смеси (относительно CO_2) дала значение около 0,015 по объему, которое сильно расходится с данными АМС «Марс-6», приведшими к отношению смеси $0,35 \pm 0,10$ [5, 12]. По-видимому, отношение смеси ^{40}Ar в нижних слоях марсианской атмосферы не может быть столь высоким и не превышает $0,01\text{--}0,02$.

Хотя следует, естественно, отдать предпочтение данным прямых измерений, необходимо упомянуть, что, как показал В. И. Мороз [81] на основе анализа имеющихся данных спектроскопических и радиорефракционных измерений, результаты прямых измерений на СА «Марс-6» не противоречат этим данным. В работе [81] рассмотрены три типа косвенных измерений: 1) эквивалентной ширины слабых (ненасыщенных) линий углекислого газа, 2) эквивалентной ширины насыщенных линий, 3) радиорефракционные наблюдения. Во всех этих случаях присутствие в атмосфере Марса 25—30% аргона не оказывает существенного влияния на оценки значения атмосферного давления у поверхности. По-видимому, нижний предел возможного содержания аргона является наиболее вероятным.

Если исходить из радиорефракционных данных, наличие 25% аргона вызывает возрастание давления у поверхности на 0,5 мбар. Присутствие значительного количества аргона в марсианской атмосфере является одним из аргументов в пользу гипотезы о возможности существенно иного климата в геологическом прошлом Марса при атмосферном давлении 0,1 — 1 атм, более высокой температуре и наличии водных бассейнов.

Полученный по данным СА «Викинг-1» пик при массе 28 отображает вклад CO_2^+ , образующегося в результате ионизации CO_2 и CO , в дополнение к N_2^+ который является продуктом ионизации N_2 . Отношение смеси молекулярного азота (относительно CO_2) составляет около 0,06. Предварительная экстраполяция этих данных на более низкие высоты приводит к отношениям смеси порядка $0,02\text{--}$

0,03. На больших высотах отношение смеси молекулярного азота возрастает, вследствие влияния диффузионного разделения.

Оценка отношения смеси O_2 по пику массы 32 дает значение около 0,003 на высоте 135 км. Пик при массе 16 указывает на присутствие измеримых количеств атомарного кислорода. Соотношения концентраций изотопов $^{18}O/^{16}O$ и $^{13}C/^{12}C$ близки к их земным значениям. Анализ вертикальных профилей концентрации CO_2 , Ar, N_2 и O_2 в слое 140—190 км приводит к оценке средней температуры 180 ± 20 К. Заметное проявление диффузионного разделения газов на высотах более 140 км свидетельствует о том, что существенное влияние перемешивания в атмосфере ограничивается этим уровнем.

Данные АЗП для высоты 130 км указывают на то, что главным компонентом марсианской ионосферы является O_2^+ (этот важный результат является новым), а концентрация CO_2^+ оказывается примерно в 9 раз меньшей. Ионная температура составляет около 160 К, что согласуется с результатами масс-спектрометрических измерений. Полученные данные свидетельствуют о ведущем значении для ионосферы реакции: $CO_2^+ + O \rightarrow + O_2^+$.

Измерения в нижних слоях атмосферы привели к давлению у поверхности планеты в точке посадки СА, равному 7,3 мбар (точка посадки на 2,9 км выше среднего уровня марсианской поверхности, которому соответствует давление 6,1 мбар) и температуре 241 К при вертикальном градиенте температуры в приповерхностном слое, составляющем 3,7 К/км. Плотность воздуха, оцененная по скорости парашютирования, равна $0,0136$ кг/м³ на высоте 2,7 км, что указывает на преимущественно углекислотный состав атмосферы. В слое 25—90 км температура варьирует в пределах 120—165 К при наличии пиков на высотах 30 и 64 км, а выше 140 км плавно переходит в зону температур, полученную по данным масс-спектрометра.

Осуществленный в работах [86—88] предварительный анализ изотопного состава марсианской атмосферы по данным измерений при помощи масс-спектрометра для нейтральных частиц на высотах 100—200 км во время спуска СА «Викинг-1» привел к выводу, что в атмосфере преобладает CO_2 при наличии следов N_2 , Ar, O_2 , CO и O. Относительное содержание изотопов кислорода и углерода оказалось примерно таким же, как в земной атмосфере. В работе [87] обсуждены результаты последующего определения отношений концентрации изотопов $^{18}O/^{16}O$, $^{13}C/^{12}C$ и $^{15}N/^{14}N$ на основе анализа шести масс-спектров, относящихся к диапазону высот 111 — 157 км.

Рассматриваемый анализ привел к значениям $^{18}O/^{16}O = 0,0020 + 0,0001$ или $0,0021 + 0,0002$. Так как для земной атмосферы соответствующее среднее значение составляет 0,00204, то марсианская атмосфера не может быть в сколько-нибудь существенной степени обогащена ^{18}O по сравнению с земной атмосферой (вероятнее всего, что подобное обогащение не превосходит 3%). Аналогичная ситуация имеет место в отношении ^{13}C . Однако отношение концентраций $^{15}N/^{14}N = 0,0064 \pm 0,001$ тогда как в условиях земной атмосферы это отношение равно 0,00368.

Отсюда вытекает, что марсианская атмосфера обогащена изотопом ^{15}N по сравнению с земной примерно на 75%. По-видимому, это обогащение обусловлено повышенной диссипацией атомов ^{14}N из верхней атмосферы Марса. Оценка коэффициента диффузии с учетом такого предположения дала значение 10^8 см²/с, согласующееся с полученными ранее результатами. Следует считать вероятным, что содержание молекулярного азота в марсианской атмосфере в геологическом прошлом было значительно более высоким, обеспечивая парциальное давление не менее 2 мбар.

Аналогичный анализ, относящийся к изотопам кислорода, привел к выводу о необходимости существования очень мощного источника кислорода. Обогащение изотопом ^{18}O , составляющее менее 3%, требует обмена углекислым газом или водяным паром между подповерхностным резервуаром и атмосферой, который предполагает содержание этих газовых компонентов, эквивалентное давлению не менее 2 бар.

При помощи масс-спектрометра, установленного на СА «Викинг-1» и предназначавшегося (в сочетании с газовым хроматографом) прежде всего для определения состава органических компонентов почвы, Оуэн и Биманн [90] выполнили анализ химического состава атмосферы. В течение четвертых и пятых суток после посадки сделано шесть серий измерений через интервалы времени около 6 часов. Первые четыре серии выполнены после удаления CO и CO_2 (CO_2^+ как продукт этих компонентов затрудняет анализ на молекулярный азот), а остальные две серии — с

непосредственными пробами воздуха. В табл. 7 представлены осредненные по пяти сериям результаты измерений (третья серия оказалась неудачной).

Таблица 7

Предварительные данные о составе атмосферы у поверхности Марса

Компонент	Содержание, %
Углекислый газ	95
Кислород	0,1-0,4
Азот	2-3
Аргон	1-2
Отношение $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	1:2752 ±500

Отсюда видно, что измеренное содержание азота согласуется с полученной ранее оценкой и данными измерений во время спуска СА. Концентрация аргона значительно превышает обнаруженную по данным АМС «Марс-6», не согласуется с результатами измерений во время спуска. Содержание ^{36}Ar оказалось примерно в 10 раз меньшим, чем в земных условиях. Окись углерода не была обнаружена, ввиду ее малой концентрации, находящейся за пределом чувствительности масс-спектрометра. По данным для пиков масс при 44, 45 и 46 обнаружены концентрации ^{13}C и ^{18}O , оказавшиеся близкими к земным значениям.

Установленный на спускаемом аппарате АМС «Викинг-1» рентгеновский флуоресцентный спектрометр, который был предназначен для элементного анализа марсианского грунта, использовался также с целью измерений содержания некоторых газовых компонентов атмосферы [28]. Особое внимание привлекала задача определения концентрации аргона. Измерения привели к выводу, что парциальное давление аргона не превосходит 0,15 мбар (доверительный уровень составляет 95%). Если учесть, что атмосферное давление в точке посадки составляло 7,7 мбар, это приводит к относительной объемной концентрации аргона, составляющей 2%, что хорошо согласуется с данными масс-спектрометрических измерений на СА. По-видимому, аргон имеет преимущественно радиогенное происхождение, являясь продуктом распада ^{40}K . В связи с этим важное значение имеет определение содержания калия в марсианском грунте.

В течение августа 1976 г. при помощи масс-спектрометра, установленного на СА «Викинг-1», продолжались измерения относительного содержания изотопов аргона, углерода, кислорода и азота, а также предприняты поиски других малых компонентов, особенно благородных газов [18]. Производились анализы как непосредственно взятых, так и обогащенных (путем удаления CO и CO_2) проб атмосферы, что позволяло повысить относительную концентрацию малых компонентов в 8,5 раза.

Таблица 8

Изотопные отношения в марсианской и земной атмосферах

Компонент	Марс	Земля
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	0,0064-0,0050	0,00363
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	0,0118±0,0012	0,0112
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	0,00189±0,0002	0,00204
$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	4-7	5,3

В табл. 8 представлены результаты измерений изотопных отношений в сопоставлении с данными для земной атмосферы, свидетельствующие о более высокой концентрации ^{15}N в марсианской

атмосфере по сравнению с земной (эти результаты могут быть, однако, недостаточно точны, ввиду возможного влияния десорбции ^{13}CO в приборе). Недостаточно надежны и данные по аргону, которые следует рассматривать лишь как обнаружившие изотопное отношение, близкое к земному. Попытка обнаружения метана, неона, криптона и ксенона не дала положительного результата.

Измерения на СА «Викинг-2» с обогащением образцов воздуха в 10 раз позволили определить содержание криптона и ксенона, выявив, что криптон присутствует в больших количествах, чем ксенон [92]. Относительное содержание различных изотопов криптона близко соответствует земным значениям, но отношение концентрации ксенона-129 и ксенона-132 оказалось более высоким, чем в земной атмосфере.

Полученные результаты позволяют считать мало вероятным, что Марс мог иметь в прошлом массивную первоначальную атмосферу, которая была затем постепенно «сдута» солнечным ветром, так как в противном случае отношение концентраций ^{36}Ar и криптона должно быть гораздо меньшим, чем в земной атмосфере, поскольку «сдувание» аргона более эффективно, чем криптона. Обнаруженная в атмосфере Марса низкая концентрация аргона свидетельствует об одной из следующих возможностей: 1) на Марсе в период его формирования имело место пониженное содержание летучих компонентов (это, однако, мало вероятно, ввиду близости планеты к Солнцу); 2) значительная часть первоначальной атмосферы планеты подвергалась «сдуванию» солнечным ветром, в процессе которого происходило изменение состава атмосферы; 3) на Марсе не было такой интенсивной дегазации твердой оболочки планеты, как на Земле. Последняя возможность является наиболее вероятной.

Важное значение имеет факт преобладания криптона над ксеноном в марсианской атмосфере (аналогичная ситуация наблюдается в земной атмосфере), тогда как обратное справедливо для состава протопланетной газовой компоненты обычных или карбонатных хондритов. В связи с этим можно предположить, что на Марсе происходил подобный земному процесс преимущественной адсорбции ксенона, выделившегося при дегазации осадочными породами. Возможно, что подобный процесс имел место на Марсе в периоды флювиальной эрозии. Альтернативное (или дополнительное) предположение состоит в том, что ксенон был поглощен реголитом.

Низкая концентрация аргона свидетельствует о необходимости внести поправки в оценки концентрации других летучих компонентов, основанные на предположении о высоком содержании аргона. Однако малое по сравнению с земным отношение концентрации изотопов аргона указывает, по-видимому, на большую сложность процессов дегазации на Марсе, чем это предполагается по аналогии с Землей.

Можно считать, что Марс и Земля имеют, в целом, сходный состав и поэтому продукция газов осуществляется в одинаковых пропорциях, но дегазация и выветривание были на Марсе гораздо менее полными. Значительная часть летучих компонентов могла быть захвачена слоями вечной мерзлоты (H_2O), полярными шапками (H_2O , CO_2), химически связана в грунте (нитраты, окислы, карбонаты) или диссипировала. Если принять такую гипотезу, то из нее вытекает, что масса марсианской атмосферы в прошлом не могла превышать современную более, чем в 10 раз, т. е. давление у поверхности не превосходило 100 мбар. Существование огромных количеств «погребенных» CO_2 и H_2O допускает, однако, возможность циклических или эпизодических вариаций климата, которые могли обусловить появление флювиальных структур рельефа.

7. Структурные параметры

Измерения на участке входа СА в марсианскую атмосферу позволили получить сведения о вертикальных профилях структурных параметров [98]. Вход СА «Викинг-2» (САВ-2) в атмосферу Марса произошел 3 сентября 1976 г. около 15 ч 49 м по тихоокеанскому дневному времени, что соответствует местному утру. Структура марсианской атмосферы утром на высотах до 100 км, определенная по данным акселерометрических (на высотах более 25 км) и прямых (парашютный спуск) измерений во время входа СА в атмосферу, характеризуется наличием почти изотермического слоя 1,5—4 км вблизи поверхности планеты с вертикальным градиентом температуры не более 1,3 К/км на высотах, превосходящих 2,5 км. Вертикальный градиент температуры в слое 5—19 км ниже

адиабатического и равен $1,8 \text{ K/км}$, а в вышележащей толще атмосферы наблюдается волнообразный ход температуры.

Различие по сравнению с данными САВ-1, согласно которым вертикальный градиент температуры составляет $3,7 \text{ K/км}$, обусловлено влиянием суточного хода (данные САВ-1 относятся к послеполуденному времени). Атмосферное давление у поверхности оказалось примерно на 10% выше ($7,75 \text{ мбар}$) зарегистрированного в тот же момент времени в точке посадки СА «Викинг-1» ($6,98 \text{ мбар}$). Это определяется тем фактом, что САВ-2 совершил посадку в точке, находящейся на уровне, который на $2,7 \text{ км}$ ниже отсчетного уровня марсианского эллипсоида (уровня $6,1 \text{ мбар}$ поверхности) и примерно на $0,96\text{—}1,20 \text{ км}$ ниже уровня САВ-1. Плотность воздуха у поверхности равна $0,0180 \text{ кг/м}^3$. Полученный вертикальный профиль температуры на высотах до 100 км согласуется (по крайней мере, качественно) с данными, найденными ранее на основе использования модели тепловых приливов.

Для изменения температуры с высотой характерен волнообразный характер при амплитуде волны, возрастающей примерно до 25 K на высоте 90 км . Вертикальные длины волн (расстояния между экстремумами) варьируют в пределах $17\text{—}23 \text{ км}$ (теоретические расчеты приводят к значениям, равным $22\text{—}24 \text{ км}$). По-видимому, подобные волны являются следствием слоистой структуры вертикальных осцилляции и связаны с нагреванием и охлаждением, обусловленными сжатием и расширением (требуемый коэффициент сжатия на высотах меньше 80 км должен варьировать в пределах $0,80\text{—}1,26$). Последние определяются влиянием суточного хода температуры поверхности планеты.

Как это необходимо для распространения гравитационных волн, атмосфера устойчива к конвекции, за исключением, возможно, некоторых участков планеты. В обеих точках посадки СА температура атмосферы везде существенно выше уровня конденсации углекислого газа, что исключает возможность формирования дымки из сухого льда летом в северном полушарии по крайней мере до 50° с. ш. Следует, таким образом, считать, что наблюдаемый на этих широтах приповерхностный туман состоит из конденсата водяного пара.

По данным масс-спектрометрических измерений плотности углекислого газа во время снижения СА «Викинг-1, -2» (САВ-1 и САВ-2) в работе [75] рассчитаны вертикальные профили температуры на высотах $120\text{—}200 \text{ км}$. Расчеты сделаны на основе барометрической формулы с применением итерационной схемы, предусматривающей послойное определение температуры, начиная с уровня верхней границы, где атмосфера первоначально предполагается изотермической в пределах интервала высот, охватываемого первыми двумя точками измерений. Вертикальные профили температуры восстановлены независимо по ионным пикам, соответствующим массовым числам 44, 22 и 12, что позволяет оценить точность определения температуры.

В обоих случаях (САВ-1 и САВ-2) вертикальные профили температуры имеют волнообразную структуру на высотах более 30 км (для сравнения использованы данные, относящиеся к высотам $0\text{—}100 \text{ км}$), причем амплитуда волны возрастает с высотой в слое $50\text{—}120 \text{ км}$. В нескольких интервалах высот вертикальный градиент температуры близок к адиабатическому. В случае данных САВ-1 волновая структура профиля температуры может быть обусловлена влиянием суточного прилива. Амплитуда волны меньше в районе снижения САВ-2, что, вероятно, связано с более высокой широтой этого района.

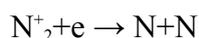
Полученные значения температуры термосферы Марса значительно ниже ($<200 \text{ K}$), чем найденные ранее по данным измерений УФ свечения атмосферы с АМС «Маринер-6, -7, -9». Это можно объяснить как влиянием расстояния до Солнца (измерения на САВ сделаны в период, когда Марс был близок к апогею при расстоянии около $1,64 \text{ а. е.}$, тогда как АМС «Маринер» функционировали при положении планеты, близком к перигелию при расстоянии около $1,43 \text{ а. е.}$), так и различиями потока энергии, переносимого приливами из нижней атмосферы в верхнюю.

Данные САВ-2 обнаруживают неожиданное возрастание температуры выше 170 км , достоверность которого требует тщательной проверки. Сравнение вычисленных по барометрической формуле вертикальных профилей концентрации аргона и азота с измеренными позволило оценить коэффициент турбулентного перемешивания на различных высотах, варьирующий от $2,1\text{—}5,0 \times 10^7 \text{ см}^2/\text{с}$ на уровне 100 км до $1,2\text{—}4,2 \times 10^9 \text{ см}^2/\text{с}$ на высоте 170 км . Модельные расчеты вертикальных профилей концентрации CO , NO и O_2 обнаружили хорошее согласие с результатами измерений.

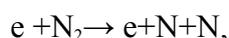
В работе [75] построена модель марсианской ионосферы, соответствующая данным САВ-2. Анализ рассматриваемых данных привел к выводу, что отношения смеси азота, аргона и кислорода в основной толще атмосферы равны $2,4 \cdot 10^{-2}$; $1,5 \cdot 10^{-2}$ и $1,6 \cdot 10^{-3}$, соответственно. Верхняя атмосфера обогащена окисью углерода и азота по сравнению с нижней, где отношения смеси этих компонент составляют около $8 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-8} — 10^{-9} .

8. Эволюция атмосферы

Хотя содержание азота в современной атмосфере Марса составляет около 2,5%, обнаружение того факта, что марсианская атмосфера обогащена тяжелым изотопом азота ^{15}N примерно на 75% по сравнению с земной атмосферой, побудило Макэлроя и др. [74] предположить, что за последние 4,5 млрд. лет Марс потерял значительное количество молекулярного азота в результате диссипации. По-видимому, главным механизмом диссипации являлась продукция быстрых атомов азота реакциями диссоциативной рекомбинации



и диссипации электронным ударом



причем в обоих случаях продуцируются преимущественно $\text{N}(^4\text{S})$ и $\text{N}(^2\text{D})$.

Если принять ионную и электронную температуры марсианской атмосферы равными 400 К, то средняя скорость атомов, продуцируемых первой из упомянутых реакций, составит 4,96 км/с. Скорость, необходимая для диссипации с уровня 210 км (высота экзобазы), равна 4,68 км/с. Учет длительной диссипации атомов азота приводит к выводу, что парциальное давление молекулярного азота в геологическом прошлом должно было составлять не менее нескольких миллибар и могло достигать 30 мбар, если принять во внимание возможность функционирования марсианского грунта как стока для атмосферных HNO_2 и HNO_3 .

Полученная ранее оценка суммарного выделения водяного пара на Марсе за счет дегазации твердой оболочки, найденная по данным о диссипации водорода, который является продуктом фотодиссоциации водяного пара, привела к значению порядка 10^2 г/см². Аналогичные вычисления для углекислого газа дали 60 ± 20 г/см². За последние годы были высказаны предположения, что марсианский реголит и северная полярная шапка могут оказаться гигантскими стоками водяного пара и углекислого газа. Расчеты показывают, что реголит мог адсорбировать до 10^3 г/см² водяного пара и может содержать до 400 г/см² углекислого газа, а в северной полярной шапке может быть «погребено» до 10^3 г/см² CO_2 . Все эти оценки указывают на то, что поверхностные слои твердой оболочки Марса могут содержать больше водяного пара и углекислого газа, чем выделилось в результате дегазации за всю историю планеты [34].

С учетом данных о высоком (28%) содержании аргона в марсианской атмосфере Леови [63] показал, что дегазация водяного пара и углекислого газа на протяжении эволюции Марса была на два порядка величины более интенсивной, чем предполагалось ранее. Если принять относящиеся к Земле значения отношений дегазации для различных компонентов, то оказывается, что на протяжении истории Марса в процессе дегазации выделилось около 10^5 г/см² водяного пара (эта величина примерно в 10^8 раз превосходит современное содержание водяного пара в атмосфере Марса), 10^4 г/см² углекислого газа (это в 10^3 раз превосходит современное содержание) и 450 г/см² азота.

Возможно, что основная часть азота, выделившегося в процессе дегазации, оказалась затем химически связанной в марсианском реголите. Следует предполагать, что реголит содержит большое количество таких летучих компонент как водяной пар, углекислый газ, водород, нитраты, нитриты или нитриды. Таблица 9 характеризует предполагаемую модель содержания водяного пара и углекислого газа на Марсе, составленную Левиным [63] по данным различных авторов.

На основе анализа состава летучих компонент земной коры, метеоритов, а также состава атмосферы Венеры, Луны и Земли Оуэн [91] получил оценки состава продуктов дегазации твердой оболочки Марса. Обнаружение по данным АМС «Марс-6» большого количества аргона в марсианской атмосфере допускает три вероятных интерпретации. Первая состоит в предположении, что на Марсе имел место такой же уровень дегазации твердой оболочки, что и на Земле. Поэтому

возможен один из вариантов сильной дегазации, которому соответствуют большие количества «погребенных» или исчезнувших углекислого газа, водяного пара и азота.

Таблица 9

Предполагаемое содержание водяного пара и углекислого газа на Марсе

	Водяной пар, г/см ²	Углекислый газ, г/см ²
В атмосфере	$\approx 10^{-3}$	13
В реголите:		
а) адсорбировано	10^3	$4 \cdot 10^2$
б) химически связано	$1-3 \cdot 10^3$?
в) глобальные линзы льда	$3 \cdot 10^4$	-
г) геотит и глины	$4 \cdot 10^4$	-
д) «химическое выветривание»	10^2-10^5	$10-10^4$
В северной полярной шапке	?	$2,7 \cdot 10^3$
Предшествующие оценки дегазации	10^2-10^3	60 ± 20
Новые оценки дегазации	$2,4 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^4$

Другая интерпретация состоит в том, что на Марсе произошла дегазация, подобная лунной, и за ранней потерей летучих компонентов последовало постепенное высвобождение радиогенных газов. В таком случае общее содержание ⁴⁰Ar не может служить надежным индикатором общего содержания летучих компонентов, поскольку химически активные газы могли иметь другое происхождение и историю.

Третья интерпретация исходит из некорректности данных «Марса-6» и предположения, что действительное содержание аргона в атмосфере Марса значительно меньше. Все это свидетельствует о крайней неполноте существующих представлений об эволюции марсианской атмосферы и необходимости дальнейших исследований содержания инертных газов. Противоречивые данные АМС «Марс-6» и «Викинг-1, -2» являются наглядным подтверждением этого вывода.

В связи с проблемой эволюции атмосферы Марса Хюгенин [49] привлек внимание к тому, что происходящая на Марсе окислительная эрозия, которая стимулируется фотодиссоциацией, необратимо удаляет из атмосферы кислород и водород со скоростью от 10^8 до 10^{11} молекул/(см²·с), что соответствует суммарной потере водяного пара от 10^{25} до 10^{28} молекул/см² (10^2 — 10^5 г/см²), если предполагать неизменность скорости этого процесса в геологическом прошлом. Дополнительное количество H₂O удаляется в результате гидратации Fe₂O₃ и глинистых минералов, но эти потери обратимы. Углекислый газ необратимо удаляется из атмосферы при образовании CaCO₃ со скоростью 10^7 — 10^{10} молекул/(см²·с), что эквивалентно суммарной потере 10^{24} — 10^{27} молекул/см² (10 — 10^4 г/см²).

Ранее предполагалось, что основным стоком для летучих компонентов является диссипация через атмосферу, обуславливающая потери всего лишь 10^2 г/см² водяного пара и 10^0 г/см² углекислого газа за период геологического прошлого планеты. Недавнее обнаружение по данным СА «Марс-6» значительного количества аргона в атмосфере Марса допускает возможность того, что потери водяного пара и углекислого газа могли достичь 10^5 и 10^4 г/см² соответственно. Если количество водяного пара и углекислого газа, удаляемые за счет стимулируемой фотодиссоциацией окислительной эрозии, близки к упомянутым верхним пределам, возможно, что химическая эрозия оказывала главное влияние как фактор, ограничивающий поступление водяного пара и углекислого газа при аккумуляции их реголитом и полярными шапками.

В рамках научной программы АМС «Викинг» предприняты четыре вида измерений, имеющих важное значение с точки зрения решения остающейся открытой проблемы баланса летучих компонент на Марсе [33]. Это измерения температуры в зонах полярных шапок, содержания водяного пара, атмосферного давления и масс-спектрометрические измерения концентрации различных изотопов. Согласно имеющимся данным температура в зонах полярных шапок слишком высока, чтобы существовала возможность постоянного наличия твердой углекислоты. В связи с этим

было показано, что допустимо наличие постоянных полярных шапок из льдообразного соединения — водного клатрата углекислоты $\text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, вариации содержания которого могут регулировать атмосферное давление.

Если с орбитальных аппаратов АМС «Викинг» удастся осуществить регистрацию температуры полярных зон в течение целого марсианского года, это откроет возможность решить вопрос о том, состоят ли полярные шапки из клатрата, чисто льда или чистой твердой углекислоты. Для решения этой задачи важны также данные о содержании водяного пара в атмосфере.

Поскольку ранее были высказаны соображения о возможности объяснения наблюдаемых вариаций давления как обусловленных изменениями количества углекислого газа, адсорбированного реголитом, существенную роль должны сыграть измерения давления с орбитальных и спускаемых аппаратов. Масс-спектрометры, установленные на СА, позволят определить изотопный состав атмосферы, почвы и, возможно, отложений инея на поверхности. Если действительно существует резервуар связанного углекислого газа (адсорбция его реголитом), следует ожидать пониженного содержания изотопов ^{13}C , ^{18}O и ^2H в атмосферном водяном паре и углекислом газе.

9. Метеорологические наблюдения

В работах [41—46] описана программа метеорологических измерений, которая была реализована на спускаемых аппаратах АМС «Викинг» и включала измерения температуры воздуха, скорости ветра и атмосферного давления. Скорость и направление ветра измерялись при помощи термоанемометра с двумя ортогонально расположенными в горизонтальной плоскости пленочными датчиками. Для дублирования и однозначности определения направления ветра использовалась также система четырех термопар, расположенных по углам квадрата. Температура воздуха измерялась при помощи нескольких термопар, показания которых привязывались к показаниям контрольной термопары, находящейся внутри корпуса СА.

Все датчики ветра и температуры установлены в конце выдвижной стрелы на расстоянии не меньше 0,61 м от корпуса СА и на высоте 1,6 м над марсианской поверхностью (см. рис. 12). Испытания в аэродинамической трубе показали, что точность измерений скорости ветра более 2 м/с должна быть не хуже $\pm 15\%$, направления ветра $+10^\circ$ и температуры $\pm 1,5^\circ\text{C}$. Влияние корпуса СА может несколько сказываться лишь на определении ветра при азимутах 260° и 340° (по отношению к направлению на север). Для измерений атмосферного давления использовался датчик, расположенный внутри корпуса СА и обеспечивающий точность около 0,07 мбар.

Измерения в точке посадки (район Chryse: $22,48^\circ$ с. ш., $48,0^\circ$ з. д.) начались через 2 ч после посадки СА. В работе [42] рассмотрены данные за несколько первых марсианских суток (24,660 ч), полученные через интервалы времени, равные 1 ч 27 мин за периоды регистрации длиной 11 мин, в пределах которых показания осреднялись за 4 или 8 с.

Анализ данных за первые 4 сола выявляет очень хорошую воспроизводимость данных от суток к суткам, что следовало ожидать, поскольку данные наблюдений относятся к лету в субтропиках, где, в условиях тонкой марсианской атмосферы, процессы определяются регулярным суточным ходом радиационного баланса подстилающей поверхности. Поэтому различия температуры от суток к суткам (в фиксированный момент времени) не превосходят нескольких десятых Кельвина.

Анализ результатов измерений суточного хода температуры воздуха, атмосферного давления, скорости и направления ветра по данным для первых суток функционирования аппаратуры (рис. 14) обнаружил неожиданно высокую повторяемость условий ветра: преобладает слабый восточный ветер в позднее послеполуденное время при скорости ветра, уменьшающейся до нуля к полуночи. Ночью доминирует ветер с юго-запада с регулярными осцилляциями скорости и направления. Повидимому, эти особенности ветрового режима определяются влиянием крупномасштабной топографии: СА находится на пологом склоне, наклоненном к северо-востоку, к юго-западу от центра обширной круговой депрессии диаметром около 300 км и глубиной 3 км. Юго-западный ветер ночью определяется радиационным выхолаживанием поверхности и происходящим при этом стоком воздуха по склону. Осцилляции направления ветра с периодом около 4 ч обусловлены, вероятно, влиянием крупномасштабных гравитационных волн. Возможно, что суточные колебания ветра и атмосферного давления являются следствием суточной перемещающейся волны

планетарного масштаба, обусловленной перемещающимся суточным циклом нагревания и связанными с этим атмосферными приливами.

Сопоставление данных прямых измерений температуры воздуха на высоте 1,6 м со спускаемого аппарата и дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности со спутника (рис. 15) выявляет близкое соответствие перед восходом Солнца, но наличие сильного контраста температур «подстилающая поверхность—воздух» (до 25°C) днем, что аналогично условиям земных пустынь, свидетельствует об интенсивной конвекции в дневное время.

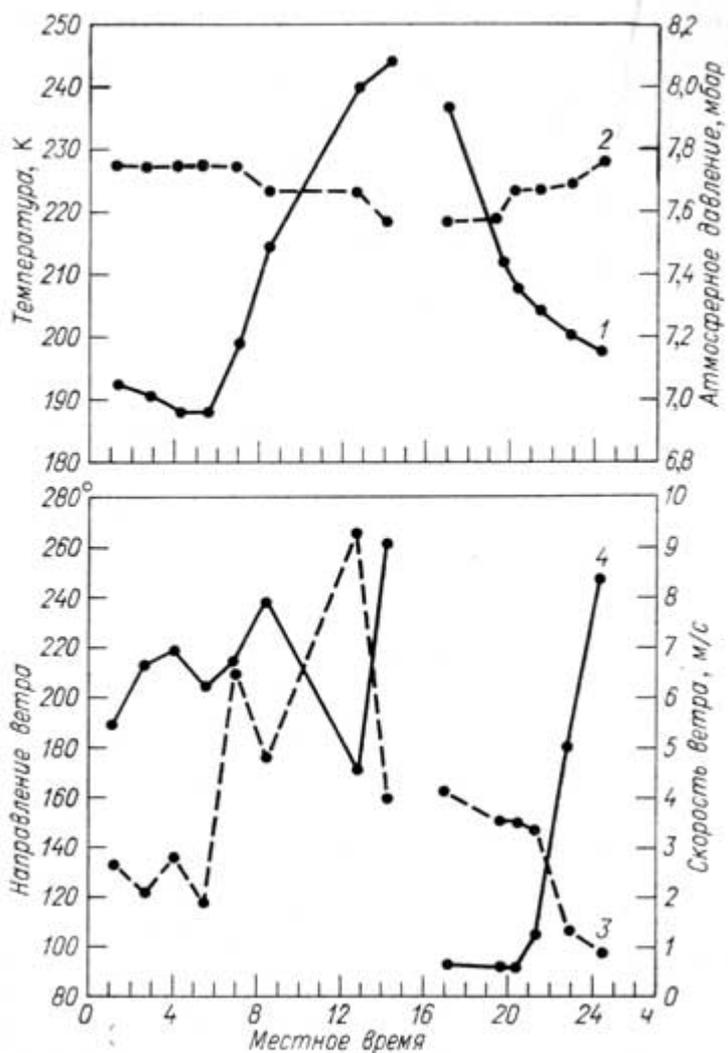


Рис. 14. Суточный ход температуры (1), атмосферного давления (2), скорости (3) и направления (4) ветра по данным измерений со спускаемого аппарата «Викинг-1» в течение первого сола (марсианских суток) функционирования СА после посадки 20 июля 1976 г.

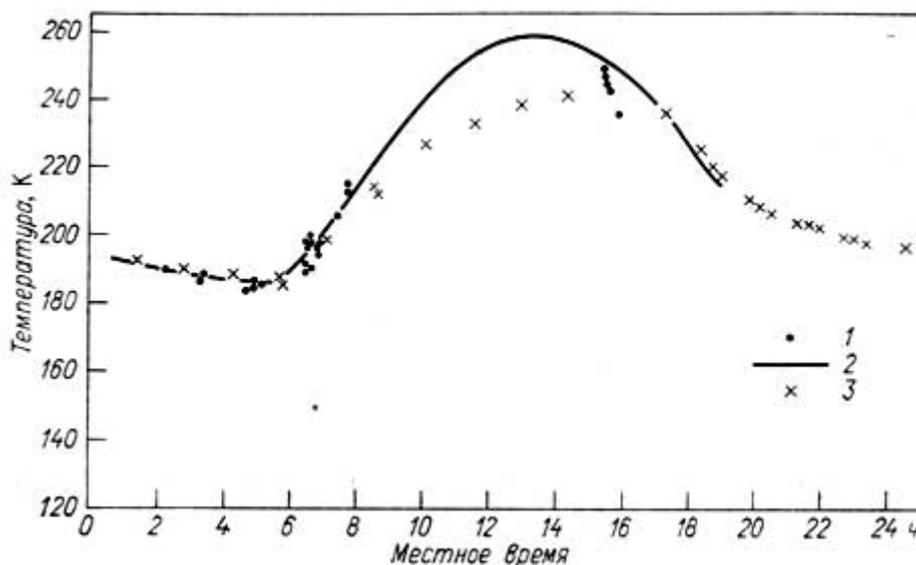


Рис. 15. Суточный ход температуры воздуха у поверхности Марса по данным

прямых измерений со спускаемого аппарата за первые три сола (3), температуры поверхности по данным дистанционных измерений с ИСМ (1) и теоретического моделирования (2).

Показателем конвекции являются также данные о коротко-периодической изменчивости температуры и ветра. Минимум температуры имеет место вскоре после восхода Солнца (5 ч 24 мин местного времени) при среднем значении (за трое суток), равном 188 К. Перерыв в работе линии связи не позволил точно определить момент максимума температуры. Интерполяция привела к выводу, что он имел место примерно в 15 ч 30 мин при среднем значении 244 К. Измерения давления выявили суточный ход с амплитудой около 0,2 мбар. Минимум давления наблюдается примерно через 4 ч после полудня, а максимум — через 4 ч после полуночи. Среднее давление за первые трое суток составило 7,65 мбар.

Сопоставление с изображениями поверхности привело к выводу о том, что эоловый рельеф не обусловлен наблюдаемым полем ветра и является, по-видимому, следствием предшествующей атмосферной циркуляции.

Выполненный позднее [43] анализ данных метеорологических наблюдений за первые 20 солов подтвердил сделанный ранее (по данным за трое марсианских суток) вывод о высокой повторяемости суточных ходов температуры, ветра и атмосферного давления. Это дало основание для осреднения всех полученных данных с целью характеристики климатических особенностей рассматриваемой точки в летнее время. За период 20 солов ареоцентрическая долгота Солнца изменилась в пределах 98-108° (долгота 90° соответствует летнему солнцестоянию в северном полушарии).

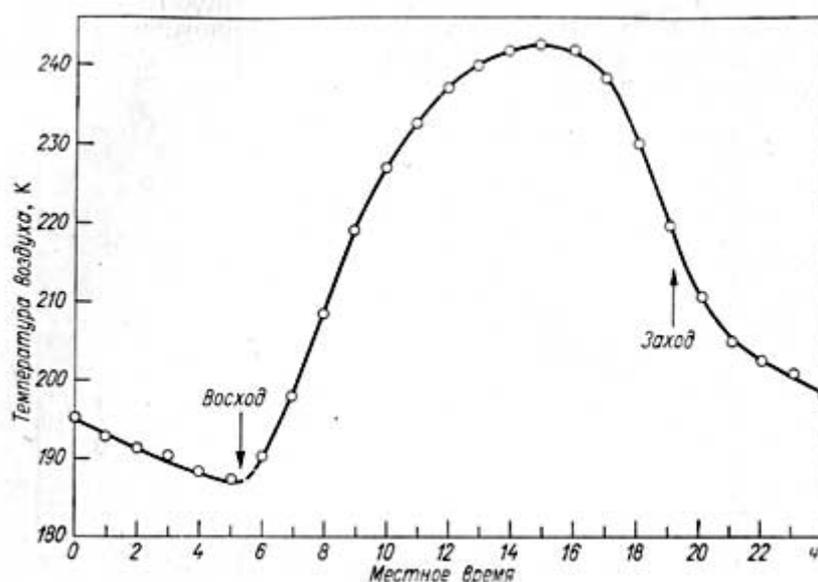


Рис. 16. Осредненный по данным СА «Викинга-1» за 20 марсианских суток суточный ход температуры воздуха.

Осредненный суточный ход температуры воздуха (рис. 16) характеризуется максимумом 241,8 К в 15 ч 00 мин местного времени и минимумом 187,2 К в 05 ч 00 мин (непосредственно перед восходом Солнца), что (с точки зрения вариаций, но не абсолютных значений) типично для условий земной пустыни (для сравнения Хесс с соавторами использовали данные для пустыни Мохаве в Калифорнии). Естественно, что амплитуда суточного хода температуры на Марсе значительно больше земной, поскольку гораздо большие вариации претерпевает температура подстилающей поверхности (это обусловлено малой плотностью марсианской атмосферы).

Подобными для Марса и земной пустыни являются отношения первой (суточной) и второй (полусуточной) гармоник суточного хода атмосферного давления, но вариации атмосферного давления на Марсе по отношению к среднесуточному значению в 5 раз больше, чем на Земле. Полусуточная волна в ходе давления обусловлена (как и в условиях земной пустыни) полусуточным солнечным приливом. Значительно более сложна природа суточной волны, определяемая взаимодействием нескольких факторов.

Для суточного хода скорости ветра (рис. 17) типично среднее значение 2,4 м/с при преобладании южного ветра и суточное вращение вектора скорости ветра против часовой стрелки (амплитуда суточного хода скорости ветра составляет около 5 м/с). Как уже отмечалось, преобладание южного ветра обусловлено влиянием крупномасштабной топографии.

В согласии с данными метеорологических измерений на СА «Викинг-1» аналогичные данные САВ-2 выявляют высокую степень повторяемости суточного хода температуры, ветра и атмосферного давления в период начала лета [45]. Средние максимальное и минимальное значения температуры равны 241 К и 191 К соответственно. Максимум температуры наблюдается примерно через 3 ч после полудня, а минимум — вблизи момента восхода Солнца.

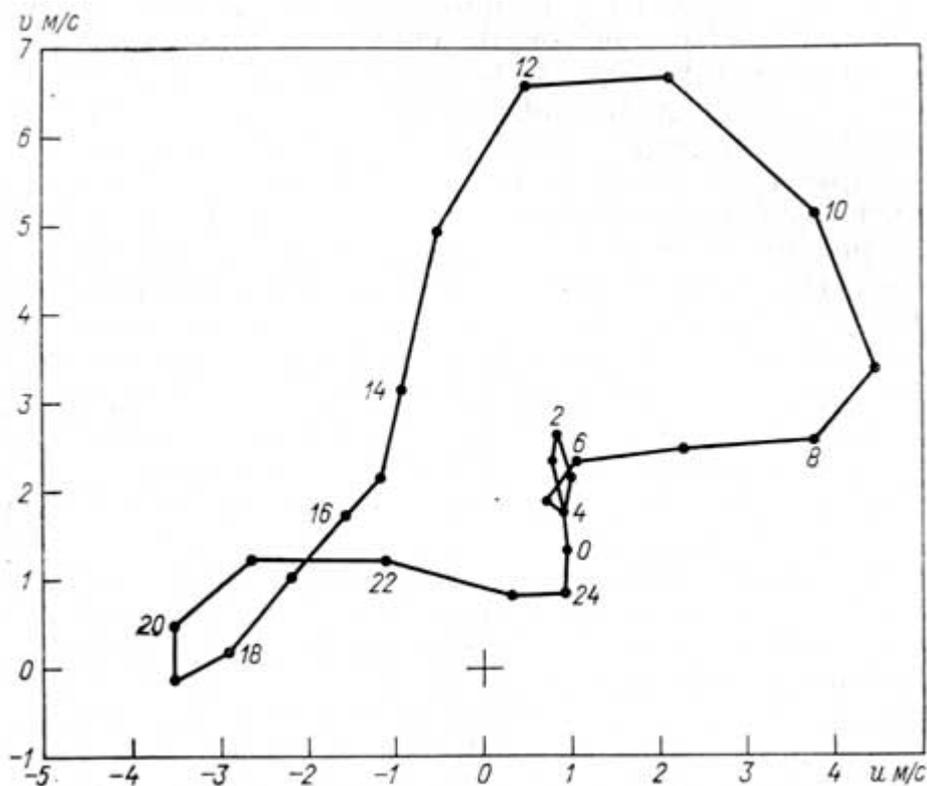


Рис. 17. Годограф вектора горизонтальной скорости ветра по данным СА «Викинга-1» за 20 марсианских суток.

Цифрами у годографа обозначены часы суток, отсчитываемые от полуночи, u , v — западная и южная компоненты ветра соответственно.

Средняя скорость ветра, направленного с юго-востока на северо-запад, равна 0,7 м/с при амплитуде суточного хода, составляющей 3 м/с. Суточный ход вектора скорости ветра характеризуется его вращением по часовой стрелке (в противоположность данным САВ-1 о вращении против часовой стрелки). Суточные вариации порывистости ветра в точках посадки САВ-1 и САВ-2 сходны. Порывистость наблюдается вскоре после восхода Солнца, усиливается по мере того, как приповерхностный слой становится конвективно неустойчивым, и сохраняется до послеполуденного времени. Максимальная скорость ветра во время порывов достигала 17 м/с.

Давление обнаруживает суточную и полусуточную периодичности, но их амплитуда значительно меньше, чем в случае САВ-1. На 37-м доле стали появляться заметные отклонения от высокой повторяемости суточного хода ветра. Как и в случае САВ-1, имеет место монотонный спад давления, обусловленный уменьшением содержания CO_2 в атмосфере под влиянием его конденсации в районе южной полярной шапки.

Спускаемый аппарат АМС «Викинг-2» доставил на поверхность Марса трехосный короткопериодический сейсмометр, который начал функционировать в 00 ч 53 м 01 с среднего Гринвичского времени 4 сентября 1976 г., вскоре после полудня по местному времени [14]. Первой задачей интерпретации данных сейсмометрических измерений является выявление

микросейсмических шумов и их природы. Если на Земле главными источниками фоновых шумов являются океаны и атмосфера, то в условиях Марса шумы содержат важную микрометеорологическую информацию, будучи обусловлены порывами ветра.

Наблюдения обнаружили высокую корреляцию между уровнем микросейсмических шумов и скоростью ветра, полученной по данным метеорологических измерений. Наиболее спокойным временем суток оказался интервал с 18 ч (2 ч до захода Солнца) до 04 ч (вскоре после восхода Солнца), в течение которого скорость ветра снижается до значений меньше 1-2 м/с. Вариации сейсмического сигнала отражают рост интенсивности порывов ветра в послеполуденное время. Вспышки шумов продолжительностью 1-3 мин происходят в это время с интервалами 10-50 мин. Хотя за первые 60 дней наблюдений не было обнаружено марсотрясений, было бы преждевременно делать определенные выводы о сейсмичности на Марсе, поскольку существующие там условия допускают проявление сейсмичности.

Выявленное измерениями атмосферного давления монотонное уменьшение среднесуточных значений на протяжении всего 20-суточного периода следует объяснить влиянием конденсации углекислого газа в зоне южной (зимней) полярной шапки. Сравнение измеренного понижения давления (0,0122 мбар/сут) с результатами расчетов для различных моделей привело к выводу, что модель, предполагающая адсорбцию углекислого газа марсианским реголитом (во всяком случае, за период сезона) неприемлема.

Предположение о влиянии конденсации углекислого газа в зоне зимней полярной шапки на монотонное уменьшение атмосферного давления у поверхности Марса подтверждается результатами расчетов [96, 97]. Было выполнено численное моделирование общей циркуляции атмосферы (ОЦА) на Марсе для периода функционирования спускаемых аппаратов АМС «Викинг». С этой целью применена трехуровневая модель ОЦА, разработанная Минцем и Аракавой. Предполагается, что неизменное давление на уровне тропопаузы в чисто углекислотной атмосфере Марса составляет 1 мбар, начальное среднее давление на уровне поверхности планеты равно 5,81 мбар, а температура изотермической атмосферы 200 К. Заданы среднее глобальное альbedo 0,24, альbedo поверхности при наличии инея и в зоне полярных шапок 0,6, тепловая инерция грунта 272 Вт/(м²·с^{1/2}·К), оптическая толщина облаков из льда 1 мкм и средний радиус частиц 2 мкм.

Расчеты глобальных полей атмосферного давления, температуры и геопотенциала сделаны для трех уровней $\sigma = (P - P_T)/(P_s - P_T) = 0,213; 0,603; 0,890$ (P_s, P_T — атмосферное давление на уровне поверхности и тропопаузы соответственно) для узлов сетки 5х6°. В рассматриваемый период (вторая половина лета северного полушария) происходит быстрое развитие южной полярной шапки, достигающей 45° ю. ш., которое сопровождается уменьшением массы атмосферы. В начале периода имеет место небольшое отступление северной полярной шапки, но оно полностью прекращается на 30-е сутки (статистическое равновесие ОЦА достигается через 15 сут).

Анализ полей давления, температуры и геопотенциала, полученных осреднением за 55-63 сут численного моделирования, показал, что расчетное поле ветра можно представить в виде суммы трех компонентов: зонально-симметричной, топографически обусловленной и суточной приливной. Оценки скорости ветра у поверхности в трех возможных точках посадки дали средние значения, варьирующие в пределах 20-25 м/с, но максимальные значения оказываются иногда в два раза превосходящими средние величины (более слабые ветры обнаружены в высоких широтах).

Если пренебречь влиянием адсорбции углекислого газа реголитом, то за первые два месяца функционирования АМС «Викинг» атмосферное давление у поверхности должно упасть на 0,8 мбар под влиянием аккумуляции CO₂ южной полярной шапкой (выделение CO₂, адсорбированного реголитом, может, вообще говоря, сглаживать эти вариации).

Наличие сильного меридионального градиента температуры в полосе 20-60° ю. ш. свидетельствует о том, что эта полоса представляет собой зону интенсивной бароклинной неустойчивости. Здесь наблюдается, с другой стороны, очень сильная статическая устойчивость. Под влиянием топографии в поле ветра формируется отчетливая компонента в виде стоячих волн. Построение годографов вектора скорости ветра в возможных точках посадки СА выявило лишь небольшое изменение скорости и направления ветра в течение суток. По-видимому, эта изменчивость недооценена, однако, примерно вдвое ввиду схематичности учета влияния атмосферных приливов.

Заключение

Погода и климат планеты в существенной степени определяются взаимодействием атмосферы с подстилающей поверхностью. Это взаимодействие выражается в обмене количеством движения, теплом, а также в газовом и радиационном обмене. Основными механизмами такого обмена являются диффузия (молекулярная и турбулентная), конвекция и перенос излучения. В настоящее время дело обстоит так, что именно эти процессы в марсианской атмосфере наименее известны. Естественно поэтому, что перспективы исследований в области марсианской метеорологии должны быть прежде всего связаны с изучением динамики и переноса излучения в пограничном слое атмосферы на основе анализа постепенно накапливающихся данных наблюдений и теоретических исследований. Особое внимание привлекают проблема малых газовых и аэрозольной компонент марсианской атмосферы, дальнейшие исследования динамики полярных шапок и ее влияния на общую циркуляцию атмосферы, выявление вклада атмосферных приливов в развитие погодообразующих процессов. Несмотря на значительный прогресс в изучении природы глобальных пыльных бурь, причины этого явления остаются недостаточно определенно выявленными. Несомненно актуальны дальнейшие прямые измерения состава и свойств марсианского грунта, что является единственным надежным путем для решения проблемы жизни на Марсе.

Как и следовало ожидать, успех миссий АМС «Викинг-1, -2» определил не только значительное расширение наших знаний о планете, но и оставил много неясных вопросов. Упомянутые выше проблемы являются лишь отдельными примерами нерешенных аспектов изучения Марса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аксенов С. И. и др. Марс как среда обитания.— Проблемы космической биологии, М., «Наука», 1976, т. 32, 232 с.
- 2 Вдовин В. В. Расчет тепловой динамики поверхности Марса.— «Космич. исслед.», 1977, т. 15, вып. 2, с. 238-247.
3. Изakov М. Н. Структура и динамика верхних атмосфер Венеры и Марса. — «Успехи физ. наук», 1976, т. 119, № 2, с. 295-342.
4. Изakov М. Н., Морозов С. К. Структура и динамика экваториальной термосферы Марса. — «Космич. исслед.», 1976 т. 14, вып. 3, с. 476-478.
5. Истомин В. Г. и др. Эксперимент по измерению состава атмосферы на спускаемом аппарате космической станции «Марс-6». — «Космич. исслед.», 1975, т. 13, № 1, с. 16-20.
6. Козырев Н. А. Спектральные признаки существования снега и льда в атмосфере Марса.— «Изв. Гл. астрон. обе», 1964, т. 23, вып. 5, № 175, с. 72-74.
7. Кондратьев К. Я., Бунакова А. М. Метеорология Марса.— Л. Гидрометеоздат, 1973. 62 с.
8. Кондратьев К. Я. Сравнительная метеорология планет.— Л. Гидрометеоздат, 1975. 48 с.
9. Кондратьев К. Я. Метеорология планет. Л., Изд. ЛГУ, 1977. 236 с.
10. Кондратьев К. Я., Москаленко Н. И. Тепловое излучение планет. Л., Гидрометеоздат. 1977. 263 с.
11. Краснопольский В. А., Крысько А. А., Рогачев В. Н. Ультрафиолетовая фотометрия Марса на спутнике «Марс-5».— «Космич. исслед.», 1977, т. 15, вып. 2, с. 255-260.
12. Сурков Ю. А., Федосеев Г. А. Аргон-40 в атмосфере Марса. — «Космич. исслед.», 1976, т. 14, вып. 4, с. 592-597.
13. Ajello J. M. et al. Mariner 9 ultraviolet spectrometer experiment: bright-limb observations of the lower atmosphere of Mars.— "J. Atmos. Sci.", 1976, vol. 33, N 3, p. 544-552.
14. Anderson D. L. et al. The Viking seismic experiment.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1318-1321.
15. Aronson J. R., Emslie A. G. Composition of the martian dust as derived by infrared spectroscopy from Mariner 9.— "J. Geophys. Res.", 1975, vol. 80, N 35, p. 4925-4931.
16. Baird A. K. et al. Minerologic and petrologic implications of Viking geochemical results from Mars: interim report.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1288-1293.
17. Biemann K. et al. Search for organic and volatile inorganic compounds in two surface samples from the Chryse Planitia region of Mars.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 72-76.
18. Biemann K. et al. The atmosphere of Mars near the surface: isotope ratios and upper limits on noble gases.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 76-78.

19. Bills B. G., Ferrari A. J. Mars topography harmonics and geophysical implications.— "Amer. Astron. Soc. Division Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstract of Papers", March 30-April 4, 1976, Austin, Texas, p. 31.
20. Breed C. S. Terrestrial analogs of the Hellespontos dunes, Mars.— "Icarus", 1977, vol. 30, N 2, p. 326-340.
21. Burk S. D. Diurnal winds near the martian polar caps.— "J. Atmos. Sci.", 1976, vol. 33, N 6, p. 923-939.
22. Capen C. F., Jr. Recent seasonal and secular variations of Martian albedo features and their photometry.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers", March 30— April 4, 1976, Austin, Texas, p. 32.
23. Capen C. F., Jr. Martian albedo feature variations with season: data of 1971 and 1973.— "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 213-230.
24. Capen Ch. F. Recent seasonal and secular variations of martian albedo and their photometry.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstr. of Papers", March 30-April 4, 1976, Austin, Texas, p. 32.
25. Carr M. H. et al. Preliminary results from the Viking orbiter imaging experiment.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 766-776.
26. Chamberlain T. E. et al. Atmospheric measurements on Mars: the Viking meteorology experiment — "Bull. Amer. Meteorol. Soc", 1976, vol. 57, N 9, p. 1094-1105.
27. Cintala M. J., Head J. W., Mutch T. A. Characteristics of fresh martian craters as a function of diameter: comparison with the Moon and Mercury.— "Geophys. Res. Lett.", 1976, vol. 3, N 3, p. 117-120.
28. Clark B. C et al. Argon content of the martian atmosphere at the Viking I landing site: analysis by X-ray fluorescence spectroscopy.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 804-805.
29. Clark B. C et al. Inorganic analysis of martian surface samples at the Viking I landing sites.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1283-1288.
30. Conrath B. J. Influence of planetary — scale topography on the diurnal thermal tide during the 1971 martian dust storm.— "J. Atmos. Sci.", 1976, vol. 33, N 12, p. 2430-2439.
31. Culls J. A., Blasius K. R., Farrll K. W. Mars: new data on Chryse basin landforms.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers", March 30 -April 4, 1976, Austin, Texas, p. 31.
32. Culls J. A. et al. North polar region of Mars: imaging results from Viking 2.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1329-1337.
33. Dobrovolskis A., Dzurisin D., Ingersoll A. P. What Viking can tell us about the Martian volatile budget?— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers", March 30-April 4, 1976, Austin, Texas, p. 32.
34. Fanale F. P. Martian volatiles: their degassing history and geochemical fate.— "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 179-202.
35. Farmer C. B., Davies D. W., La Porte D. D. Viking: Mars atmospheric water vapor mapping experiment — preliminary report.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 776-779.
36. Farmer C. B., Davies D. W., La Porte D. D. Mars: northern summer ice cap — water vapor observations from Viking 2.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1339-1341.
37. Farmer C. B. Liquid water on Mars.— "Icarus", 1976, vol. 28, No 2, p. 279-289.
38. Greeley R. et al. Mars: wind friction speeds for particle movement. — "Geophys. Res. Lett.", 1976, vol. 3, N 8, p. 417-420.
39. Hargraves R. B. et al. Viking magnetic properties investigation: further results.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1303-1309.
40. Hartmann W. K. Problems of martian paleoclimatology.— "Space Res. 15. Proc. Open Meet. Work. Groups Phys. Sci. 17th Meet. COSPAR, Sao Paulo, 1974". Berlin, 1975, p. 629-630.
41. Hess S. L. The vertical distribution of water vapor in the atmosphere of Mars.— "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 269-278.
42. Hess S. L. et al. Preliminary meteorological results on Mars from Viking 1 lander.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 788-791.
43. Hess S. L. et al. Mars climatology from Viking 1 after 20 sols. — "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 78-81.
44. Hess S. L. et al. Viking-1 meteorological measurements: first impressions.— "Bull. Amer. Meteorol. Soc", 1976, vol. 57, N 9, p. 1150-1151.
45. Hess S. L. et al. Early meteorological results from the Viking 2 lander.— "Science", 1976, vol. 194, No. 4271, p. 1352-1354.
46. Hess S. L., Mitchell J. L. Mirages on Mars.— "Icarus", 1977, vol. 30, N 1, p. 42-48.

47. Hide R. Motions in planetary atmospheres.— "Quart. J Roy. Met. Soc", 1976, vol. 102, N 431, p. 1-23.
48. Horowitz N. H., Hobby G. L., Hublard J. S. The Viking carbon assimilation experiments: interim report.—"Science", 1976 vol 194, N 4271, p. 1321-1332.
49. Huguenin R. L. Mars: chemical weathering as a massive volatile sink. — "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 203-212.
50. Huguenin R. L. Surface oxidation: a major sink for water on Mars. — "Science", 1976, vol. 192, N 4235, p. 138-140.
51. Hunt G. E. A new look to the Martian atmosphere.— "Proc. Roy. Soc", 1974, A, vol. 341, p. 317-313.
52. Hunt G. Physical observations after Viking lands.— "New Scientist", 1976, vol. 71, N 1007, p. 28-30.
53. Iversen J. D., Greeley R., Pollack J. B. Windblown dust on Earth, Mars and Venus.—"J. Atmos. ScL", 1976, vol. 33, N 12, p. 2425-2429.
54. Iversen J. D. et al. Saltation threshold on Mars: the effect of inter-particle force, surface roughness, and low atmospheric density.— "Icarus", 1976, vol. 29, N 3, p. 381-394.
- 54 a. Kattawar G. W., Young A. T. Planetary isophotes as a clue to aerosol characteristics.—"Icarus", 1977, vol. 30, N 2, p. 367-376.
55. Kerzhanovich V. V. Mars 6: improved analysis of the descent module-measurements.— "Icarus", 1977, vol. 30, N 1, p. 1-25.
56. Kieffer H. H. et al. Infrared thermal mapping of the martian surface and atmosphere: first results.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 780-785.
57. Kieffer H. H. et al. Martian North pole summer temperatures: dirty water ice.—"Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1341-1344.
58. Kieffer H. H. Soil and surface temperatures at the Viking landing sites.—"Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1344-1346.
59. Kieffer H. H. et al. Temperature of the martian surface and atmosphere: Viking observations of diurnal and geometric variations.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1346-1352.
60. Klein H. P. et al. The Viking biological investigation: preliminary results.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 99-105.
61. Lee B. G. Mission operations strategy for Viking.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 59-62.
62. Levin G. V., Straat P. A. Viking labeled released biology experiment: interim results.—"Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1322-1329.
63. Levine J. S. A new estimate of volatile outgassing on Mars.— "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 165-169.
64. Lumme K. On the surface brightness and geometric albedo of some martian areas.—"Icarus", 1976, vol. 29, N 1, p. 69-82.
65. Maegly W. J. Saltation and martian sandstorms.— "Revs. of Geophys. and Space Phys.", 1976, vol. 14, N 1, p. 135-147.
66. Malin M. C Age of martian channels.—"J. Geophys. Res.", 1976, vol. 81, N 26, p. 4825-4845.
67. Martin J. S., Young A. T. Viking to Mars. Profile of a space expedition.— "Aeronautics and Astronautics", November, 1976, p. 22-47.
68. Mass C, Sagan C A numerical circulation model with topography for the martian Southern hemisphere.— "J. Atmos. ScL", 1976, vol. 33, N 8, p. 1418-1430.
69. Masson P. Structure pattern analysis of the Noctis Labyrinthus-Valles Marineris regions of Mars.— "Icarus", 1977, vol. 30, N 1, p. 49-62.
70. Masursky H. Martian channels.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers" 30 March— 4 April 1976, Austin, Texas, p. 30.
71. Masursky H., Crabill N. L. The Viking landing sites: selection and certification.—"Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 809-812.
72. Masursky H., Crabill N. L. Search for the Viking-2 landing site. — "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 62-68.
73. McConnell J. C The atmospheres of Mars and Venus. A comparison. — "Atmos. Earth and Planets. Proc. Summer Adv. Study Inst. Univ. Liege, 1974", Dordrech-Boston, 1975, p. 761-767.
74. McElroy M. B., Young Y. L., Nier A. O. Isotopic composition of nitrogen: implications for the past history of Mars' atmosphere.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 70-72.
75. McElroy M. B. et al. Composition and structure of the martian upper atmosphere: analysis of results from Viking.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1295-1298.
76. McElroy M. B., Young Y. L. Oxygen isotopes in the Martian atmosphere: implications for the evolution of volatiles.— "Planet, and Space Sci.", 1976, vol. 24, N 12, p. 1107-1114.
77. Metz W. D. Viking (1): end of the first phase of 70's space spectacular.— "Science", 1976, vol. 194, N 4268, p. 819-820.

78. Michael W. H., Jr. et al. Viking lander location and spin axis of Mars: determination from radio tracking data. — "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 803.
79. Michael W. H., Jr. et al. Mars dynamics atmospheric and surface properties: determination from Viking tracking data.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1337-1339.
80. Moriyama S. Effects of dust on radiation transfer in the Martian atmosphere (III).— Numerical experiments of radiative-convective equilibrium of the Martian atmosphere including the radiative effects due to dust.— "J. Meteorol. Soc. Japan", 1976, ser. II, vol. 54, N 1, p. 52-58.
81. Moroz V. I. Argon in the Martian atmosphere: do the results of Mars 6 agree with the optical and radio occultation measurements?— "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 159-163.
82. Mutch T. A. et al. The surface of Mars: the view from the Viking 1 lander.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 791-800.
83. Mutch T. A. et al. Fine particles on Mars: observations with the Viking 1 lander cameras.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 87-91.
84. Mutch T. A. et al. The surface of Mars: the view from the Viking 2 lander.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1277-1283.
85. Neukum G., Wise D. U. Mars: a standard crater curve and possible new time scale.— "Science", 1976, vol. 194, N 4272, p. 1381-1386.
86. Nier A. O. et al. Composition and structure of the martian atmosphere: preliminary results from Viking 1.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 786-788.
87. Nier A. O., McElroy M. B., Yung Y. L. Isotopic composition of the martian atmosphere.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 68-70.
88. Nier A. O., McElroy M. B. Structure of the neutral upper atmosphere of Mars: results from Viking-1 and Viking-2.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1298-1300.
89. Ohring G. A technique to deduce atmospheric temperature and constituents profiles from a planet's limb radiance profile.— "Icarus", 1975, vol. 24, p. 388-394.
90. Owen T., Biemann K. Composition of the atmosphere at the surface of Mars: detection of Argon-36 and preliminary analysis.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 801-803.
91. Owen T. Volatile inventories on Mars.— "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 171-177.
92. Owen T. et al. The atmosphere of Mars: detection of krypton and xenon.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1288-1293.
93. Pang K., Ajello J. Mars' ultraviolet absorption band and compositional implications.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers." March 30-April 4, 1976, Austin, Texas, p. 32-33.
94. Pang K., Ajello J. M. Complex refractive index of martian dust: wavelength dependence and composition.— "Icarus", 1977, vol. 30, N 1, p. 63-74.
- 94a. Pleskot L. K., Kieffer H. H. The infrared photometric function of Mars and its bolometric albedo.— "Icarus", 1977, vol. 30, N 2, p. 341-359.
95. Pollack J. B. et al. Estimates of the wind speeds required for particle motion on Mars.— "Icarus", 1976, vol. 29, N 3, p. 395-418.
96. Pollack J. B. et al. Calculations of the general circulation of the mar-tian atmosphere for the season of the Viking lander mission.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers", March 30-April 4, 1976, Austin, Texas, p. 33.
97. Pollack J. B. et al. Winds on Mars during the Viking season: predictions based on a general circulation model with topography.— "Geophys. Res. Letters", 1976, vol. 3, N 8, p. 479-482.
98. Seiff A., Kirk D. B. Structure of Mars' atmosphere up to 100 kilometers from the entry measurements of Viking-2.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1300-1303.
99. Shorthill R. W. Physical properties of the martian surface from the Viking-1 lander: preliminary results.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 805-809.
100. Shorthill R. W. et al. The "soil" of Mars. (Viking-1).— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 91-97.
101. Shorthill R. W. et al. The environs of Viking lander 2.— "Science", 1976, vol. 194, N 4271, p. 1309-1318.
102. Soderblom L. A. Viking orbital colorimetric images of Mars: preliminary results.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 97-99.
103. Soffen G. A., Snyder C. W. The first Viking mission to Mars.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 759-766.
104. Soffen G. A. Status of the Viking mission.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 57-59.
105. Tobias O. Volatile inventories on Mars.— "Icarus", 1976, vol. 28, N 2, p. 171-177.
106. Toulmin P. III et al. Preliminary results from the Viking X-ray fluorescence experiment: the first sample from Chryse Planitia, Mars.— "Science", 1976, vol. 194, N 4260, p. 81-84.

107. Tyler G. L. et al. Radar characteristics of Viking 1 landing sites.— "Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 812-815.
108. White B. R. et al. Estimated grain saltation in a martian atmosphere.— "J. Geophys. Res.", 1976, vol. 81, N 32, p. 5643-5651.
109. Woiceshyn P. M., K Hore A. J. "Bora-type" density current winds as a triggering mechanism of the Great Martian Dust Storms.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers". March 30-April 4, 1976, Austin, Texas, p. 33.
110. Young A. T., Kattawar G. W. Planetary isophotes as a clue to aerosol characteristics.— "Amer. Astron. Soc. Division for Planetary Sciences. 7th Annual Meeting. Abstracts of Papers", March 30-April 4, 1976, Austin, Texas, p. 33.
111. Young L. D. G., Young A. T. Interpretation of high-resolution spectra of Mars. IV. New calculations of the CO abundance.— "Icarus", 1977, vol. 30, N 1, p. 75-79.
112. Yung Y. L. et al. Photochemistry of nitrogen in the martian atmosphere. -"Icarus", 1977, vol. 30, N 1, p. 26-41.
113. Zurek R. W. Diurnal tide in the martian atmosphere.-"J. Atmos. Sci.", 1976, vol. 33, N 2, p. 321-337.
114. Viking-1. -"Science", 1976, vol. 193, N 4255, p. 723-724.
115. Viking (II): water, ice and argon-three puzzles resolved.— "Science", 1976, vol. 194, N 4268, p. 924-926.
116. Visual passage to Mars.-"Optical Spectra", 1976, vol. 10, N 9, p. 45-49.

Кирилл Яковлевич Кондратьев
«ВИКИНГИ» на Марсе

Редактор Т. А. Иванова. Художник В. В. Бабанов. Художественный редактор В. В. Быков. Техн. редактор М. И. Брайнина. Корректор Т. Н. Черненко.
ИБ № 1055

Сдано в набор 3/VIII 1977 г. Подписано к печати 3/XI 1977 г. М-20361. Формат 60X90/16.

Бум. тип. № 1 и мелованная. Печ. л. 4,75 (в т. ч. вкладка). Уч.-изд. л. 5,17.

Тираж 2500 экз. Индекс МЛ-139. Заказ № 346. Цена 65 коп.

Гидрометеиздат, 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

