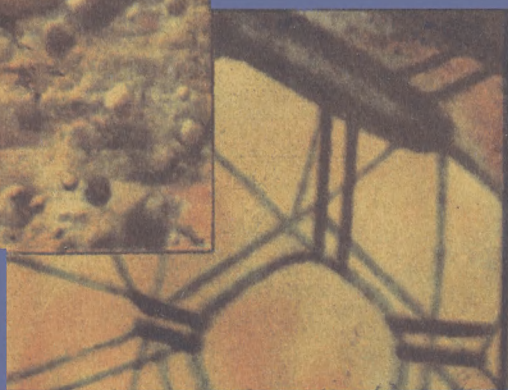


В. А. БРОНШТЭН

ПЛАНЕТА МАРС



В. А. БРОНШТЭН

ПЛАНЕТА МАРС



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1977

526
Б-88
УДК 523.4

Виталий Александрович Бронштэн

ПЛАНЕТА МАРС

М., 1977 г., 96 стр. с илл.

Редактор *Г. С. Куликов*

Техн. редактор *И. Ш. Аксельрод*

Корректор *Е. А. Белицкая*

Сдано в набор 5.08.1976 г. Подписано к печати 13.12.1976 г.

Бумага 84×108¹/₂, тип. № 1. Физ. печ. л. 3.

Условн. печ. л. 5,04. Уч-изд. л. 4,85.

Тираж 100 000 экз. Т-20389. Цена книги 17 коп.

Заказ № 264.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени

Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой

Союзполиграфпрома при Государственном комитете

Совета Министров СССР по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли.

198052. Ленинград, Л-52.

Измайловский проспект, 29

Б $\frac{20605-010}{053(02)-77}$ 180-77

© Главная редакция
физико-математической литературы
издательства «Наука», 1977

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследование планет Солнечной системы, особенно планет типа Земли, представляет большой научный интерес не только для астрономии, но и для наук о Земле — геологии и геофизики. Если раньше изучение Марса было уделом одних астрономов и велось методами наземной оптической астрономии, то теперь ситуация в корне изменилась. Исследование природы этой столь популярной даже в широких кругах неспециалистов планеты ведется с космических аппаратов и автоматических межпланетных станций, работающих вблизи Марса, на орбитах искусственных спутников Марса и на самой поверхности планеты. Собран и проанализирован громадный материал, сделаны важнейшие по своему значению выводы. Большая заслуга в этом принадлежит советским ученым и конструкторам.

Интерес, проявляемый к результатам исследования планеты Марс советскими людьми, требует разъяснения этого исследования в доступной форме, что и побудило автора написать настоящую книжку. Мы попытались рассказать в ней не только о современных представлениях о природе Марса, но и об истории его изучения различными методами, о смене одних представлений другими, о закономерности такой смены взглядов, как результата прогресса наших знаний и методов исследования.

Разумеется, исследование Марса продолжается. В частности, когда писалась эта книга, в США были запущены автоматические станции «Викинг». Они передали

о Марсе новую, весьма интересную информацию, которую удалось отразить (уже в корректуре) в одном из разделов книги. Знание не стоит на месте, в особенности, когда речь идет о наших соседях по Солнечной системе — планетах.

Автор пользуется случаем, чтобы поблагодарить доктора физико-математических наук В. И. Мороза за ценные советы и замечания, сделанные им при подготовке настоящей книжки.

В. А. Бронштэн

Вечно загадочный Марс

Вряд ли какая-нибудь планета вызывала у людей столько споров и дискуссий, как Марс. Спорили не только ученые, но и люди самых различных профессий, занятий, возрастов.

Совершенствовались методы исследований, сменяли друг друга астрономы разных поколений, изменялся и самый характер дискуссий. В десятих-двадцатых годах нашего века спорили главным образом о каналах Марса, о наличии там разумных обитателей (марсиан). В пятидесятых годах много спорили о существовании на Марсе растительности и вообще органической жизни.

Какой планете посвящено наибольшее число фантастических романов, повестей, рассказов? Конечно, Марсу. Фантазия писателей подогревала интерес широкой публики к природе загадочной планеты. Астрономов забрасывали вопросами.

А они, исследователи Вселенной, проводили ночи напролет наедине с красной планетой, сначала впиваясь в нее глазами, усиленными оптикой телескопов, затем снимая ее на чувствительные фотопластинки, стремясь запечатлеть вид планеты и ее спектр, наконец, поглядывая на перья самописцев, следя за сменой цифр на табло электронных регистраторов, за работой приборов, принимающих изображения планеты от космических аппаратов.

Шли годы и десятилетия, менялись методы исследований, накапливались наши знания о природе красной планеты, на место одних загадок вставляли другие, росло число ученых, стремившихся проникнуть в тайны Марса.

О том, как все это происходило, и рассказывается в этой книжке.

Марс как планета

Первые наблюдения Марса проводились еще до изобретения телескопа. Это были позиционные наблюдения. Их целью было определение точных положений планеты по отношению к звездам. Такие наблюдения проводил еще Коперник, стараясь подкрепить ими свою гелиоцентрическую систему мира. Точность наблюдений Коперника составляла около одной минуты дуги.

Значительно более точными были наблюдения знаменитого датского астронома Тихо Браге; их точность доходила до 10 секунд дуги. За свою долгую жизнь Тихо пронаблюдал десять противостояний Марса, накопив непрерывный ряд наблюдений за 22 года. Этот ценнейший материал попал после смерти Тихо в самые верные руки — в руки Иоганна Кеплера, прекрасного вычислителя, человека широких взглядов, не связывавшего себя привычными в те времена представлениями о движении планет по окружностям — самым «совершенным» из всех кривых. Обработка наблюдений положений Марса, выполненных Тихо Браге, привела Кеплера к открытию трех его знаменитых законов движения планет. Истинной формой планетных орбит оказался эллипс, а Солнце находилось в одном из фокусов этого эллипса (общем для всех планет).

Как хорошо, что для выяснения законов движений планет и формы их орбит был выбран именно Марс, а, скажем, не Венера. Орбита Марса имеет эксцентриситет 0,093, тогда как орбита Венеры — только 0,007, в 13 раз меньше. Быть может, имея дело с наблюдениями Венеры или Юпитера, Кеплер не открыл бы свой первый закон, не обнаружил бы отличия орбиты планеты от окружности.

И все же выбор Марса не был делом случая. Наблюдать Венеру (а тем более Меркурий) очень трудно, так как эта планета не отходит от Солнца далее 48° , наблюдается на светлом небе и ее положение трудно привязывать к положениям неподвижных звезд. С другой стороны, Юпитер и Сатурн движутся по небу очень медленно, так как находятся относительно далеко от Земли. Марс же близок к Земле, сравнительно быстро перемещается среди звезд, его можно наблюдать на фоне звездного неба на любых угловых расстояниях от Солн-

ца, он описывает довольно широкие петли около эпохи противостояния.

Элементы орбиты Марса, найденные Кеплером, мало отличались от современных. Например, большая полуось орбиты по Кеплеру равнялась 1,5264 астрономической единицы (а. е.), тогда как современное ее значение 1,5237 а. е. Эксцентриситет орбиты Марса по Кеплеру равен 0,0926, а современное его значение 0,0934.

Уже из приведенных чисел видно, что Марс расположен от Солнца в полтора раза дальше Земли, и, значит, получает от Солнца в 2,3 (1,52²) раза меньше света и

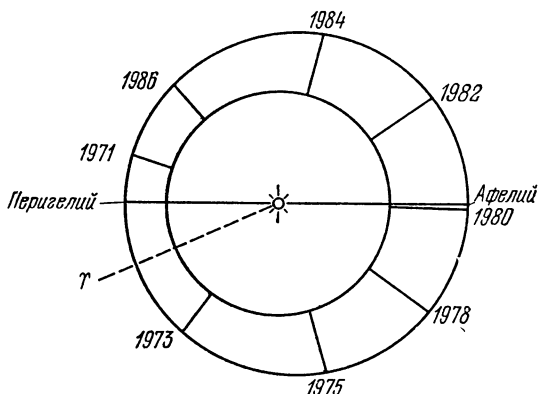


Рис. 1. Орбиты Марса и Земли. Указаны годы противостаний Марса.

тепла. Расстояние Марса от Солнца составляет в среднем 228 млн. км, тогда как Земля отстоит от дневного светила на 150 млн. км (рис. 1).

Благодаря большому эксцентриситету орбиты Марс может изменять свое расстояние от Солнца в довольно широких пределах. Чтобы найти, на сколько расстояние в ближайшей к Солнцу точке орбиты, перигелии, меньше среднего, надо помножить среднее расстояние на эксцентриситет. Получим:

$$228 \times 0,093 = 21 \text{ млн. км.}$$

На столько же дальше среднего наибольшее расстояние Марса от Солнца в самой далекой точке его орбиты (в афелии).

Следовательно, кратчайшее расстояние Марса от Солнца равно 207 млн. км, а наибольшее — 249 млн. км. Эти величины относятся как 1:1,2, а поток солнечного света и тепла на единицу поверхности Марса в перигелии и афелии как 1,44:1.

Чтобы понять, как может изменяться положение Марса относительно Земли, рассмотрим основные конфигурации этой планеты (они справедливы и для других верхних планет, от Юпитера до Плутона).

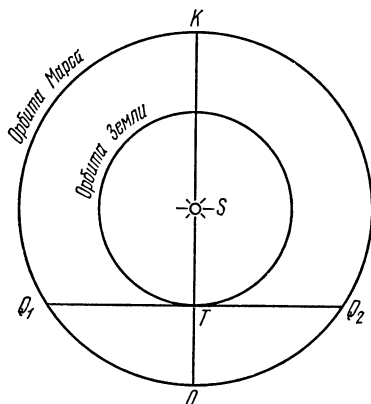


Рис. 2. Конфигурации Марса. S — Солнце, T — Земля, O — противостояние, K — соединение, Q_1 и Q_2 — квадратуры.

Пусть Земля при движении по орбите вокруг Солнца S находится в положении T (рис. 2). На орбите Марса отметим четыре важных положения планеты: соединение K , когда планета находится за Солнцем, на продолжении прямой TS , квадратуры Q_1 и Q_2 , когда угол между направлениями на Солнце и планету ($\angle STQ_1 = \angle STQ_2$) равен 90° , и противостояние O , когда планета находится снова на продолжении

прямой TS , но в направлении, противоположном Солнцу (отсюда и выражение «противостояние»).

Легко видеть, что именно в противостоянии планета расположена ближе всего к Земле, а в соединении расстояние между ними максимально. Поэтому эпоха соединения — самый неблагоприятный период для наблюдений Марса, а эпоха противостояния, наоборот, самый благоприятный. И не только благодаря близости планеты к Земле, но и потому, что в это время планета видна всю ночь, восходит с заходом Солнца и заходит с его восходом.

Прежде чем перейти к более подробному рассмотрению условий видимости Марса во время противостояний, остановимся на значении квадратур. Обычно думают, что ничего особенного эти конфигурации планеты не представляют, за исключением того, что планета находится

на 90° от Солнца. На самом деле это не так. Квадратуры замечательны в двух отношениях: во-первых, в это время скорость приближения планеты к Земле или удаления от нее максимальна, во-вторых, угол фазы планеты достигает в квадратурах наибольшего значения.

Поясним эти два обстоятельства. Движение планеты относительно Земли по лучу зрения используется спектроскопистами для отделения с помощью эффекта Доплера спектральных линий планетного происхождения от так называемых теллурических линий, вызванных поглощением света газами земной атмосферы. Найдем, чему равна эта радиальная скорость (по лучу зрения) для внешней планеты. Пусть Земля (рис. 3) находится в

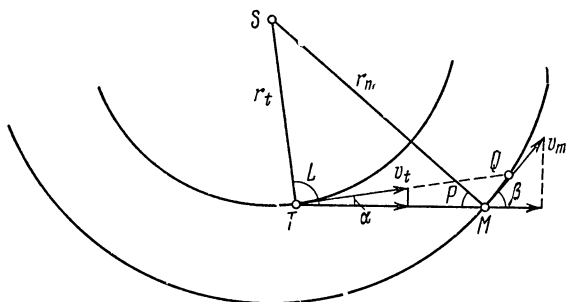


Рис. 3. К расчету радиальных скоростей Марса относительно Земли.

точке T и движется по орбите со скоростью $v_t = 30$ км/сек, а Марс — в точке M и движется со средней скоростью $v_m = 24$ км/сек. Пусть векторы скоростей v_t и v_m образуют с лучом зрения MT углы α и β соответственно. Тогда очевидно, что радиальная скорость v_r будет равна разности проекций v_t и v_m на направление TM :

$$v_r = v_t \cos \alpha - v_m \cos \beta. \quad (1)$$

Угол $\alpha = L - 90^\circ$ *), где L — угловое расстояние Марса от Солнца S (скорость Земли направлена по касательной, которая перпендикулярна к радиусу ST в точке касания T). Угол $\beta = 90^\circ - P$, где P — угол фазы, т. е. угол между направлениями планета — Солнце и

*) Или $90^\circ + L$, если Марс находится по другую сторону от точки Q .

планета — Земля. Кроме того, из треугольника SMT по теореме синусов имеем

$$\sin P = \frac{r_t}{r_m} \sin L, \quad (2)$$

где r_t и r_m — расстояния Земли и Марса от Солнца. Отсюда сразу видно, что угол фазы P достигает наибольшего значения, когда $L = 90^\circ$, т. е. во время квадратур. В это время $P = 41^\circ$ (если Марс находится на среднем расстоянии) или $P = 47^\circ$ (если Марс в перигелии). Фаза (или доля освещенного диска) Марса равна при этом 0,84. Мы можем заменить α и β на L и P и преобразовать формулу (1) так:

$$v_r = \left(v_t - \frac{r_t}{r_m} v_m \right) \sin L. \quad (3)$$

Величина в скобке (для средних значений r_m и v_m) равна 14 км/сек. Очевидно, что при $L = 90^\circ$ v_r тоже достигает этого значения, которое является максимальным *).

Обратимся теперь к противостояниям Марса. По условиям видимости планеты не все они равноценны по двум причинам. Во-первых, из-за эксцентриситета орбиты Марса его расстояние от Земли в момент противостояния может меняться от 56 до 100 млн. км. Во-вторых, склонение, а значит, и высота планеты над горизонтом различны для разных противостояний.

Те противостояния, при которых расстояние до Марса не превышает 60 млн. км, принято называть великими. Очевидно, в период великих противостояний Марс должен быть вблизи перигелия. Если соединить перигелий орбиты Марса с Солнцем прямой линией, то она пересечет орбиту Земли в той точке, которую Земля проходит 29 августа. Поэтому даты великих противостояний Марса приходятся обычно на август или сентябрь (исключением был 1939 г., когда великое противостояние наступило 23 июля).

В следующей таблице приведены даты великих противостояний за последние 100 лет и кратчайшие расстояния Марса от Земли в астрономических единицах и в миллионах километров.

*) Впрочем, если Марс в эпоху квадратуры находится в афелии, его радиальная скорость может достигнуть 17 км/сек.

Год	Дата	Расстояние	
		а. е.	млн. км
1877	5 сент.	0,3767	56,35
1892	4 авг.	0,3773	56,45
1909	24 сент.	0,389	58,20
1924	23 авг.	0,3728	55,77
1939	23 июля	0,388	58,05
1956	10 сент.	0,3781	56,56
1971	10 авг.	0,376	56,25

Сразу видно, что великие противостояния следуют с интервалом в 15 или 17 лет. Чтобы понять существующую здесь закономерность, вспомним, что период обращения Марса вокруг Солнца равен 687 суткам. Синодический период планеты, т. е. интервал от одного противостояния до следующего, определяется по формуле

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{P},$$

где $P = 687$ сут. — год Марса, $T = 365,25$ сут. — год Земли. Из этой формулы находим $S = 780$ суткам, т. е. синодический период Марса равен 2 годам 50 суткам. Но это — только среднее значение. Из-за эксцентриситета орбиты Марса синодический период меняется в пределах от 764 до 811 суток, как можно видеть из следующей таблички последовательных противостояний Марса с 1956 по 1975 г.

Год	Дата	Интервал (сут.)	Расстояние (млн. км)	Видимый диаметр Марса
1956	10 сент.		56,6	24",7
1958	16 нояб.	797	73,0	19,2
1960	29 дек.	774	91,0	15,4
1963	4 февр.	767	100,0	14,0
1965	9 марта	764	100,0	14,0
1967	15 апр.	767	91,0	15,4
1969	31 мая	777	73,3	19,1
1971	10 авг.	800	56,2	24,9
1973	24 окт.	806	65,0	21,6
1975	14 дек.	781	84,9	16,5

В табличке приведены также значения наименьшего расстояния Марса от Земли в эпоху противостояния и наибольшего видимого диаметра Марса в секундах дуги. Из последнего столбца видно, какие преимущества представляют великие противостояния по сравнению с «обычными».

Но великие противостояния имеют, с точки зрения условий наблюдений, и свои минусы, особенно для обсерваторий и наблюдателей средних широт северного полушария. В это время Марс имеет большое южное склонение и находится очень низко над горизонтом, наблюдать его неудобно. Так, во время великого противостояния 10 августа 1971 г. склонение Марса было -22° и на широте $+50^\circ$ он даже в кульминации не поднимался выше 18 градусов над горизонтом! Наблюдения Марса в это время велись на южных обсерваториях Советского Союза, Европы, США, Японии и на обсерваториях южного полушария.

С этой точки зрения «не великое» противостояние 24 октября 1973 г. для наблюдателей средних широт было более выгодно: хотя диск Марса был несколько меньше, чем в 1971 г. ($21'',6$ против $24'',9$), зато склонение планеты было около $+9^\circ$, и ее высота в кульминации на той же широте достигала 49 градусов.

Ознакомившись с орбитой и условиями видимости Марса, обратимся к свойствам Марса как планеты: его размерам, массе, вращению.

Экваториальный диаметр Марса равен, по новейшим определениям французского астронома О. Дольфюса, 6790 км, т. е. 0,53 земного. Полярный диаметр Марса несколько меньше экваториального из-за полярного сжатия. Разность экваториального и полярного радиусов Марса равна $1/191$ его экваториального радиуса. У Земли эта величина равна $1/298$. Иначе говоря, Марс сплюснут у полюсов несколько сильнее, чем Земля *).

*) Данные «Маринера-9» позволили уточнить наши сведения о форме и размерах Марса. Фигура планеты близка к трехосному эллипсоиду, причем наибольший экваториальный диаметр уровенной поверхности (соответствующей у нас на Земле уровню мирового океана) равен 6788 км, наименьший — 6786 км, полярный диаметр 6753 км. Истинная поверхность Марса отличается от уровенной: для истинной поверхности эти три диаметра равны соответственно 6802, 6790 и 6745 км, т. е. сжатие истинной поверхности больше.

Марс вращается вокруг своей оси почти так же, как и Земля: его период вращения равен 24 час. 37 мин. 23 сек., что на 41 мин. 19 сек. больше периода вращения Земли. Ось вращения наклонена к плоскости орбиты планеты на угол 65° , почти равный углу наклона земной оси ($66^\circ,5$). Это значит, что смена дня и ночи, а также смена времен года на Марсе протекает почти так же, как на Земле. Там есть и тепловые пояса, подобные земным: тропический (широта тропиков $\pm 25^\circ$), два умеренных и два полярных (широта полярных кругов $\pm 65^\circ$).

Но есть и отличия. Прежде всего из-за удаленности от Солнца климат Марса вообще суровее земного. Далее, год Марса (687 земных суток или 668 марсианских суток) почти вдвое длиннее земного, а значит, дольше длятся и сезоны. Наконец, из-за эксцентриситета орбиты длительность и характер сезонов заметно отличаются в северном и южном полушариях планеты, как видно из следующей таблички:

Времена года		Длительность (в марсианских сутках)
Северное полушарие	Южное полушарие	
Весна	Осень	193
Лето	Зима	178
Осень	Весна	143
Зима	Лето	155

Таким образом, в северном полушарии планеты лето долгое, но прохладное, а зима короткая и мягкая (Марс в это время близок к перигелию), тогда как в южном полушарии лето короткое, но теплое, а зима долгая и суровая. Как все это выражается в привычных нам температурах, мы узнаем дальше.

Масса Марса была довольно точно определена по движению его спутников Фобоса и Деймоса, а теперь уточнена по движению искусственных спутников серии «Маринер». Она равна $1:3\,098\,700$ доле массы Солнца, или $0,107$ массы Земли, или $6,42 \cdot 10^{26}$ г. Отсюда средняя плотность Марса получается $3,89$ г/см³ ($0,70$ средней плотности Земли), ускорение силы тяжести на его

поверхности на экваторе 372 см/сек^2 (0,38 земного) и критическая скорость, достаточная для преодоления притяжения планеты, $5,0 \text{ км/сек}$ (против $11,2 \text{ км/сек}$ на Земле).

Таковы общие характеристики Марса как планеты. Как мы не раз еще сможем убедиться, они во многом определяют условия на Марсе: состояние его атмосферы, климат, ветровой режим. Но расскажем обо всем по порядку.

Спутники Марса

11 и 17 августа 1877 г. Асаф Холл на Вашингтонской обсерватории открыл два маленьких спутника Марса — Фобос и Деймос. Размеры их дисков были не различимы ни в какой телескоп, а блеск в среднем противостоянии соответствовал 11,6 и 12,8 звездной величины. Это свидетельствовало об их весьма малых размерах. Оценить эти размеры можно было таким путем.

Предположим, что отражательная способность спутников такая же, как и у самого Марса. Тогда отношение блеска планеты и спутника будет равно квадрату отношения их диаметров. Блеск Марса в среднем противостоянии равен —1,65 звездной величины, значит, Марс в 200 000 раз ярче Фобоса и в 600 000 раз ярче Деймоса. Отсюда следует, что диаметры обоих спутников меньше диаметра Марса в 450 и 770 раз соответственно, т. е. равны 15 и 9 км.

В действительности, как показали фотографии «Маринера-9» в 1971 г., оба спутника больше. Фобос имеет размеры $27 \times 20 \text{ км}$, Деймос $15 \times 11 \text{ км}$. Недооценка размеров спутников получилась потому, что их поверхность оказалась темнее марсианской.

Периоды обращения спутников вокруг планеты составляют 7 час. 39 мин. у Фобоса и 30 час. 21 мин. у Деймоса, их расстояния от центра планеты 9400 и 23 500 км. Орбиты почти круговые, их наклон к экватору Марса у Фобоса 1 градус, у Деймоса 2,7 градуса.

Таким образом, Фобос совершает обращение вокруг планеты втрое быстрее, чем сам Марс вращается вокруг оси. За сутки Марса Фобос успевает совершить три полных оборота и пройти еще дугу в 78° . Для марсианского наблюдателя он восходит на западе и заходит на

востоке. Между двумя последовательными верхними кульминациями Фобоса проходит 11 час. 07 мин.

Совсем иначе движется по небу Деймос. Его период обращения больше периода вращения Марса, но ненамного. Поэтому он хотя и «нормально» восходит на востоке и заходит на западе, но движется по небу Марса крайне медленно. От одной верхней кульминации Деймоса до следующей проходит 130 часов — пять с лишним суток!

Видимые диаметры обоих спутников для наблюдателя на поверхности планеты сравнительно невелики. Фобос в зените имеет видимый диаметр $16'$ (по большой оси), т. е. кажется ровно вдвое меньше нашей Луны на земном небе, а у горизонта $11'$. Деймос даже в зените имеет видимые размеры $2' \times 3'$, т. е. в 10—15 раз меньше Луны, но все же его диск должен быть различим невооруженным глазом.

В 1945 г. американский астроном Б. Шарплесс обнаружил вековое ускорение в движении Фобоса по орбите. Это означало, что Фобос, строго говоря, движется по очень пологой спирали, постепенно приближаясь к поверхности Марса. Если так будет продолжаться и дальше, то через 15 млн. лет — срок с космогонической точки зрения весьма небольшой ($1/300$ возраста Марса) — Фобос упадет на Марс.

Однако только через 14 лет на это обратили внимание. К тому времени появились небесные тела, двигавшиеся точно таким же образом. Это были первые искусственные спутники Земли, запущенные в СССР и позднее в США. Торможение в земной атмосфере заставляло их снижаться, а приближение к центру Земли вызывало ускорение их движения.

Известный советский астрофизик И. С. Шкловский попытался в 1959 г. подсчитать, не может ли торможение в самых верхних слоях атмосферы Марса (на высоте 6000 км) быть причиной векового ускорения Фобоса. Результат был неожиданным: это возможно только в том случае, если Фобос... полый. Тогда он, подобно воздушному шару, будет испытывать заметное сопротивление окружающей газовой среды. Однако эта гипотеза, наделавшая в свое время много шума, не подтвердилась. Фотографии «Маринера-9» показали, что Фобос и Деймос имеют вид громадных каменных глыб.

Почти одновременно советским геофизиком Н. Н. Парийским была выдвинута другая гипотеза, объяснявшая особенности движения Фобоса приливным торможением. Несмотря на свою маленькую массу ($2 \cdot 10^{19}$ г), Фобос из-за близости к Марсу может вызывать довольно заметные приливы в его коре. Попробуем сравнить их с лунными приливами на Земле. Приливное ускорение пропорционально массе возмущающего тела и радиусу возмущаемого тела и обратно пропорционально кубу расстояния между их центрами. Составим отношение этих величин для системы Марс — Фобос (индекс 1) и Земля — Луна (индекс 2):

$$\frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^3 = \frac{2 \cdot 10^{19}}{7,4 \cdot 10^{25}} \cdot \frac{3,4 \cdot 10^3}{6,4 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{3,84 \cdot 10^5}{9,4 \cdot 10^3}\right)^3 \approx 10^{-2}.$$

Итак, приливное ускорение, создаваемое Фобосом на Марсе, только в 100 раз меньше того, которое Луна создает на Земле. Если Луна заставляет земную кору дважды в сутки приподниматься и опускаться примерно на 50 см (вместе с горами, долинами, зданиями, людьми), то под действием Фобоса кора Марса будет испытывать поднятия на 5 мм — вполне заметную величину, и притом в два с лишним раза чаще.

Приливная волна на Земле из-за трения и сил напряжения в земной коре не поспевает за Луной, а отстает от нее на угол приливного запаздывания, почти равный 90° . В случае Марса будет то же самое, но движение приливной волны из-за уже известных нам обстоятельств обращения Фобоса будет направлено с запада на восток, в сторону вращения Марса. Притяжение приливных горбов будет тормозить движение Фобоса, вызывая уже известный нам эффект векового ускорения.

Были и другие объяснения этого явления (например, как полагают В. В. Радзиевский и В. П. Виноградова, его могло бы обусловить световое давление). Но вдруг появились сообщения, что никакого векового ускорения у Фобоса нет и проблема отпадает сама собой. В 1967 г. английский астроном Дж. Уилкинс подобрал такие параметры уравнений движения Фобоса, которые хорошо удовлетворяли наблюдениям за 1877—1929, а также за 1956 и 1967 гг. без гипотезы о вековом ускорении.

В 1968—1969 гг. московский астроном С. Н. Вашковьяк разработала новую аналитическую теорию движе-

ния Фобоса и Деймоса, более полную, чем применявшаяся до тех пор теория Г. Струве. Ее результаты также не показали наличия векового ускорения, но свою теорию С. Н. Вашковьяк сравнивала с наблюдениями только за 1877—1926 гг.

В 1972 г. американский астроном А. Т. Синклер построил наиболее полную теорию движения спутников Марса, основанную на обработке 3100 наблюдений их положений. Сперва Синклер получил вековое ускорение (правда, вдвое меньшее, чем Шарплесс), но потом, отбросив малонадежные, по его мнению, наблюдения 1877—1881 гг., пришел к выводу, что оно нереально.

Тогда ленинградский астроном В. А. Шор с группой сотрудников предпринял обработку всех опубликованных наблюдений спутников Марса за 1877—1973 гг., более 5000 измерений. И... вековое ускорение Фобоса было вновь обнаружено. Его величина составляла 75% величины, найденной Шарплессом, и 150% величины, полученной Синклером. Отбрасывание тех или иных наблюдений не изменяет этого вывода. Данные «Маринера-9» тоже согласуются с полученным результатом.

Интересно, что у Деймоса никто из перечисленных исследователей не обнаружил никакого векового ускорения. Если верна приливная гипотеза, то это легко объяснимо. Нетрудно подсчитать, что приливное ускорение от Деймоса в 120 раз меньше, чем от Фобоса, к тому же приливная волна от Деймоса движется по поверхности Марса в 12 раз медленнее.

Неужели через 20—25 миллионов лет Фобос упадет на Марс? Ответ на этот вопрос дадут наблюдения ближайших 50 лет.

Что же нам известно о физических свойствах спутников Марса? Поверхность их оказалась очень темной, их альбедо равно 0,05, как у лунных «морей». Она вся испещрена кратерами ударного (метеоритного) происхождения, причем наибольший кратер на Фобосе имеет поперечник 5 км. Плотность кратеров на единицу поверхности спутников заставляет считать спутники весьма древними небесными телами. А малый наклон орбит к экватору Марса и их почти круговая форма противоречат гипотезе о происхождении спутников Марса путем захвата, хотя такой взгляд еще кое-кем высказывается.

Наблюдения «Маринера-9» показали, что оба спутника обращены к Марсу одной стороной (как Луна к Земле). Для установления такого вращения достаточно десятков миллионов лет для Деймоса и только сотен тысяч лет для Фобоса ввиду его близости к Марсу.

Непосредственные фотографии, фотоэлектрические и поляризационные наблюдения указывают на то, что наружный слой поверхности обоих спутников — мелко раздробленная пыль, слой которой имеет толщину около 1 мм. Ее состав, по-видимому, базальтовый со значительной примесью карбонатов. Инфракрасные наблюдения свидетельствуют о крайне низкой теплопроводности наружного покрова, что подтверждает гипотезу о пылевом слое.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАРСА КЛАССИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ АСТРОНОМИИ

Марс в телескоп

После изобретения телескопа астрономы сразу же попытались наблюдать и зарисовывать поверхность Марса. Один из первых рисунков этой планеты принадлежит голландскому физику и астроному Христиану Гюйгенсу; он сделан в 1659 г. В 60—70-е годы XVII в. наблюдениями Марса занимался французский астроном Жан Доминик Кассини, впервые определивший период вращения Марса по перемещению пятен на его диске.

За два столетия, прошедшие от наблюдений Кассини до работ итальянского астронома-наблюдателя Джованни Скиапарелли, кто только не наблюдал и не зарисовывал Марс! Среди них был и творец звездной астрономии Вильям Гершель, и наблюдатель планет Иероним Шретер, и один из основоположников астроспектроскопии Анджело Секки. На основе этих наблюдений были составлены первые карты Марса и установлено, что на диске планеты можно наблюдать три типа областей: обширные желтовато-оранжевые пространства, получившие название материков, темные серовато-голубые пятна, условно названные морями, и ярко-белые пятна у полюсов, получившие название полярных шапок (рис. 4).

Еще В. Гершель в 1784 г. обратил внимание на периодические изменения размеров полярных шапок, совпадавшие со сменой сезонов на планете. Гершель сделал вывод, что весной и летом полярные шапки тают, словно они состоят из снега или льда. Белый цвет шапок создавал аналогию с земными снегами полярных стран. Для той эпохи этого было достаточно для такого вывода.

Оранжевый цвет материков наводил на сравнение с земными пустынями. Что касается морей, то первое время астрономы допускали, что это настоящие моря,

наполненные водой. Мы скоро убедимся, насколько опасны в науке подобные чисто внешние аналогии.

Чем больше накапливалось зарисовок Марса, тем точнее становились его карты. Различные астрономы предлагали разные системы названий марсианских областей. В науке укрепилась система названий, предложенная итальянским астрономом Джованни Скиапарелли, работавшим в последней четверти XIX в.

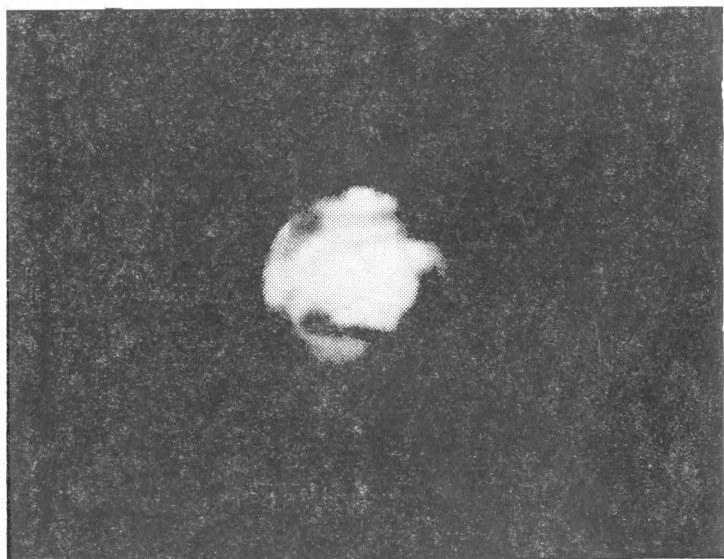


Рис. 4. Фотография Марса. Обсерватория Нью-Мексико (США). Север наверху.

Скиапарелли выделил следующие типы темных деталей на Марсе: собственно моря, обозначавшиеся латинским термином *Mare*, заливы (*Sinus*), озера (*Lacus*), болота (*Palus*), низины (*Depressio*), мысы (*Promontorium*), проливы (*Fretum*), источники (*Fons*) и области (*Regio*). Так появились на карте Марса столь привычные для каждого астронома-планетчика и необычные для широкого круга людей названия, как *Solis Lacus* (Озеро Солнца), *Mare Sirenum* (Море Сирен), *Sinus Meridiani* (Срединный залив), *Deucalionis Regio* (область Девка-

лиона), *Pandorae Fretum* (пролив Пандоры), *Oxia Palus* (Кислое болото) и другие.

Если наблюдать Марс из вечера в вечер в эпоху великого противостояния, когда к Земле наклонено южное полушарие планеты, то из-за разности периодов вращения Марса и Земли на 40 минут обращенные к Земле области будут постепенно сдвигаться в сторону, обратную направлению вращения планеты. И если в первый вечер перед нами был знаменитый южный пояс морей: *Mare Thyrgenum*, *Mare Cimmerium*, *Mare Sirenum* (рис. 5), то дальше перед нами постепенно пройдут светлые области *Memnonia* и *Thaumasia*, окружающие продолговатое пятно *Solis Lacus*, затем большое *Mare Erythraeum* с двумя заливами у экватора: *Aurogae Sinus* и *Margaritifer Sinus*; в это время на севере будет видно сероватое *Mare Acidalium*. Дальше мы сможем увидеть похожий на двойной клюв *Sinus Meridiani*, начало отсчета марсианских долгот, и тянущийся от него влево *Sinus Sabaeus* с примыкающей к нему с севера светлой областью *Arabia*. На юг от *Sinus Sabaeus* и *Pandorae Fretum* простирается большая светлая область *Noachis*. Темный рукав *Hellespontus* отделяет ее от соседней с востока (для наблюдателя в телескоп — слева) светлой области *Hellas* (Эллады), о которой мы еще будем говорить. За *Sinus Sabaeus* простирается *Mare Serpentis* с отходящим к северу темным треугольным выступом *Syrtis Major*. Левее его в 50-е годы вдруг образовалось новое темное пятно *Nodus Laocoontis* (Лаокоонов Узел), которое через несколько лет так же неожиданно исчезло. Еще дальше идут светлые области *Aethiopis*, *Elysium*, а к югу от экватора — уже знакомые нам *Mare Thyrgenum* и *Mare Cimmerium*. Круг замкнулся, но на полный обзор Марса у нас ушло 40 суток: таков синодический период вращения Марса относительно Земли *).

Близость периодов вращения Земли и Марса приводит к любопытным следствиям. Чтобы наблюдать и фотографировать с Земли всю поверхность Марса в течение одних суток, нужны объединенные усилия астрономов стран Европы, Азии и Америки, поскольку ночь

*) За одни сутки из-за разности периодов вращения Марса и Земли Марс «недоворачивается» на 9 градусов. Чтобы он «невернулся» на 360°, и требуется 40 суток.

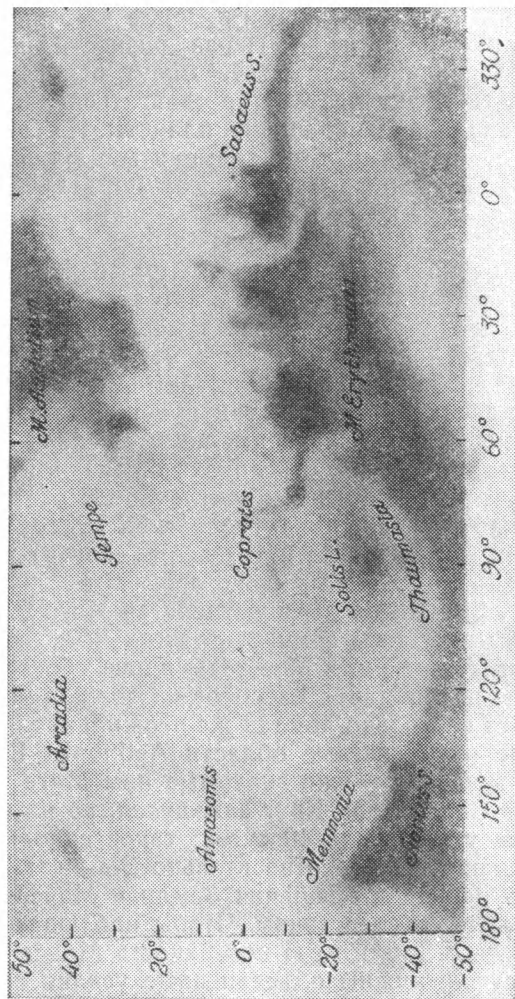


Рис. 5а. Фотографическая карта Марса, составленная Г. де Моттоном по лучшим наземным наблюдениям.

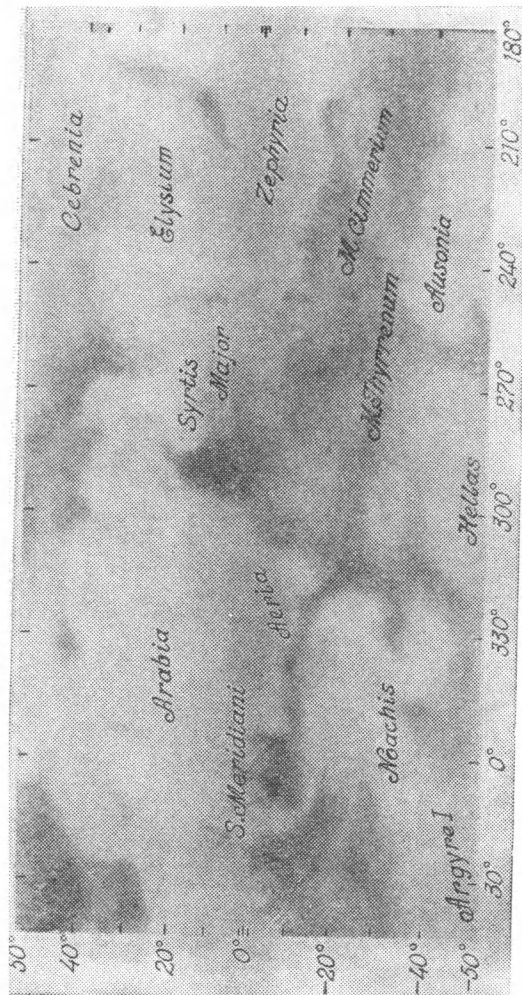


Рис. 56. Фотографическая карта Марса, составленная Г. де Моттони по лучшим наземным наблюдениям.

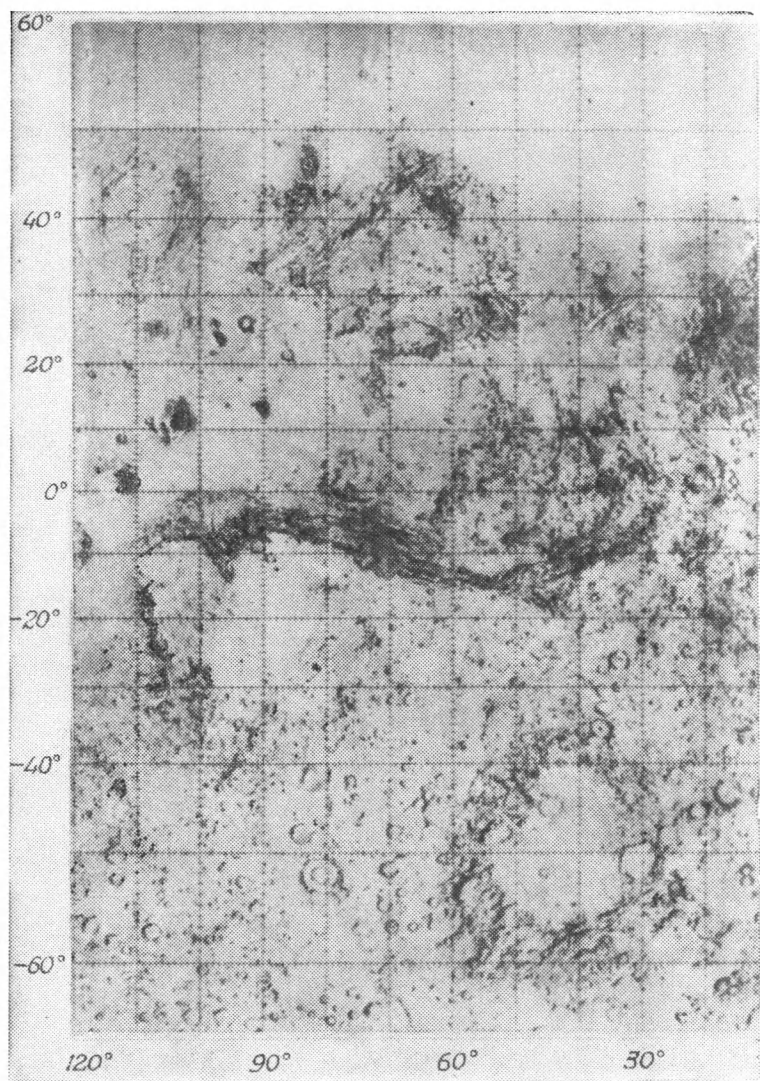


Рис. 5в. Геологическая карта части поверхности Марса по данным «Маринера-9».

(и видимость Марса) для них наступает в физически разные моменты. Если бы периоды вращения обеих планет были в точности равны, наблюдатель, расположенный, например, в Москве, был бы обречен наблюдать всегда одно и то же полушарие Марса (как мы видим всегда одну сторону Луны), а чтобы полюбоваться на другое полушарие, ему пришлось бы ехать в Америку или Японию.

За последние годы необходимость международной кооперации при наблюдениях этой планеты приобретает все большее значение. Поэтому еще в 1969 г. был организован Международный планетный патруль в составе восьми обсерваторий, расположенных сравнительно равномерно по долготе и не очень далеко от экватора. В него вошли: обсерватория Мауна Кеа (Гавайи, США), обсерватория Ловелла (Флагстафф, Аризона, США), Межамериканская обсерватория в Серро-Тололо (Чили), Республиканская обсерватория (ЮАР), станция Кавалур Индийского института астрофизики, австралийские обсерватории Перт и Маунт Стромло. Все они оснащены однотипными телескопами и фотокамерами с электронным оборудованием, обеспечивающим заданную длительность экспозиций, регистрацию момента снимка и других его характеристик. Фотографирование производится с четырьмя светофильтрами: красным, зеленым, синим и ультрафиолетовым. Проявление, отбор и первичная обработка снимков сосредоточены в обсерватории Ловелла, однако их фотокопии могут быть высланы по запросу любому научному учреждению мира. Многие обсерватории, не входящие в систему патруля, тоже посылают туда получаемые ими фотографии.

За первые три года работы патруля он накопил в три с лишним раза больше фотографий планет, чем было получено во всем мире за 60 лет, протекших с начала их фотографирования. Обработка фотографий максимально автоматизирована. Кроме Марса, патруль фотографирует Венеру и Юпитер.

Каналы Марса

Вернемся на 100 лет назад, к эпохе Скиапарелли. 1877 год, год великого противостояния Марса, ознаменовался двумя важными открытиями. Астроном Вашингтонской обсерватории Асаф Холл после долгих

поисков открыл два спутника Марса: Фобос и Деймос, о чем мы уже рассказывали. И в том же году Скиапарелли объявил об открытии знаменитых марсианских каналов.

Собственно говоря, каналы Марса — тонкие длинные линии — наблюдали и до Скиапарелли. В 1862 г. их наблюдали Анджело Секки, а также У. Доус и Э. Голден. Но никто из них не обратил внимания на эти полосы, не придавал им значения. Только Скиапарелли понял, что имеет дело с новым типом образований на Марсе, и он же дал им название: каналы.

Это название вовсе не означало, что Скиапарелли с самого начала считал каналы искусственными сооружениями. Итальянское слово *canale* означает вообще любой узкий водный проток. Предположение об искусственном происхождении каналов, породившее в свое время так много споров, было высказано Скиапарелли гораздо позже — в 1895 г., и то в очень осторожной форме. Скиапарелли нанес на свою карту Марса около 100 каналов и дал им названия: *Oxus*, *Hiddekel*, *Physon*, *Euphrates*, *Ganges* и т. д.

Открытие Скиапарелли дало толчок к работам другого исследователя — американского астронома Персиваля Ловелла, построившего в пустыне Аризоны специальную обсерваторию Флагстафф для наблюдений Марса в отличных атмосферных условиях. Ловелл нанес на карту около 600 каналов и явился горячим защитником гипотезы об их искусственном происхождении. Но другие астрономы смотрели на это дело совсем иначе. Многие опытные наблюдатели, работавшие с более мощными телескопами, чем Ловелл (например, Э. Барнард, Э. М. Антониади), никогда не наблюдали прямолинейные каналы. Антониади всегда изображал на месте каналов цепочки пятен, широкие размытые полосы, границы раздела областей разной яркости (рис. 6).

Возникло предположение, что каналы — вообще оптическая иллюзия. Американские астрономы Э. Пикеринг и В. Маундер поставили специальные эксперименты для доказательства фиктивности каналов, предложив группам школьников (ничего не знавших о каналах Марса) срисовывать издали изображения Марса, на которых каналов не было, но были оазисы, или просто разбросанные цепочки пятнышек. Почти во всех случаях

дети рисовали каналы, причем именно там, где они были на картах Ловелла. Маундер сделал отсюда вывод, что каналы возникают в результате суммирования глазом наблюдателя мелких деталей, которые не могут быть восприняты в отдельности.

Французский астроном Антониади, подводя итоги своим наблюдениям Марса в период великого противостояния 1909 г., писал: «Гипотеза о мнимом существовании геометрической сети получила окончательное опровержение... ибо самые сильные инструменты нашего времени не обнаружили и следа этой сети, между тем как



Рис. 6. Вид каналов Марса по рисункам Скиапарелли (слева) и Антониади.

детали, гораздо более тонкие, чем прямолинейные каналы, были постоянно видны». Прекрасные фотографии Марса, полученные на обсерватории Ловелла астрономом Э. Слайфером, подтверждали, по отзыву Антониади, не столько рисунки Ловелла, сколько рисунки, полученные в Медоне (где вел свои наблюдения Антониади).

Конечно, и Ловелл был не одинок. Но интересно, что если одни наблюдатели рисовали каналы, то другие каналов не видели. Между обоими группами астрономов много лет шли ожесточенные споры. К этим спорам о видимости каналов прибавились споры об их природе и, в связи с гипотезой Ловелла (которая позже получила название *техногенной*), споры о возможности разумной жизни на Марсе. Все эти дискуссии продолжались около 70 лет.

В общем в «докосмический» период изучения Марса высказывались три точки зрения на природу каналов:

1) Каналы — искусственные сооружения разумных обитателей Марса (марсиан).

2) Каналы лишь кажутся геометрически прямыми, но они реальные естественные образования, например:

а) долины рек, поросшие растительностью,

б) разломы, трещины в коре Марса,

в) горные хребты,

г) полосы вулканического пепла.

3) Каналы — оптическая иллюзия.

Автор этой книги сам не раз наблюдал и фотографировал каналы Марса, но они отнюдь не казались ему геометрически правильными прямыми. Получив в 1956 г. каналы на фотографиях, автор довольно решительно отклонил гипотезу № 3. С другой стороны, сумма наших знаний о природе Марса, накопленных к середине 50-х годов, к сожалению, заставляла отвергнуть заманчивую гипотезу 1. Оставались четыре варианта гипотезы 2. Но после получения надежных оценок давления атмосферы Марса стало ясно, что при таком низком давлении на его поверхности не может быть жидкой воды и не могут течь реки. Это лишало реальной почвы гипотезу 2а. Гипотеза 2г, выдвинутая американским астрономом Д. Мак Лафлином, выглядела слишком искусственной. Допуская наличие на Марсе вулканов, трудно предположить, что вулканический пепел будет ложиться узкими полосами длиной в сотни и тысячи километров.

Оставались гипотезы 2б и 2в. Как показали уже в 60-е годы снимки американских автоматических межпланетных станций «Маринер», эти гипотезы были довольно близки к истине. Но и гипотеза 3 вновь заявила о себе. Об этом мы расскажем несколько позже.

Атмосфера и фиолетовый слой

В то же великое противостояние 1909 г., когда Антониади наблюдал Марс в 83-сантиметровый рефрактор Медонской обсерватории, в другом месте земного шара были впервые получены снимки Марса со светофильтрами. Этим местом была Пулковская обсерватория, где на 76-сантиметровом рефракторе фотографировал Марс тогда еще молодой русский ученый Гавриил Адрианович Тихов.

Г. А. Тихову удалось получить большую серию снимков Марса с различными светофильтрами от красного до зеленого. Их обработка позволила обнаружить три явления, получившие название «эффектов Тихова».

1. «Моря» Марса кажутся особенно темными в красный светофильтр и сравнительно слабее выделяются на фоне материков в зеленый светофильтр. Иначе говоря, контраст между «морями» и материками увеличивается с переходом от зеленых лучей к красным.

2. Полярные шапки резче всего выделяются на фоне материков в зеленых лучах и значительно слабее в красных.

3. Резкость деталей на диске планеты постепенно снижается к краю диска; это явление особенно заметно на снимках, сделанных в зеленых лучах, и гораздо слабее в красных.

Первый эффект указывал на то, что материки имеют красноватый цвет, а «моря» скорее зеленоватый. Второй эффект был истолкован так: полярные шапки не белые, как свежий снег, а голубоватые и больше напоминают по цвету речной лед. Наконец, третий эффект, по мнению Г. А. Тихова и многих других ученых, свидетельствовал о наличии у Марса атмосферы. Лишь спустя 60 лет выяснилось, что атмосфера Марса вносит более чем скромный вклад в «третий эффект» — главная его причина была иная. Позднейшие исследования внесли существенные поправки и в истолкование первых двух эффектов Тихова.

Действительно, атмосфера планеты, независимо от своего состава, должна рассеивать солнечные лучи по закону Рэлея, — так, что интенсивность рассеянного света изменяется обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Поэтому зеленые лучи должны рассеиваться атмосферой сильнее, чем красные, и детали поверхности будут замываться рассеянным светом атмосферы. Еще сильнее должны рассеиваться синие и фиолетовые лучи, и в еще большей степени ультрафиолетовые. Астрономы попытались проверить это во время следующего великого противостояния 1924 г., когда американский астроном Вильям Райт получил с помощью 91-сантиметрового рефлектора Ликской обсерватории серию снимков Марса во всех лучах спектра от инфракрасных до ультрафиолетовых. Вскоре такую же серию

снимков получил на 158-сантиметровом рефлекторе обсерватории Маунт Вилсон другой американский астроном — Фрэнк Росс.

Снимки Райта и Росса не только подтверждали результаты Тихова, но и позволили обнаружить два новых эффекта. Во-первых, в синих, фиолетовых и ультрафиолетовых лучах никакие детали поверхности не просматривались: были видны только полярные шапки (рис. 7). Во-вторых, диаметр диска Марса в фиолетовых лучах был заметно больше, чем в красных. Это явление получило название эффекта Райта.

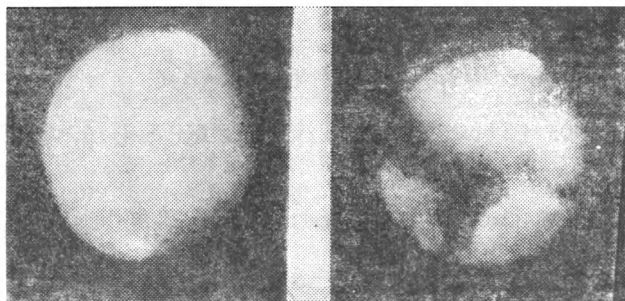


Рис. 7. Марс в синих (слева) и красных (справа) лучах (по Райту).

Открытие эффекта Райта не носило столь сенсационного характера, как открытие марсианских каналов за полстолетия до того. Широкая публика даже не заметила его. Но в кругах ученых это открытие вызвало не менее горячие споры, чем вопрос о каналах, причем их отголоски дошли и до наших дней.

Разность диаметров диска Марса в ультрафиолетовых и инфракрасных лучах на снимках Райта и Росса достигала 200—300 км. Если это результат рассеяния солнечных лучей в плотной атмосфере Марса, то ее высота должна быть равна половине этой величины, т. е. 100—150 км. Отсюда Райт сделал вывод, что Марс окружен весьма плотной и протяженной атмосферой.

Но непосредственные наблюдения и снимки Марса в общем свете, а также в красных, оранжевых, желтых лучах показывали, что его атмосфера весьма прозрачна. Получалось противоречие. Если бы Марс обладал очень

плотной атмосферой, она казалась бы нам молочно-белой, как атмосфера Венеры.

Некоторые ученые пытались объяснить эффект Райта фотографической иррадиацией, т. е. рассеянием света в светочувствительном слое фотоэмульсии, которое тоже зависит от длины волны. Но в 1926 г. Райт вновь получил те же результаты, а Росс сфотографировал наряду с Марсом планеты Юпитер и Венеру, а также искусственные модели планет, и показал, что для этих планет и моделей эффект Райта не имеет места.

Однако теоретическое исследование процесса рассеяния света в атмосфере планеты, выполненное в 1926 г. советским астрономом В. Г. Фесенковым, показало, что при любых предположениях о строении атмосферы Марса разность видимых радиусов планеты в фиолетовых и красных лучах не может превысить 35 км, но никак не 100 или 150 км.

Тогда Райт предложил новое объяснение своему эффекту. Атмосфера Марса может быть очень разреженной и прозрачной, но на некоторой высоте (скажем, 100 км) в ней может находиться слой каких-то частиц в виде мглы или дымки, который и рассеивает фиолетовые лучи. Он получил название фиолетового слоя или голубой дымки.

Советские астрономы-фотометристы Н. П. Барабашов и В. В. Шаронов уже в 1950 г. дали совсем иное объяснение эффекта Райта. Дело было все-таки в фотографической иррадиации, но в сочетании с законом падения яркости к краю диска Марса. В красных лучах яркость падает к краям диска довольно сильно, поскольку мы наблюдаем здесь шарообразную поверхность планеты. Наоборот, в фиолетовых лучах, как мы уже знаем, диск Марса кажется освещенным более равномерно, и его края довольно ярки. Поэтому в фиолетовых лучах иррадиация будет сильнее, чем в красных, что и вызовет эффект Райта.

Юпитер и Венера обладают мощными протяженными атмосферами, и даже в красных лучах мы не можем наблюдать их поверхности. Поэтому закон падения яркости к краю диска у них иной, чем у Марса, и эффект Райта для них наблюдаться не может. Объяснение эффекта Райта Н. П. Барабашовым и В. В. Шароновым было совершенно правильно, за одним исключением.

Распределение яркости по диску Марса в фиолетовых лучах они приписывали целиком рассеянию света в атмосфере Марса. В действительности же главную роль здесь играли фотометрические свойства поверхности планеты.

Методы фотографической фотометрии, развитые советскими астрономами В. Г. Фесенковым, Н. П. Барабашовым, Н. Н. Сытинской, позволяли по распределению яркости вдоль диаметра диска планеты в разных лучах спектра определять одновременно отражательные свойства ее поверхности и оптические характеристики атмосферы. Одна из них, а именно оптическая толщина, позволяла подсчитать давление атмосферы. Такие определения советские астрономы производили начиная с 30-х годов. Присоединив к ним наблюдения поляризации света, рассеянного атмосферой Марса, выполненные французскими астрономами Б. Лио и О. Дольфюсом, а также собственные наблюдения по методу визуальной фотометрии, американский астроном Ж. де Вокулер опубликовал в 1951 г. сводку всех определений давления атмосферы Марса. В среднем из многих определений получалось, что давление у поверхности Марса равно 85 миллибар (1 миллибар = 0,001 атмосферы), т. е. в 12 раз меньше, чем на Земле, и соответствует давлению на уровне 18 км.

Увы, это значение оказалось завышенным почти в 15 раз. Ученых подвели аэрозоли — частицы пыли, постоянно присутствующие в атмосфере Марса и рассеивающие солнечный свет наряду с газовыми молекулами. Их вклад в рассеяние был ошибочно приписан газовой атмосфере и плотность ее была переоценена. Сказались и некоторые произвольные предположения о фотометрических свойствах поверхности Марса. Но выяснить все это удалось гораздо позже и совсем другими методами. Мы расскажем об этом немного дальше.

В монографии «Физика планеты Марс», изданной в 1951 г., Вокулер, оценивая критику гипотезы фиолетового слоя В. В. Шароновым и другими советскими астрономами, сделал вывод, что «их соображения не могут быть приняты, так как наблюдаемые весьма значительные прояснения в атмосфере Марса непосредственно доказывают существование такого слоя».

Да, такие прояснения наблюдались с 1937 г., когда Э. Слайфер впервые обратил на это внимание. Иногда вдруг на снимках Марса в синих и фиолетовых лучах проступала картина деталей поверхности планеты, доступная наблюдениям обычно в красных лучах. Факты таких прояснений никто и не пытался подвергнуть сомнению.

Основное разногласие состояло в другом. Советские фотометристы считали, что в атмосфере Марса, кроме газа, могут быть и крупные частицы (аэрозоли), рассеивающие свет не по закону Рэлея. Они-то и создавали все эффекты, приписываемые фиолетовому слою, в том числе и прояснения. Если называть прослойки, содержащие такие аэрозоли, фиолетовым слоем, писал В. В. Шаронов, отвечая Вокулеру, то разногласий с его позицией не будет.

Но Вокулер наряду с другими авторами приписывал фиолетовому слою способность не только рассеивать, но и поглощать солнечный свет. Он так и назвал его: поглощающий высотный слой. Это, отмечал Шаронов, противоречило как фотометрическим наблюдениям, выполненным в СССР, так и многим другим фактам.

Приведем некоторые из них. Если частицы фиолетового слоя достаточно крупные, то они будут рассеивать не только сине-фиолетовые, но и лучи других цветов, что, однако, не наблюдается. Если же этот слой обладает сильным поглощением фиолетовых лучей, то он не сможет создать яркую дымку рассеянного света, а его сгущения выступали бы на диске Марса в виде темных пятен, а не светлых облаков, которые наблюдаются в действительности, особенно вблизи терминатора (границы дня и ночи на Марсе).

Неясно было и из чего могут состоять частицы фиолетового слоя. Чехословацкий астроном Ф. Линк полагал, что это метеорные частицы, американец С. Гесс, — что это кристаллы углекислоты (CO_2), его соотечественник Дж. Койпер считал их кристаллами льда, француз Э. Шацман — капельками воды. Однако гипотеза Линка не объясняла быстрых прояснений фиолетового слоя. Более обоснованной казалась точка зрения С. Гесса, объяснявшего эти прояснения испарением кристаллов CO_2 при вероятных повышении температуры. Правда, трудно было объяснить, почему оно происходит сразу на целом полушарии планеты.

Многие ученые продолжали отстаивать точку зрения о наличии в атмосфере Марса истинного поглощения света. Ирландский астроном (эстонец по национальности) Э. Эпик предложил двуслойную модель: нижний слой, обладающий истинным поглощением, создает непрозрачность в фиолетовых лучах, а верхний слой производит рассеяние света, создает посветление вблизи лимба и яркие облака. В качестве вещества, создающего поглощение, назывались углерод и его полимеры (C_2, C_3, \dots, C_n), недоокись углерода (C_3O_2), двуокись азота (NO_2) и некоторые другие. Но признаков этих веществ не удалось обнаружить спектроскопически.

В 1969 г. выяснилось, что на снимках американских космических аппаратов «Маринер-6» и «Маринер-7», полученных в синих лучах, никакой дымки не видно, и поверхность Марса видна не хуже, чем в красных лучах. Но фиолетовый слой, если он существует, должен был быть одинаково непрозрачным для приборов, находящихся на Земле и в космосе.

Сторонники гипотезы фиолетового слоя не сдавались. Э. Эпик, например, заявил, что все дело в недоразумении: синий фильтр «Маринеров» имел эффективную длину волны 469 мкм, на которой обычно явление синей дымки не наблюдается: оно становится заметным на более коротких длинах волн. В своей работе 1973 г. Эпик продолжал настаивать на истинном поглощении света атмосферой Марса, но приписал его частичкам пыли, поднимаемым и удерживаемым вертикальными токами в атмосфере. Их размеры, по Эпику, не превосходят одного микрона. Таким образом, речь идет не о «синей» или «фиолетовой», а скорее, о «красной» или даже «черной» дымке, так как ее альбедо (отражающая способность) в фиолетовых лучах крайне низкое (0,04)*).

В 1972 г. проблемой фиолетового слоя занялся американский астроном Д. Томпсон. Изучив всю имевшуюся литературу по этой проблеме (более 120 работ) и используя фотографическую коллекцию Международного планетного патруля, Томпсон пришел к простому и неожиданному выводу. Никакого фиолетового слоя, погло-

*) Альбедо в астрономии называется отношение количества отраженного планетой света к количеству солнечного света, падающего на нее.

шающего или рассеивающего, нет. Вид Марса в фиолетовых лучах — это его нормальный вид, без всякой дымки. Просто в этих лучах контрасты между морями и материками слишком малы и мы их не различаем. Более того, из наблюдений в ультрафиолетовых лучах выяснилось, что в этих лучах все выглядит «наоборот» — моря кажутся светлее материков. Эти явления объясняются исключительно цветовыми особенностями пород, слагающих марсианские моря и материки, и атмосфера тут не при чем.

А как же «синие просветления», которые Вокулер четверть века назад считал самым сильным доказательством существования фиолетового слоя? Томпсон и Бойс тщательно проанализировали все случаи их наблюдений и пришли к выводу, что и здесь все обстоит наоборот. Никакого «просветления» не происходит, но в районе материков происходит осаждение чего-то вроде инея или же над ними (по метеорологическим причинам) образуется слой светлой дымки. Независимо от американских астрономов почти к такому же выводу пришла В. В. Прокофьева (Крымская астрофизическая обсерватория), объяснившая «синие прояснения» подъемом пыли с поверхности планеты над материками. Мелкие частицы пыли надолго остаются в нижних слоях атмосферы и несколько повышают яркость материков в синей области спектра. Контрасты между морями и материками в синих и фиолетовых лучах возрастают, и нам кажется, что атмосфера планеты «просветлела».

Так неожиданно разрешилась загадка фиолетового слоя и «синих просветлений».

Из чего состоит атмосфера Марса?

В 1947 г. Дж. Койпер впервые применил к изучению планет инфракрасный спектрометр — прибор, в котором приемником радиации служило фотосопротивление из сернистого свинца (PbS). Фотосопротивление двигалось вдоль спектра, а соединенный с ним самописец записывал непосредственно распределение энергии в спектре планеты.

Уже первые записи инфракрасных спектров Марса и Луны показали, что у первого значительно усилена полоса CO_2 на длине волны 1,6 микрона. Таким образом,

удалось установить присутствие этого газа (ранее обнаруженного в спектре Венеры) и в атмосфере Марса.

Однако установка Койпера имела весьма низкую разрешающую способность: с ее помощью нельзя было различить тонкие спектральные детали, так нужные астрономам для анализа состава атмосфер планет, притом анализа не только качественного (вещество имеется в атмосфере планеты), но и количественного (вещество содержится в таком-то количестве). Как это ни странно, но ни сам Койпер, ни другие ученые не попытались в течение почти 10 лет усовершенствовать новый метод. Расцвет инфракрасной спектроскопии планет начался уже после 1960 г.

В 1964 г. американские астрономы Х. Спинрад, Г. Мюнч и Л. Каплан по структуре линий, входящих в полосу CO_2 на длине волны 8700 ангстрем, получили количество CO_2 55 *м-атм* при температуре поверхности 230 °К. Приведенное число означает, что углекислый газ атмосферы Марса при нормальном давлении в 1 атмосфере мог бы образовать столб в 55 метров. На Земле содержание углекислого газа составляет лишь 2,4 *м-атм*. Более поздние исследования дали для оценки содержания CO_2 значения от 54 до 90 *м-атм*, а в среднем 70 *м-атм*.

Какую же долю составляет углекислый газ в атмосфере Марса? На Земле эта доля весьма невелика, только 0,03%, на Венере же на долю CO_2 приходится 97% массы атмосферы. Что касается Марса, то первоначально углекислому газу отводилась скромная роль второстепенной компоненты марсианской атмосферы. Вокулер в 1954 г. «уделял» ему лишь 2% объема атмосферы, С. Гесс в 1961 г. — и того меньше, 1,3%. В модели Т. Оуэна и Дж. Койпера (1964 г.) на долю CO_2 приходится уже 14% объема атмосферы Марса.

Дело в том, что оценка содержания того или иного газа в атмосфере планеты зависит не только от интенсивности его линий в спектре, но и от принимаемого в расчете общего давления у поверхности. Фотометрические наблюдения, как мы видели выше, не дают необходимой точности в определении давления и долго давали преувеличенные значения. Причиной этого была пыль и другие аэрозоли, содержащиеся в атмосфере планеты и создававшие дополнительное рассеяние света.

Но если мы примем завышенное значение давления атмосферы у поверхности, то наблюдаемую интенсивность спектральных линий может создать меньшее количество углекислого газа. В качестве примера приведем расчеты Спинрада, Мюнча и Каплана 1964 г. Они рассматривали три модели с тремя разными значениями полного давления. Вот что у них получилось:

	Модель I	Модель II	Модель III
Полное давление (мб)	10	25	40
Парциальное давление CO_2 (мб)	6	4	3
Доля CO_2 (%)	60	16	7,5

Однако в последние годы спектроскописты научились раздельно определять полное газовое давление и содержание CO_2 , используя то обстоятельство, что давление по-разному влияет на интенсивность сильных и слабых линий данного газа.

Полет АМС «Маринер-4» в 1965 г. позволил определить давление у поверхности другим, более точным методом — методом радиозатмения. Этот метод будет нами описан ниже, а пока сообщим лишь полученные им значения давления: от 5 до 9 мб (в разных точках). Еще точнее удалось определить давление по полетам «Маринера-6» и «Маринера-7» в 1969 г.: от 3,8 до 7,0 мб. «Маринер-9» в 1971—1972 гг. дал интервал давлений от 1 до 9 мб, в среднем 6 мб. Близкие результаты дали полеты советских АМС «Марс» в 1971—1974 гг. Таким образом, стало ясно, что углекислый газ является основной компонентой атмосферы Марса (как и атмосферы Венеры). На его долю приходится не менее 60% состава марсианской атмосферы. Как мы увидим дальше, этот вывод получил косвенное подтверждение в ходе советских исследований на станции «Марс-6» в 1974 г.

Какие же еще газы содержатся в атмосфере планеты? В ее верхних слоях под действием ультрафиолетовых лучей Солнца углекислый газ должен диссоциировать, разлагаясь на окись углерода (СО) и атомарный кислород. Попытка У. Синтона в 1959 г. обнаружить СО в атмосфере Марса не дала результата — он оценил лишь

верхний предел ее содержания: 10 *см-атм*. Лишь 10 лет спустя французские ученые супруги Пьер и Жанина Конн, применив новый метод инфракрасной спектроскопии, получивший название фурье-спектроскопии, смогли, при участии Л. Каплана, оценить содержание СО в атмосфере Марса, равное 5,6 *см-атм*, что соответствует 0,08% по объему.

Метод фурье-спектроскопии заслуживает того, чтобы описать его хотя бы в принципе. Обычный метод инфракрасной спектроскопии страдает тем недостатком, что спектр записывается последовательно, и изменение содержания водяного пара или углекислого газа в земной атмосфере на пути луча за время записи может исказить результат. Фурье-спектрометр весь спектр записывает одновременно. В основе метода лежит использование интерферометра Майкельсона, в котором луч света от светила разделяется на две части, проходящие пути разной длины. Когда оба луча соединяются, они интерферируют (взаимодействуют) между собой, взаимно усиливая или ослабляя друг друга, в зависимости от того, в какой фазе придут световые колебания в обоих лучах. Если разность фаз равна нулю, интенсивности обоих лучей складываются; если она равна 180° , они в сумме дадут нулевую интенсивность. Но в приборе длину пути одного из лучей можно плавно менять, и тогда результирующая интенсивность будет тоже плавно меняться, выписывая кривую, называемую интерферограммой. Однако в этой кривой уже заложен весь спектр, так как разность хода лучей измеряется в единицах длины волны, а длины волн меняются вдоль спектра. Чтобы упростить дело, ненужные участки спектра отрезают с помощью светофильтров. Остается превратить интерферограмму в кривую распределения интенсивности по спектру — его регистрограмму. Это делается с помощью математической операции, называемой преобразованием Фурье, по имени французского математика Ж. Фурье, который вывел формулы этого преобразования еще в 1811 г., за 150 лет до применения описанного метода в астрономии.

Метод фурье-спектроскопии дал потрясающую точность и высокую степень разрешения мелких деталей спектра, в 100 раз превосходящую все, что было возможно до того.

Малое количество окиси углерода в атмосфере Марса (равно как и атомарного кислорода) объясняется тем, что процесс диссоциации молекул CO_2 на атом кислорода O и молекулу CO уравнивается обратным процессом: рекомбинацией CO и O обратно в молекулу CO_2 .

Длительное время основной компонентой марсианской атмосферы считался азот, однако никаких доводов в пользу этого, за исключением аналогии с земной атмосферой, не было. Не найдены полосы азота в спектре Марса и до сих пор. Впрочем, надо учитывать, что они лежат в далекой ультрафиолетовой части спектра, не наблюдаемой с Земли. Во всяком случае, о содержании азота в марсианской атмосфере мы сейчас ничего сказать не можем, за исключением того, что оно невелико (верхний предел 5%).

Несомненно, что в состав атмосферы Марса входит инертный газ аргон, составляющий 1% нашей атмосферы. На Земле аргон является продуктом радиоактивного распада изотопа калия K^{40} , имеющего период полураспада 1,3 млрд. лет. Если доля радиоактивного калия в коре Марса такая же, как и в земной коре, то в атмосфере Марса его должно быть довольно много, и он вполне может занимать там второе место по обилию после углекислого газа. Но обнаружить аргон спектроскопически пока нельзя по той же причине, что и азот: полосы его с Земли не наблюдаемы.

В 1976 г. приборы спускаемых аппаратов американских станций «Викинг» показали, что в атмосфере Марса содержится около 1—2% аргона и 2—3% азота, а 95% приходится на долю углекислого газа.

Особенно много усилий предпринимали астрономы с начала XX в., чтобы обнаружить два газа, важных для жизни на любой планете: кислород и водяной пар. В 1900-х годах В. Слайфер и Ф. Вери на обсерватории Ловелла пытались обнаружить оба газа по усилению их полос в спектре Марса по сравнению со спектром Луны, находящейся на той же высоте над горизонтом (это необходимо для того, чтобы поглощение в земной атмосфере было в обоих случаях одинаковым). Американским ученым показалось, что полосы усилены, и они даже объявили, что кислород и водяной пар обнаружены.

Начиная с середины 20-х годов поисками кислорода в атмосфере Марса занялись астрономы обсерватории Маунт Вилсон в США У. Адамс и Т. Дэнхем. Они использовали для этой цели эффект Доплера; при приближении планеты к нам все линии в ее спектре сдвигаются к фиолетовому концу, при ее удалении — к красному концу. В 1934 г. наблюдения проводились на крупнейшем в то время телескопе мира — 100-дюймовом рефлекторе, снабженном дифракционным спектрографом. Были выбраны моменты, когда Марс приближался к Земле со скоростью 14 км/сек и когда он удалялся со скоростью 12,5 км/сек. Детальная обработка спектрограмм не обнаружила даже небольшого изменения профилей теллурических линий кислорода, которые можно было бы приписать марсианской компоненте. Отсюда Дэнхем сделал вывод, что количество кислорода в атмосфере Марса не может превышать 0,15% от его содержания в атмосфере Земли. В переводе на абсолютные единицы это давало как верхний предел 2,5 м-атм.

Длительное время оценка Дэнхема была единственной. Она вошла во все учебники и популярные книги по астрономии того времени. Но, увы, многие трактовали ее превратно, утверждая, что Дэнхем обнаружил кислород на Марсе в количестве 2,5 м-атм. На самом деле он его не обнаружил и на основании этого вывел свою оценку верхнего предела содержания этого газа.

Спустя двадцать лет, в 1956 г., американский астроном Р. Ричардсон на том же 100-дюймовом телескопе обсерватории Маунт Вилсон и супруги Кисс и Корлисс на горизонтальном телескопе со спектрографом (Гавайские острова) повторили попытку обнаружить кислород и водяной пар в спектре Марса и снова получили отрицательный результат. В 1964 г. Х. Спинрад, Г. Мюнч и Л. Каплан, повысив точность наблюдений, получили (из тех же соображений, что и Т. Дэнхем за 30 лет до них) верхний предел содержания кислорода 70 см-атм.

Лишь в 1968 г. М. Белтону и Д. Хантену удалось обнаружить в атмосфере Марса признаки молекулярного кислорода по полосе А в красной части спектра. Они оценили его содержание в 20 см-атм, т. е. в 8000 раз меньше, чем в земной атмосфере. Если эта оценка верна, то доля кислорода в марсианской атмосфере составляет 0,3%.

В конце 1971 г. две группы американских астрономов независимо измерили содержание молекулярного кислорода в атмосфере Марса по появлению доплеровских «спутников» у полосы А. Количество кислорода было найдено 10 см-атм или 0,13% по отношению к CO_2 . Одновременно «Маринер-9» обнаружил линии атомарного кислорода в ультрафиолетовой части спектра.

Не менее драматичной была история поисков в атмосфере Марса водяного пара. Оптимистичные выводы исследователей 20-х гг. сменились отрицательным результатом Адамса и Дэнхема, которые нашли в 1937—1941 гг., что верхний предел содержания водяного пара в атмосфере Марса не превосходит 40 микрон осажденной воды. Иначе говоря, если бы весь водяной пар, содержащийся в марсианской атмосфере, пролился дождем на поверхность планеты, то слой осадков составил бы 40 микрон.

Многие ученые пытались подсчитывать содержание водяного пара теоретически, исходя из наличия на Марсе утренних туманов (Г. Юри), скорости испарения полярных шапок и образования ледяных кристаллов (А. И. Лебединский и Г. И. Салова), геохимических процессов с участием воды (Дж. Адамчик) и др. Результаты получались самые разнообразные: от 1 до 60 микрон осажденной воды.

Слово было за инфракрасной спектроскопией. Пять групп исследователей решали эту задачу в 60-х годах и получили более близкие между собой результаты. Содержание водяного пара по их оценкам колеблется от 5 до 40 микрон осажденной воды, составляя в среднем 15 микрон. Это в 1000 раз меньше, чем содержание паров воды в земной атмосфере.

В дальнейшем удалось установить, что расхождения между результатами отдельных исследователей не случайны, а отражают суточные и сезонные колебания влагосодержания марсианской атмосферы. Наибольшее содержание паров воды в атмосфере наблюдается весной и осенью, наименьшее — летом и зимой. Утром и вечером водяного пара в атмосфере Марса больше, чем днем.

Исследования с помощью советских и американских космических аппаратов типа «Марс» и «Маринер» в 1969—1974 гг. подтвердили и во многом уточнили эти результаты. Об этом мы расскажем ниже.

Таким образом, кислород и водяной пар составляют лишь доли процента общего состава марсианской атмосферы, азот — вряд ли более двух-трех процентов, аргон — около одного-двух процентов. Вся остальная часть атмосферы Марса состоит из углекислого газа.

Температурный режим планеты

Первые измерения температуры Марса с помощью термоэлемента, помещенного в фокусе телескопа-рефлектора, проводились еще в начале 20-х гг. Этот метод основан на том, что излучение планеты резко разделяется на две составляющие: отраженное ею излучение Солнца и собственное излучение планеты, определяемое ее температурой. Практически разделить их нетрудно, так как отраженное излучение сосредоточено в основном в видимом участке спектра, а собственное — в инфракрасном. С помощью фильтров обе составляющие разделяют и по инфракрасной составляющей вычисляют температуру планеты.

Измерения В. Кобленца и К. Лампланда в 1922 г. дали среднюю температуру поверхности Марса 245°K (-28°C), Э. Петтит и С. Никольсон получили в 1924 г. 260°K (-13°C). Более низкое значение получили в 1960 г. У. Синтон и Дж. Стронг: 230°K (-43°C). Нужно иметь, однако, в виду, что в 1960 г. Марс был дальше от Солнца, чем в 1922 и 1924 гг.

Позднее, в 50-е и 60-е гг. были накоплены и обобщены многочисленные измерения температур в различных точках поверхности Марса, в разные сезоны и времена суток. Из этих измерений следовало, что днем на экваторе температура может достигать (в перигелии) до 300°K ($+27^{\circ}\text{C}$), но уже к вечеру она падает до нуля, а к утру до 223°K (-50°C). На полюсах температура может колебаться от $+10^{\circ}\text{C}$ в период полярного дня до очень низких температур во время полярной ночи. Каким именно, определить описанным выше методом было невозможно, так как он малочувствителен к низким температурам. Кроме того, ночное полушарие Марса с Земли можно наблюдать лишь частично, а области, где время ближе к полуночи, вовсе ненаблюдаемы. Их температуры были измерены лишь в 1969—1974 гг. с помощью космических аппаратов (см. ниже).

В 1956 г. к измерению температур был применен новый метод — радиоастрономический. Марс, как и всякое нагретое тело, испускает не только инфракрасное излучение, но и более длинноволновое, лежащее в радиодиапазоне. Его принято называть тепловым радиоизлучением, в отличие от нетеплового, связанного с различными электромагнитными и плазменными процессами. Измеряя поток теплового радиоизлучения, можно определить температуру планеты.

Первые такие измерения выполнили К. Майер, Т. Мак Каллаф и Р. Слонейкер в 1956 г. Они получили среднюю температуру поверхности Марса 218°K , т. е. заметно ниже, чем по инфракрасному излучению. Из многочисленных последующих измерений лишь два-три дали столь же высокие значения, как измеренные по инфракрасному излучению, а большинство значений средней температуры поверхности Марса по радиоизмерениям заключено в пределах от 162 до 225°K . Измерения, проведенные в последние годы с космических кораблей, показали, что на Марсе могут наблюдаться и еще более низкие температуры, достигающие до 140°K — ниже точки замерзания углекислого газа. Это открытие имело важнейшее значение для суждения о природе полярных шапок Марса.

Многочисленные ряды измерений радиотемператур Марса выполнены советскими учеными А. Д. Кузьминым, Ю. Н. Ветухновской, Б. Я. Лосовским, Б. Г. Кутузой и другими. Во время великого противостояния 1971 г., по их измерениям, средняя температура Марса составляла 198°K .

Нужно иметь в виду, что радиоизмерения по самой природе радиоволн могут относиться не к поверхности, а к некоторому слою на глубине в десятки сантиметров и более. Радиоволны способны проникать сквозь слой почвы толщиной в несколько раз большей, чем длина волны. Поэтому сантиметровые волны дают нам температуру слоя, лежащего на большей глубине, чем миллиметровые, а дециметровые — еще более глубокого.

Советские ученые Ю. Н. Ветухновская, А. Д. Кузьмин и Б. Я. Лосовский выполнили анализ распределения температуры поверхности Марса с глубиной и нашли, что когда Марс далек от Солнца, температура сначала

падает с глубиной (иногда на $15-20^{\circ}$), а потом начинает расти. Минимальная температура соответствует глубине около метра. Во время великого противостояния, когда Марс расположен ближе к Солнцу, слоя с минимальной температурой уже не существует, температура быстро достигает почти постоянного значения, сохраняющегося до глубин в 5—6 м.

Неудивительно, что радиотемпературы оказались ниже дневных инфракрасных. Последние относятся к самой поверхности Марса, где днем всегда теплее, чем на той глубине, о которой нам рассказывают радиоволны. Но и инфракрасные температуры, как мы видели, показывают большое различие и значительные суточные и сезонные колебания. Причина этого состоит в том, что атмосфера Марса сильно разрежена и неспособна удерживать тепло, накопленное в теплое время года и суток. Водяной пар, лучше всего сохраняющий и передающий тепло, присутствует там в ничтожных количествах. Поэтому климат Марса так суров.

Многие ученые, используя измеренные температуры планеты и теорию климата, пытались построить карты изотерм (линий равной температуры) для Марса, как это делают метеорологи для Земли. Однако ошибкой этих исследователей (С. Гесс, Ф. Джиффорд) было то, что все использованные ими температуры были дневные, т. е. наибольшие из возможных. Поэтому к таким картам надо относиться с некоторой осторожностью. Тем не менее за последние годы климатология Марса сделала немалые успехи и скоро мы, вероятно, будем иметь столь же подробные сведения о климате различных районов на Марсе, как и на нашей Земле.

Различие температур дня и ночи, полярных и тропических районов, зимы и лета приводит к возникновению ветров, имеющих подчас скорости $40-50$ м/сек. Система воздушной циркуляции на Марсе изучается сейчас различными методами многими учеными. Важный вклад в развитие теории циркуляции марсианской атмосферы внес советский ученый, специалист по физике атмосферы Г. С. Голицын. Он показал, при каких условиях в атмосфере Марса могут возникать ветры, имеющие силу урагана, и формироваться смерчи. А к чему могут привести сильные ветры, мы скоро узнаем.

Марсианские материки и «морья»

Вопрос о природе марсианских материков (светлых областей) и «морей» (темных пятен) встал перед астрономами давно. Сначала в их распоряжении не было ничего, кроме визуальных наблюдений. Потом были развиты более объективные методы фотографической фотометрии, позволяющие измерять отражательную способность (альбедо) и методы колориметрии, дающие возможность получать цветовые характеристики поверхности планет, в частности, марсианских материков и «морей». Большая заслуга в развитии этих методов принадлежит советским астрономам-фотометристам В. Г. Фесенкову, Н. П. Барабашову, В. В. Шаронову, Н. Н. Сытинской и др.

Мы помним, что еще Г. А. Тихов в 1909 г. применил фотографирование Марса со светофильтрами, открыв свои три эффекта, два из которых непосредственно относились к цветовым свойствам марсианских образований. Но выводы Тихова основывались на чисто качественном сравнении снимков.

Значительно более совершенный метод состоит в построении (по измерениям с пятью-шестью светофильтрами) кривой спектральной отражательной способности марсианских образований. Еще более надежный способ получить такую кривую — снять и измерить спектр избранной области планеты. Такой способ называется спектрофотометрическим. Он позволяет выявить мелкие, но иногда очень важные детали на спектральной кривой, по которым можно судить о присутствии или отсутствии того или иного вещества в наружном покрове планеты.

Первые кривые спектральной отражательной способности материков и «морей» Марса по фотографиям со светофильтрами получил Н. П. Барабашов в 1933 г., а по спектру — Е. Л. Кринов в 1935 г. В дальнейшем такие исследования были выполнены Н. Н. Сытинской и систематически проводились на Харьковской обсерватории под руководством Н. П. Барабашова. Материки Марса по своим спектральным характеристикам очень напоминали пески среднеазиатских пустынь (рис. 8). Представление о материках Марса как о песчаных пустынях получило широкое распространение.

Чтобы иметь возможность охарактеризовать цвет небесного тела одним числом, астрономы давно уже ввели понятия показателя цвета и цветового избытка. Первая величина показывает, насколько изучаемый объект краснее (показатель цвета положителен) или синее (показатель отрицателен), чем белые звезды спектрального класса А0. Вторая величина — цветовой избыток — дает такое же сравнение с цветом Солнца.

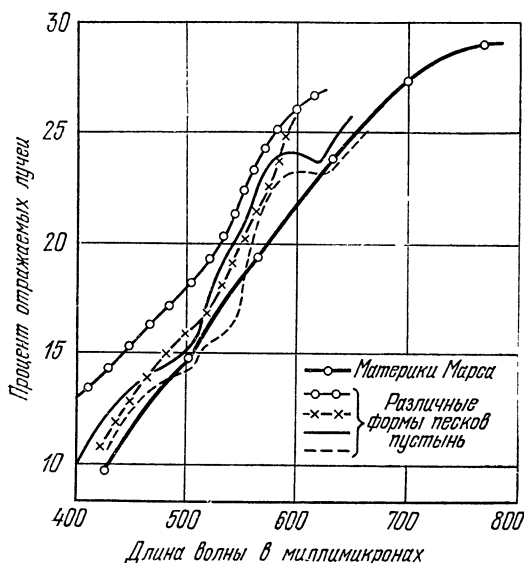


Рис. 8. Кривые спектральной отражательной способности материков Марса и песков земных пустынь (по Н. Н. Сытинской и Е. Л. Кринову).

Поскольку Марс, как и всякая планета, светит отраженным светом Солнца, даже в случае, если бы он сам был белый, его цвет казался бы нам желтоватым, соответствующим цвету Солнца. Показатель цвета Солнца равен $+0,5$, поэтому целесообразно использовать понятие цветового избытка, равного разности показателей цвета планеты и Солнца. Для Марса он равен примерно $+1,0$. Эта величина и характеризует собственный цвет планеты или ее деталей.

Во время великого противостояния 1956 г. В. В. Шаронов определил значения цветового избытка отдельно для материков и морей Марса, получив $+1,09$ и $+0,89$ соответственно. Таким образом, не только материки, но и моря оказались красноватыми по отношению к белому экрану. Их зеленоватый оттенок, представлявшийся при визуальных наблюдениях, был лишь кажущимся, вызванным эффектом цветового контраста с еще более красными морями.

В. В. Шаронов сравнил цветовые свойства материков Марса и песков земных пустынь. Оказалось, что марсианские покровы в среднем гораздо краснее земных песков, хотя самые красные образцы тех и других имеют примерно одинаковый цветовой избыток ($+1,20$). Но среди песков земных пустынь есть и очень белесые ($+0,20$), а в материках Марса цветовой избыток не бывает меньше $+1,0$, в морях же он не меньше $+0,82$.

Такую интенсивно красноватую окраску имеют гидраты окислов железа. Тщательные измерения поляризации света материков, выполненные в 1948—1951 гг. О. Дольфюсом, показали, что их поверхность имеет те же свойства, что и лимонит ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), один из бурых железняков, мелкий порошок которого известен под названием охры. Колориметрические наблюдения В. В. Шаронова подтверждали этот вывод. Наконец в середине 60-х годов исследование спектральной отражательной способности материков Марса в видимых и инфракрасных лучах вплоть до длины волны 3 микрона позволило советскому астроному В. И. Морозу и группе американских ученых независимо прийти к тому же выводу.

Но уже в 1970 г., по образному выражению профессора Д. Я. Мартынова, «эра лимонита» кончилась. Лимонит оказался лишь небольшой добавкой к обычным силикато-глиноземным породам, своеобразной пудрой, окрашивающей эти породы в интенсивно-красноватый цвет. О том, как это удалось выяснить, мы расскажем ниже.

Какова же была природа «морей» Марса? В том, что они не являются настоящими морями, никаких сомнений не было. Альbedo земных морей очень мало, гораздо меньше, чем у «морей» Марса. Всякий, кто летал над морем, знает, что сверху оно кажется темным.

Правда, море способно как зеркало отражать прямые лучи Солнца, и в направлении отраженного луча мы видим яркие блики. Но подобных бликов от «морей» Марса никто не наблюдал, хотя можно было заранее рассчитывать, когда именно и от каких «морей» они могли бы быть видны. Для этого нужно, чтобы выполнилось хорошо известное условие: угол падения должен быть равен углу отражения.

Еще в 60-х годах прошлого века французский астроном Э. Лизэ, наблюдая сезонные изменения интенсивности и окраски «морей», предложил гипотезу, что «морья» — это области, покрытые растительностью. Действительно, весной и особенно летом (марсианским, разумеется) моря Марса темнеют и приобретают зеленовато-голубоватую окраску. Осенью она становится коричнево-бурой, а зимой сероватой. Это напоминало весеннее распускание и осеннее увядание растительности. Еще интереснее было то, что по весеннему полушарию Марса проходила как бы волна потемнения, начинавшаяся от границ тающей полярной шапки и распространявшаяся к экватору по мере ее таяния. Возникла стройная гипотеза о том, что талые воды, образующиеся при таянии полярной шапки (в том, что шапки состоят из замерзшей воды, никто тогда не сомневался), увлажняют почву и это создает благоприятные условия для распускания растительности.

Но гипотеза нуждалась в проверке. Ученые предложили два способа такой проверки. Во-первых, надо было поискать в спектре «морей» Марса темную полосу хлорофилла — красящего вещества (пигмента) земных растений, расположенную в красной части спектра. В начале нашего столетия такие поиски были предприняты на обсерватории Ловелла во Флагстаффе В. Слайфером, а затем на других обсерваториях мира. Увы, поиски оказались безрезультатными.

Второй путь состоял в следующем. Тогда же, в начале века, американский физик Р. Вуд изготовил пластинки, чувствительные к ближним инфракрасным лучам, и получил множество снимков различных пейзажей в этих лучах. Растения на этих снимках казались белыми, как бы осыпанными снегом. Причина этого «эффекта Вуда» состояла в том, что растения хорошо отражают инфракрасные лучи. Другими словами, их спект-

ральная отражательная способность в этих лучах весьма высока.

Как мы помним, еще У. Райт в 1924 г. получил снимки Марса в инфракрасных лучах. Если бы темные области Марса («морья») были покрыты растительностью, на этих снимках они бы выглядели белыми или по крайней мере светлыми. Но как на снимках Райта, так и на всех последующих, полученных в инфракрасных лучах, «морья» выглядели еще более темными, чем в зеленых или красных лучах. Эффект Вуда у них отсутствовал.

С середины 40-х годов нашего столетия растительную гипотезу горячо защищал и развивал член-корреспондент Академии наук СССР Г. А. Тихов. Он организовал в Алма-Ате специальное учреждение — Сектор астроботаники Академии наук Казахской ССР, которое занялось исследованием и сравнением спектральных свойств «морей» Марса и земных растений.

Сторонники растительной гипотезы проявили немало изобретательности для ее защиты. Опираясь на примеры высокой приспособляемости земных растений и животных к суровым условиям внешней среды, они доказывали, что и в условиях Марса жизнь возможна. Ставили даже лабораторные эксперименты по выращиванию растений и размножению бактерий в искусственно созданных «марсианских» условиях. Эксперименты дали положительные результаты: растения выдерживали «марсианский» холод и низкое атмосферное давление, бактерии размножались в «марсианской» атмосфере. Правда, при постановке этих экспериментов принималось сильно завышенное значение давления у поверхности — 85 миллибар, в 15 раз больше действительного, да и состав атмосферы Марса был тогда неизвестен. Но главное было не в этом.

Получилось так, что вопрос о природе «морей» Марса оказался тесно связанным с проблемой жизни на этой планете. Между тем, это два совершенно разных вопроса. Доказательство возможности жизни в условиях Марса еще не означает, что она там действительно существует.

Вершиной торжества растительной гипотезы явилось открытие в 1956—1958 гг. американским ученым У. Синтоном в спектре «морей» Марса трех полос

в инфракрасной части, соответствующих органическим соединениям (на длинах волн 3,43, 3,56 и 3,65 микрон).

После этого, спустя примерно пять лет, начался закат этой привлекательной, но недостаточно обоснованной гипотезы. Еще в 50-х годах ее раскритиковал известный советский астроном академик В. Г. Фесенков. С тех пор было установлено, что плотность атмосферы Марса в 10—15 раз ниже, чем предполагалось ранее. Содержание кислорода в ней оказалось ничтожным (доли процента). Истинный цвет «морей», согласно

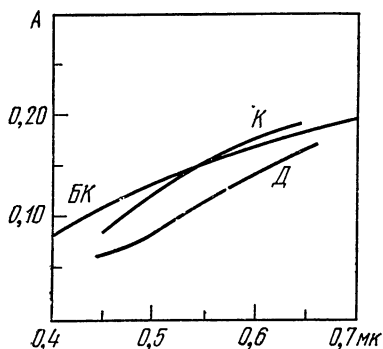


Рис. 9. Кривые спектральной отражательной способности «морей» Марса: БК — Н. П. Барабашов и И. К. Коваль, К — И. К. Коваль, Д — О. Дольфус.

многочисленным измерениям Н. П. Барабашова, И. К. Коваля и их сотрудников, оказался красноватым: они лишь казались зелеными из-за эффекта цветового контраста с более красными материками. На снимках американской космической станции «Маринер-4», подлетевшей к Марсу в июле 1965 г. и передавшей ряд изображений его поверхности, «моря» ничем в принципе не отличались от материков (это подтвердили и снимки других космических станций).

Наконец, полосы Синтона — главный аргумент астроботаников — оказались принадлежащими... парам тяжелой воды в земной атмосфере (т. е. воды, в состав которой входит тяжелый водород — дейтерий). Это признал и сам Синтон.

Еще позднее, в 1969 г., растительная гипотеза получила новый сокрушительный удар: полярные шапки Марса оказались состоящими не из воды в виде инея, снега или льда, а из замерзшей углекислоты. Вся стройная картина расцветания растений по мере получения ими живительной влаги от тающей полярной шапки потонула под собой почву и рухнула.

Отвлечемся от печальной судьбы растительной гипотезы и посмотрим, какими объективными данными о при-

роде «морей» Марса располагали астрономы в докосмический период.

Колориметрические наблюдения Н. П. Барабашова, И. К. Коваля, В. В. Шаронова, Н. Н. Сытинской показывали, что альbedo «морей» сначала, как и у материков, растет с длиной волны от фиолетовых лучей к красным, хотя и медленнее, чем у материков, но начиная с зеленого участка спектра этот рост замедляется, и поэтому контраст «морей» с материками в красных лучах значительно возрастает (рис. 9).

Многочисленные поляризметрические наблюдения, проведенные на протяжении многих лет О. Дольфюсом, давали больше возможностей для суждения о природе отражающей поверхности. Дело в том, что характер изменения степени поляризации с углом фазы планеты (или отражающей поверхности) сильно зависит от состава и структуры поверхности. У плотных пород вид кривой отличается от ее вида в случае раздробленных порошков. Поведение поляризационных кривых в разных участках спектра зависит и от состава вещества поверхности (рис. 10).

Подводя итоги своим многолетним исследованиям, О. Дольфюс сделал вывод, что поверхность марсианских «морей», как и поверхность материков, покрыта мелко-раздробленным веществом, однако более темным, чем вещество материков, или же смесью этого вещества с другим, более темным.

Этим результатом можно было бы удовлетвориться и заняться подбором подходящего вещества в лабораторных экспериментах, если бы не сезонные изменения альbedo, цвета и, как выяснилось из тех же поляризметрических

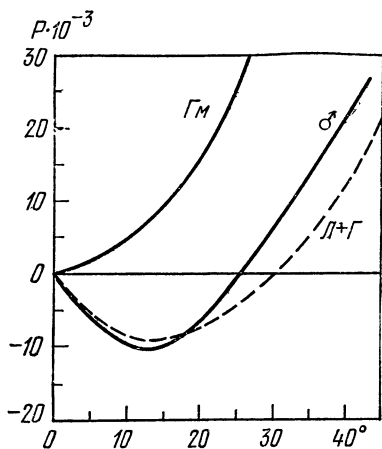


Рис. 10. Поляризационные кривые для материков Марса (σ) и порошков минералов, Γ_m — гематит, $\text{Л} + \text{Г}$ — смесь лимонита и гетита (по О. Дольфюсу).

наблюдений Дольфюса, поляризации «морей». Наибольшие отклонения от «средней» поляризационной кривой наступали весной и держались до конца лета соответствующего полушария.

Как только ни пытались астрономы объяснить сезонные изменения в «морях». Шведский астроном Сванте Аррениус еще в 1911 г. предложил гипотезу о том, что «морья» Марса подобны земным такырам — глинистым пустыням, покрытым соляными корками. При увлажнении они намокают и темнеют. Но, как показал Дольфюс, кривая поляризации для такыров резко отличается от наблюдаемой на Марсе.

В 1947 г. французский астроном А. Довилье изучил ряд кристаллических минералов, приобретающих определенную окраску под действием ультрафиолетовых лучей и теряющих ее при увлажнении парами воды. Дольфюс отклонил гипотезу Довилье по тем же причинам; к тому же максимум потемнения не совпадал с максимальным содержанием водяных паров в атмосфере Марса.

Уже в 1965 г. польский астроном Р. Смолуховский предложил иной вариант гипотезы Довилье: породы в «морях» окрашиваются солнечными ультрафиолетовыми лучами, причем степень этого окрашивания зависит от температуры и возрастает в теплое время года. Этот механизм не противоречит данным поляриметрии, но требует резких усиления контрастов «морей» с материками в периоды хромосферных вспышек на Солнце, чего не наблюдается.

Американский астроном Д. Мак Лафлин в 1954 г. предложил «вулканическую» гипотезу, согласно которой «морья» сложены вулканическим пеплом, выбрасываемым при извержениях и рассеиваемых ветрами, дующими в постоянных направлениях. Предположение Мак Лафлина об активном вулканизме на Марсе (поддержанное советским астрономом С. К. Всехсвятским) получило полное подтверждение в ходе космических полетов последних лет, его предположение о наличии на планете отложений вулканического пепла — тоже, но не в таких масштабах, как это предполагал Мак Лафлин.

Американский астроном Дж. Койпер в 1957 г. выдвинул предположение, что темные области на Марсе —

это поля застывшей лавы, аналогичные лунным «морям» и (какое предвидение!) темным пятнам на Меркурии *). Причину сезонных перемен в их окраске Койпер видел в том, что воздушные течения, имеющие сезонный характер, в одни сезоны наносят пыль и песок на поверхность лавы, а в другие — сдувают их.

Критикуя гипотезу Койпера с точки зрения ее соответствия наблюдениям, Дольфус выдвинул два возражения: во-первых, поляриметрия не показала существенных различий в гладкости материков и «морей»; во-вторых, у гладких поверхностей типа застывшей лавы поляризация кривая имеет иной вид, чем у «морей» Марса.

С лавовыми покровами Койпера получилось так же, как с отложениями пепла Мак Лафлина: фотографии с космических аппаратов показали, что они действительно имеются в различных местах поверхности Марса, но вовсе не устилают сплошь территорию марсианских «морей».

Наконец, в 1967 г. американские астрономы Дж. Поллак и К. Саган предложили оригинальную гипотезу «сдувания», удовлетворявшую всем фотометрическим и поляриметрическим наблюдениям и не требовавшую наличия в морях каких-то особых покровов. Идея этой гипотезы состоит в том, что «морья» лежат в среднем выше материков и на них будут оседать более крупные зерна пыли (100—200 микрон), чем в светлых областях. Это и порождает различие в светлоте (слой мелкой пыли всегда светлее). Весной и летом изменение метеорологических условий вызывает в свою очередь измерение скорости зональных ветров и, как следствие, увеличение среднего размера частиц в темных областях и их потемнение. Однако гипотеза Поллака и Сагана не получила подтверждения в ходе исследований марсианского рельефа: «морья» оказались вовсе не возвышенностями, а скорее областями, переходными от возвышенностей к низинам. О дальнейших попытках выяснить природу «морей» мы расскажем ниже.

*) Фотографирование поверхности Меркурия с близкого расстояния американской космической станцией «Маринер-10» в марте 1974 г. показало, что он очень похож на Луну, хотя площадь лавовых «морей» на нем значительно меньше.

Макрорельеф «красной планеты»

С давних пор Марс, в отличие от Земли и Луны, считался гладким, без резко выраженного рельефа, без гор и впадин. Основанием для такого заключения были фотометрические наблюдения, показывавшие, что планета отражает свет Солнца по закону Ламберта, т. е. как гладкий матовый шар. Правда, это относилось лишь к материкам, но ведь они покрывали большую часть планеты. Только у южного полюса была замечена возвышенность, получившая название гор Митчелла. Она проявляла себя тем, что при таянии южной полярной шапки здесь всегда оставался белый островок, отделявшийся от шапки (общеизвестно, что в горах снега и льды тают позднее, чем в низинах).

Первый удар по представлению о «гладком Марсе» нанесли фотографии «Маринера-4», переданные на Землю в июле 1965 г. Ученые воочию увидели на Марсе горы, в том числе кольцевые горы — кратеры, подобные лунным. Значит, планета имела рельеф. Но получить полное представление о нем по 20 снимкам «Маринера-4», охватывавшим едва один процент поверхности Марса, было невозможно.

На помощь пришла радиолокация. В основе этого метода исследования небесных тел лежит получение отраженного планетой радиосигнала, посланного с Земли. Для посылки и приема сигналов применяются мощные радиотелескопы, для их усиления и анализа — сложные электронные устройства. За последние годы в этой области достигнут значительный прогресс.

Как нетрудно понять, время прохождения сигнала до Марса и обратно прямо пропорционально расстоянию до планеты. Если бы поверхность Марса была плоская и располагалась перпендикулярно к лучу зрения, а Марс и Земля были бы неподвижны, то все было бы просто: радиолуч достигал бы возвышенности раньше, чем низины, и приходил бы обратно скорее как раз на время, необходимое лучу, чтобы пройти двойную разность высот между ними. Поскольку скорость радиоволн, как и света, равна 300 000 км/сек, а разности высот на Марсе должны измеряться немногими километрами, времена относительного запаздывания сигнала будут составлять несколько микросекунд. Но современная радиоэлектрон-

ная техника позволяет измерять и такие промежутки времени.

Однако Марс — шарообразный, он движется вокруг Солнца и вращается вокруг своей оси. Такие же движения совершает и наша Земля, а вместе с ней — радиотелескоп, передающий и принимающий сигналы. Поэтому время прохождения сигнала туда и обратно все время будет меняться.

К счастью, эти изменения происходят плавно и по известному закону, поэтому учесть их не представляет особого труда. Главная трудность состояла в другом — в том, чтобы выделить на поверхности Марса отдельные малые участки и получать отражения от каждого из них в отдельности. Иначе говоря, требовалось повысить разрешающую способность радиолокационного «лота».

Один из способов добиться этого состоял в том, что всегда изучалось отражение от точки в центре диска планеты, которая, как легко сообразить, является ближайшей к Земле. Ясно, что отражение от нее придет первым. К сожалению, мы еще не можем посылать сигнал в виде узкого луча (шириной хотя бы не более 100 км). Радиолуч с удалением от Земли расширяется и захватывает весь Марс, отражаясь сначала от центральной точки (обращенной к Земле), потом от окружающей ее узкой кольцевой зоны, потом от более широкой зоны и т. д. Но для нас в данном случае важен лишь самый первый отраженный сигнал. Поскольку Марс довольно быстро вращается вокруг оси, за ночь (точнее, за время, пока Марс находится над горизонтом станции наблюдения, ибо радиолокацию планеты можно производить и днем) через центр диска пройдут различные точки поверхности планеты, расположенные на одной ее параллели. Регистрируя время запаздывания сигнала, мы получим как бы разрез рельефа вдоль этой параллели.

Именно такой метод применил в 1967 г. американский радиоастроном Дж. Петтенджил, получив профиль марсианского рельефа вдоль параллели с северной широтой 21°. Оказалось, что помимо отдельных горных хребтов, возвышенностей, долин, Марс имеет макро-рельеф, т. е. возвышенности и низменности большого протяжения, в тысячи километров, с перепадом высот между ними в 12—13 км.

В этом не было ничего удивительного. На Земле перепад высот от вершин Гималаев до дна Марианской впадины в Тихом океане достигает 20 км, а расстояние между ними — 6 тысяч км.

В дальнейшем измерения профилей рельефа Марса радиолокационным методом были проведены неоднократно советскими и американскими учеными, на разных марсианских широтах. Они позволили составить общую картину макрорельефа планеты в тропической зоне.

Но этот метод не может быть применен ко всей планете. Из-за наклона оси Марса на угол 65° к плоскости его орбиты, через центр диска в разное время могут проходить области, расположенные внутри тропического пояса планеты, т. е. между широтами $+25^\circ$ и -25° . Области более высоких широт никогда не могут проходить через центр диска Марса. Казалось, что мы не сможем получить информацию об их макрорельефе.

Однако это было не так. Для изучения рельефа этих областей вскоре были применены еще два метода. Один состоял в использовании космических аппаратов, проходивших вблизи Марса или становившихся его спутниками, для наблюдений «радиозатмений» излучения спутника диском Марса (об этом мы расскажем несколько позже). Другой метод, очень простой и не требующий серьезных затрат, требовал только наличия мощного телескопа с хорошим инфракрасным спектрометром. Этот метод состоял в измерении эквивалентных ширин линий CO_2 в спектре отдельных областей Марса.

Как мы уже знаем, углекислый газ составляет более 90% марсианской атмосферы. Поэтому можно считать парциальное давление CO_2 пропорциональным полному давлению у поверхности Марса. Эквивалентная ширина полосы CO_2 в спектре планеты пропорциональна содержанию этого газа на пути луча и общему давлению, которое в свою очередь пропорционально содержанию CO_2 в вертикальном столбе единичного сечения. По формулам теоретической спектроскопии и по найденной в лаборатории зависимости эквивалентной ширины полосы от содержания газа на пути луча и давления (кривая, выражающая эту зависимость, называется кривой роста) можно по эквивалентной ширине полосы CO_2 определять давление у поверхности. Очевидно, что на

возвышенностях давление будет ниже, а в низинах выше. Переход от разности давлений к разности высот не представляет труда. Нуль-пункт шкалы высот определяется из радиолокационных наблюдений. Этот чрезвычайно остроумный метод был успешно применен американскими астрономами М. Белтоном и Д. Хантеном в 1969 г. Им удалось построить карту линий равных высот для значительной части марсианской поверхности. В дальнейшем этот метод применили другие ученые, в частности, советский астроном В. И. Мороз. Наиболее успешно этот метод применялся на космических аппаратах «Маринер-6», «Маринер-7», «Маринер-9», «Марс-3» и «Марс-5».

Сочетание всех трех методов показало хорошее согласие их между собой и позволило составить ясное представление о рельефе Марса. Оказалось, что светлая область Hellas — гигантская котловина, расположенная на 4,5 км ниже среднего уровня поверхности, а в областях Tharsis и Claritas мы имеем, наоборот, плоскогорье высотой в 7 км. Светлые области Марса (материки) могут быть и плоскогорьями, и котловинами, тогда как темные области чаще всего располагаются в местах, где наблюдается перепад высот, т. е. на склонах. Какое значение имеет это обстоятельство для объяснения природы морей, будет выяснено ниже.

Итак, концепция «гладкого Марса» уступила место представлению о планете, обладающей сложным рельефом. Фотографии с космических кораблей еще более убедили нас в этом.

Внутреннее строение Марса

На первый взгляд может показаться, что мы вообще не можем судить о внутреннем строении Марса: у нас нет о нем даже таких косвенных сведений, какие дают нам показания сейсмографов о строении земных недр. Однако такое представление будет неправильным. Наука располагает целым набором физических сведений, которые если не определяют полностью картину внутреннего строения Марса, то во всяком случае позволяют построить ее весьма правдоподобную модель.

В самом деле, нам известны масса Марса и его средняя плотность. Далее, мы знаем скорость вращения пла-

неты и ее полярное сжатие. Из анализа движения естественных, а теперь и искусственных спутников Марса можно получить данные о гравитационном поле планеты.

Важнейшей характеристикой гравитационного поля является гравитационный потенциал. Численно эта величина равна работе, которую надо совершить для перемещения единичной массы, находящейся в поле тяготения планеты, из данной точки в бесконечность. Потенциал однородного шара, у которого плотность убывает с расстоянием от центра одинаково во всех направлениях, равен

$$V = f \frac{M}{r},$$

где f — гравитационная постоянная, M — масса тела, r — расстояние от его центра.

Для реальных планет, форма которых значительно отличается от шарообразной, а распределение масс внутри может носить весьма сложный характер, применяется разложение гравитационного потенциала по сферическим функциям. Коэффициенты этого разложения определяются из наблюдений движения спутников планеты. Они характеризуют ее фигуру и распределение масс.

Через коэффициенты разложения потенциала определяются моменты инерции планеты. Как известно, момент инерции однородного шара относительно любой из его осей равен

$$A = B = C = 0,4 MR^2.$$

Для реальной планеты главные моменты инерции не равны друг другу, а коэффициенты перед произведениями Ma^2 , Mb^2 и Mc^2 меньше 0,4 (a , b , c — полуоси эллипсоида планеты). Чем меньше эти коэффициенты (называемые безразмерными моментами инерции), тем сильнее отличается распределение масс в недрах планеты от однородного. Так, у Земли безразмерный момент инерции относительно ее оси вращения равен 0,33.

Величина $H = (C - A)/C$ называется динамическим сжатием планеты, в отличие от ее оптического сжатия, определяемого отношением геометрических полуосей эллипсоида. Динамическое сжатие Марса, полученное по данным «Маринера-9» (стр. 12), равно 0,0052, в хорошем согласии с более ранними определениями по движению

спутника Марса Фобоса. Оптическое сжатие планеты больше и достигает 0,0074.

Отличие фигуры Марса от эквипотенциальной поверхности (поверхности равного давления) должно приводить к систематическому «перетеканию» атмосферных масс с экватора на полюсы. К чему это может привести, мы увидим дальше.

Безразмерный момент инерции Марса, определенный по его динамическому сжатию, равен 0,375. Иначе говоря, Марс по своему внутреннему строению ближе к однородному шару, чем Земля. Это значит, что ядро Марса не должно быть столь большим, как земное, и составляет меньшую долю его массы (на долю земного ядра приходится 32% массы Земли). О том же говорит средняя плотность Марса: $3,89 \text{ г/см}^3$, почти в 1,5 раза меньше средней плотности Земли.

Помимо динамических данных в распоряжении ученых есть и некоторые геохимические данные. Так, обнаружение спектральными методами в атмосферной пыли 50% кремнезема (SiO_2) указывает на то, что на поверхности Марса преобладают легкие кислые породы, которые были в свое время выплавлены и поднялись наверх в ходе расплавления, а затем химической дифференциации марсианских недр. С учетом всего этого можно, опираясь на теорию внутреннего стресса планет, построить модель Марса. Эта работа была выполнена советской исследовательницей С. В. Козловской.

В ее модели принято, что в кору Марса было выплавлено 50% всего легкого силикатического материала, содержащегося в недрах планеты (сиаль — породы, содержащие окислы кремния и алюминия, например полевошпат). Поэтому толщина коры была принята равной 100 км. В ней сосредоточено около 7% всей массы планеты.

На долю железного ядра Марса, как показывает безразмерный момент инерции, может приходиться не более 5% массы планеты. Это определяет радиус ядра — 960 км.

Остальное вещество недр Марса сосредоточено в его мантии (оболочке, окружающей ядро). Ее главной компонентой является, по-видимому, оливин — тяжелая порода, содержащая ортосиликаты магния (Mg_2SiO_4 , форстерит) и железа (Fe_2SiO_4 , fayalит). При этом доля

файалита должна быть на 15—20% больше, чем в земной мантии, чтобы объяснить «утяжеление» марсианской мантии за счет железа, не выплавившегося в ядро планеты. Средняя плотность вещества мантии Марса по этой модели $3,55 \text{ г/см}^3$, тогда как у Земли она равна $3,3 \text{ г/см}^3$.

Американский геофизик Д. Андерсон сделал другое предположение: он считает, что в ядре Марса присутствует не только никелистое железо, но и сернистое железо, например троилит FeS — минерал, часто встречающийся в метеоритах и более легкий, чем чистое железо и никель. Относительные пропорции железа, никеля, серы и кремния в ядре зависят от условий формирования Марса, в частности от температуры. Условие фазового равновесия в системе Fe—FeS показывает, что температура недр Марса при образовании ядра превышала 1000° . Предполагая, что содержание железа, никеля и серы в веществе Марса такое же, как в большинстве каменных метеоритов, Д. Андерсон получил такие результаты. Ядро составляет 12% массы Марса, а его радиус равен 1500 км. Оно содержит 63% железа, никеля, серы, входящих в состав вещества планеты. Общая доля содержания железа на Марсе 25%, тогда как на Земле она равна, по Б. Мейсону, 38,8%.

Кратеры и каньоны на Марсе

В июле 1965 г. американская космическая станция «Маринер-4» прошла от Марса на минимальном расстоянии 12 тыс. км и передала на Землю 22 снимка поверхности планеты. С первого же взгляда на этих снимках удалось различить десятки кратеров, напоминающих лунные. При первом обзоре их было обнаружено 70, затем число их возросло до 110, а после улучшения изображений путем контрастирования и устранения дефектов — даже до 300.

Кратеры Марса во многом напоминали лунные: почти тот же диапазон размеров (от 3 до 120 км), те же формы. Только вот кратеров с центральной горкой было сравнительно мало, да наблюдался явный дефицит небольших кратеров. Вначале это приписали малой разрешающей способности камер «Маринера-4», но потом это обстоятельство подтвердили снимки «Маринера-6» и «Маринера-7», камеры которых могли регистрировать кратеры до 0,5 км поперечником (рис. 11). Кроме того, очертания марсианских кратеров по сравнению с лунными казались сглаженными. Одновременно несколько ученых (в том числе и автор этой книги) объяснили это действием эрозии, в основном ветровой.

Как мы уже знаем, скорость ветра на Марсе может достигать значительных величин. Поэтому горные образования там подвергнуты прямому воздействию ветра — выветриванию. Но это еще не все: ветер переносит мелкую пыль, и удары пылинок за миллионы лет способны производить заметные разрушения.

Меньшую роль в процессах эрозии на Марсе должна играть метеоритная бомбардировка. Поверхность Луны беззащитна от ударов метеоритов любого размера, от самых крупных до мельчайших. Атмосфера Марса

надежно защищает поверхность планеты от ударов тел меньше одного сантиметра: они испаряются в марсианской атмосфере, как и в атмосфере Земли. Но большие тела, разумеется, падают на Марс и способны производить разрушения.

Следует отметить, что Марс находится (и находился) в иных условиях по отношению к метеоритной бомбардировке, чем Земля и Луна. Во-первых, он ближе к кольцу астероидов, и можно думать, что в современную

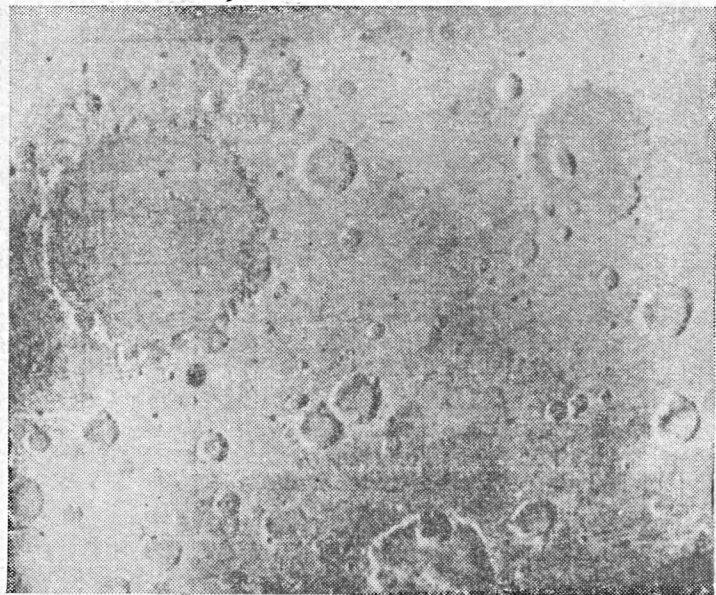


Рис. 11. Кратеры на поверхности Марса. Снимок «Маринера-6».

эпоху метеориты астероидального происхождения должны падать на Марс в большем количестве, чем на Землю и Луну. Во-вторых, в прошлом Марс находился в другой части допланетного облака и рос «в одиночку», тогда как Земля и Луна аккумулировались почти одновременно вблизи друг от друга, что могло приводить к ускорению и даже к фокусировке притяжением Земли остатков допланетного роя тел, падающих на Луну. Масса Марса — промежуточная между массами Земли и Луны,

что тоже имело значение: чем больше масса планеты, тем больше ее «зона захвата», зона вычерпывания вещества роя.

В 1969 г. «Маринер-6» и «Маринер-7» передали на Землю около 200 снимков Марса, из них 55 — с близкого расстояния: от 10 до 3,5 тыс. км. Качество этих снимков было значительно лучше, чем у «Маринера-4», и они (после соответствующей обработки) позволяли различить детали до 0,5 км.

Сравнение распределения кратеров по размерам на Марсе и на Луне (отдельно в лунных морях и горных районах) отчетливо выявило упомянутый выше дефицит мелких кратеров (меньше 5—10 км). Большинство крупных кратеров на Марсе имеет плоское дно, невысокий вал с пологими склонами, мелкие кратеры имеют преимущественно чашеобразную форму дна.

Открытие кратеров на Марсе еще острее, чем раньше, поставило перед учеными старый вопрос о происхождении лунных (а теперь и марсианских) кратеров. Как известно, в течение более ста лет конкурировали с переменным успехом две гипотезы их образования: вулканическая и метеоритная. Нередко они фигурируют в литературе под обобщенными названиями: эндогенная (эндо — внутренний) и экзогенная (экзо — внешний).

Метеоритная гипотеза имеет важное преимущество перед вулканической: она разработана с физико-математической стороны. Советский ученый К. П. Станюкович еще в 1938 г. разработал основы теории образования кратеров в результате ударов метеоритов с космическими скоростями. В 1947 г. в статье «О разрушительном действии метеоритных ударов» К. П. Станюкович и В. В. Федынский предсказали существование метеоритных кратеров на Марсе. Значительно позднее (в 1950 г.) аналогичные предсказания сделали Э. Эпик и Ф. Уиппл.

В том, что подавляющее большинство мелких кратеров на Марсе имеет метеоритное происхождение, сомнений у ученых не было. Их распределение по поверхности планеты, одинаково хаотическое на «морях» и материках, распределение по размерам (соответствующее аналогичному распределению метеорных тел), форма воронки — все указывало на то, что мы имеем здесь дело с последствиями ударов гигантских метеоритов.

Рассмотрим физическую картину явления. При ударе о поверхность планеты метеорит сначала углубляется на некоторое расстояние в почву. Но тут же, через сотые и даже тысячные доли секунды после удара, происходит взрыв: вся кинетическая энергия метеорита (10^{11} — 10^{13} эргов на грамм массы) превращается в тепло, а так как она больше удельной энергии испарения камня и железа, то сам метеорит, а также значительная часть вещества окружающей поверхности мгновенно превращается в пар. Под действием взрыва образуется выемка, происходит горизонтальный сдвиг пород по радиусам от центра взрыва, что и приводит к формированию вала кратера. Значительная часть пород при этом дробится и выбрасывается из кратера, иногда на очень большие расстояния (так образовались светлые венцы и «лучи» у некоторых лунных кратеров).

Чем крупнее кратер, тем больше в среднем его возраст, так как вероятность удара метеорита быстро уменьшается с его массой, примерно обратно пропорционально ей. На Луне кратеры сохраняются миллиарды лет, так как там нет ветровой эрозии. На Марсе все большие кратеры носят ее следы, а мелкие за достаточный срок могут быть вообще уничтожены ею. Поэтому все мелкие кратеры на Марсе недавнего происхождения.

Исследование кратеров на Марсе значительно приблизило ученых к решению проблемы их происхождения, причем с самым неожиданным результатом: подтвердилась, по-видимому, справедливость обеих конкурирующих гипотез, как метеоритной, так и вулканической. Окончательным доводом в пользу справедливости метеоритной гипотезы явилось открытие кратеров километровых размеров на Фобосе — маленьком спутнике Марса (его размеры 21×27 км), на котором нет и никогда не могло быть вулканов. В пользу справедливости вулканической гипотезы говорит анализ некоторых сложных форм кратеров на Марсе, обнаруженных уже в 1971 г. «Маринером-9». К ним относятся кратеры с несколькими концентрическими валами (рис. 12), кратеры-кальдеры*), кратные кратеры и некоторые другие. Образование таких форм от одного удара метеорита

*) Кальдеры — вулканы с широкими жерлами, образовавшимися в результате провала центральной части вулкана.

невозможно, а многократное попадание гигантских метеоритов в одно и то же место совершенно невероятно.

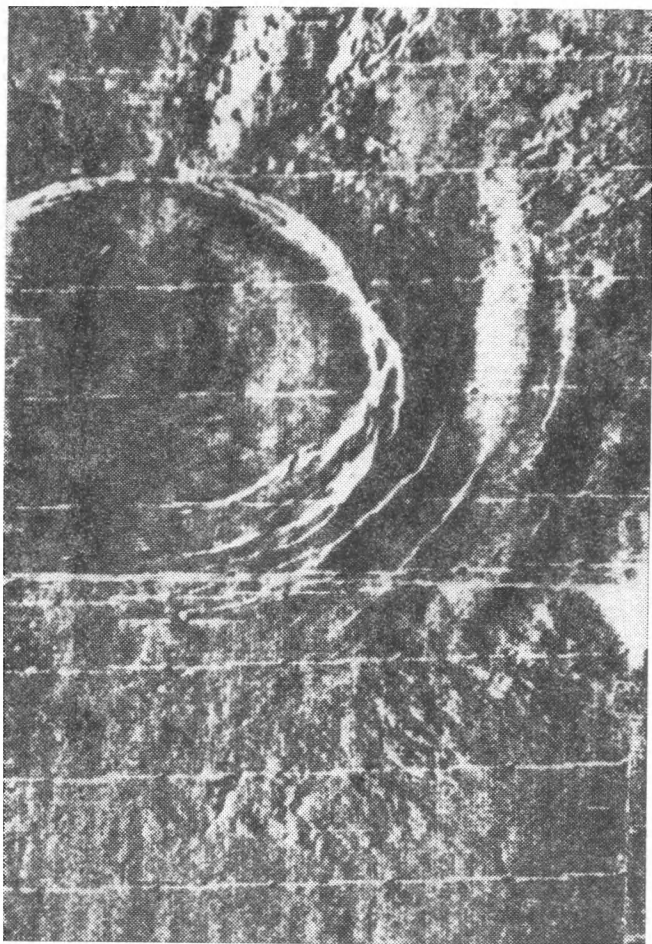


Рис. 12. Вершинная кальдера в районе Гордиевого Узла (Арсский вулкан). Диаметр внутреннего вала 110 км. Заметно несколько концентрических валов. Снимок «Маринера-9».

Интереснейшим образованием на Марсе является кальдероподобный кратер Nix Olympica (рис. 13).

Известный еще по наземным наблюдениям как светлое пятно, он оказался самой высокой возвышенностью на планете (22 км над средним уровнем поверхности) с довольно крутым валом, диаметром около 600 км, и с рядом других концентрических кольцевых структур.



Рис. 13. Вершинная кальдера Nix Olympica — самая высокая гора на Марсе.

Любопытно, что большая светлая область Hellas совершенно лишена кратеров. Как уже говорилось, Hellas — одна из самых низких областей на Марсе, лежащая на 4 км ниже среднего уровня. Можно высказать гипотезу, что в области Hellas были кратеры (по крайней

мере метеоритного происхождения), но потом, как в лунных «морях», их залила лава. Светлый, а не темный вид Hellas объясняется, по-видимому, толстым слоем мелкой пыли, переносимой ветрами и оседающей в этой огромной котловине.



Рис. 14. Область южной полярной шапки (широта 59°). Снимок «Маринера-7».

«Маринеру-7» удалось сфотографировать и область южной полярной шапки (рис. 14). Изучение этих фотографий показало, что толщина слоя вещества шапки измеряется по крайней мере метрами, но никак не миллиметрами или их долями, как было бы в случае, если бы они состояли из снега или льда. А главное, измерения

температуры полярной шапки показали, что она очень низкая: до 115°K . Это давало еще один, наиболее веский довод в пользу того, что вещество полярных шапок — замерзшая углекислота («сухой лед»).

1971 г. был во всех отношениях «годом Марса». 10 августа наступило очередное великое противостояние Марса, когда Земля и Марс сблизилась до 56 млн. км. Во многих обсерваториях мира велись разнообразные наблюдения планеты. Особенно интенсивно они велись в Советском Союзе, Соединенных Штатах Америки, Франции, Японии.

19 и 28 мая 1971 г. к Марсу были запущены две советские автоматические межпланетные станции «Марс-2» и «Марс-3». 27 ноября и 2 декабря 1971 г., после 192 и 188 суток полета соответственно обе станции приблизились к Марсу и стали его искусственными спутниками. Впервые в истории спускаемый аппарат станции «Марс-3» совершил мягкую посадку на поверхность планеты в ее южном полушарии, между светлыми областями Electris и Phaetontis.

Советская АМС «Марс-2» была выведена на орбиту с минимальным удалением от поверхности планеты 1380 км, максимальным — 25 000 км, наклоном к экватору 49° и периодом обращения 18 часов. Станция «Марс-3» двигалась по орбите с минимальным расстоянием 1500 км и периодом обращения около 11 суток. Максимальное расстояние станции от Марса в апоцентре орбиты составляло 190 тыс. км, т. е. половину расстояния от Земли до Луны.

Станция «Марс-3» производила фотографирование Марса с разных расстояний. Кроме того, обе станции производили измерения параметров поверхности и атмосферы, а также магнитного поля планеты.

Но самые интересные фотографии марсианских образований были получены с космического аппарата «Маринер-9», который 14 ноября 1971 г. стал первым искусственным спутником Марса.

На снимках «Маринера-9» были обнаружены гигантские каньоны — длинные, глубокие долины (грабены), тянущиеся иногда на тысячи километров. Таков Большой Каньон (рис. 15), проходящий несколько южнее экватора от 27° до 110° долготы. Когда его нанесли на карту, оказалось, что он идет из темной области *Aurorae*

Sinus к темному треугольному пятну Tithonius Lacus и хорошо совпадает с давно известным каналом Coprates (Копрат). Однако такое соответствие каналов каньонам, обнаруженным на крупномасштабных снимках Марса, наблюдается далеко не всегда.

Общая длина Большого Каньона составляет 4000 км, его ширина достигает 120 км, а глубина — 6 км. Во все

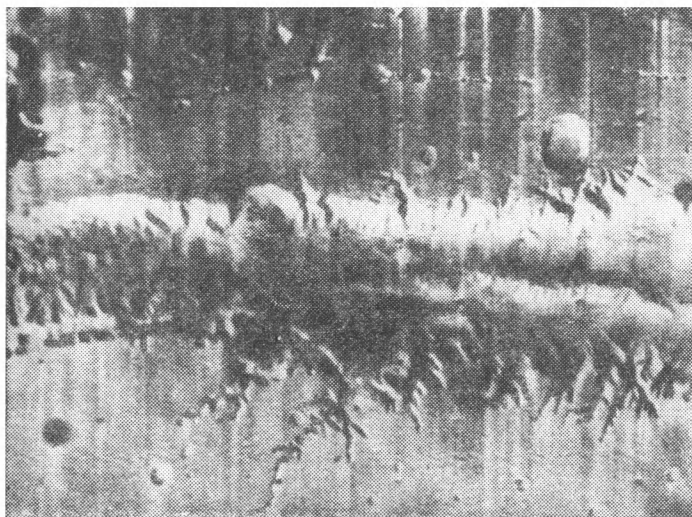


Рис. 15. Часть гигантского грабена — каньона Копрат. Показан участок длиной 440 км. Общая длина грабена — более 4000 км.

стороны от него отходят овраги меньших размеров, длиной до 150 км и шириной 5—10 км. Они разветвляются, иногда создавая очень интересные формы, как, например, образование, названное «люстрой», на долготе 95° и широтах от -5° до -15° (рис. 16). Если сам Большой Каньон, несомненно, представляет собой грабен, или разлом в марсианской коре, то отходящие от него овраги возникли, скорее всего, в результате ветровой эрозии.

Напомним, что длина наибольшего на Земле Гранд-Каньона (долина реки Колорадо, США) — 400 км, а его глубина 1800 м. Таким образом, марсианский Боль-

шой Каньон превосходит по масштабам свой земной аналог.

В феврале-марте 1974 г. четыре советские автоматические межпланетные станции «Марс-4», «Марс-5», «Марс-6» и «Марс-7» прошли вблизи красной планеты. Станция «Марс-5» вышла на орбиту искусственного спутника Марса, а спускаемый аппарат станции «Марс-6» совершил мягкую посадку на поверхность планеты.

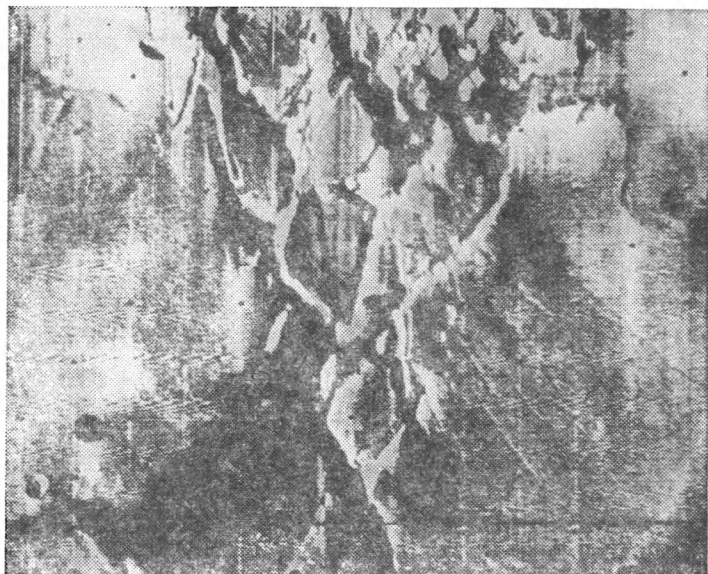


Рис. 16. Система разломов «Люстра», примыкающая к грабену Копрат. Снимок «Маринера-9».

Станции «Марс-4» и «Марс-5» передали на Землю 120 фотографий поверхности планеты, в том числе несколько панорамных и три триады снимков со светофильтрами. Качество и разрешающая способность фотографий не только не уступают снимкам «Маринера-9», но порою превосходят их. Одновременно с фотографированием производилась фотометрия и поляриметрия соосными фотометрами и поляриметрами, работавшими в семи спектральных диапазонах от 0,1 до 40 мкм.

Кроме того, регистрировалось радиоизлучение планеты на волне 3 см.

На снимках «Марса-4» и «Марса-5» видны многочисленные кратеры диаметром от 1 до 150 км. Некоторые из них в районе Эритрейского моря и Босфора соединены долиной или руслом шириной 25—35 км. С северо-запада в него «впадает» более узкое извилистое русло (5—7 км), напоминающее русло пересохшей реки

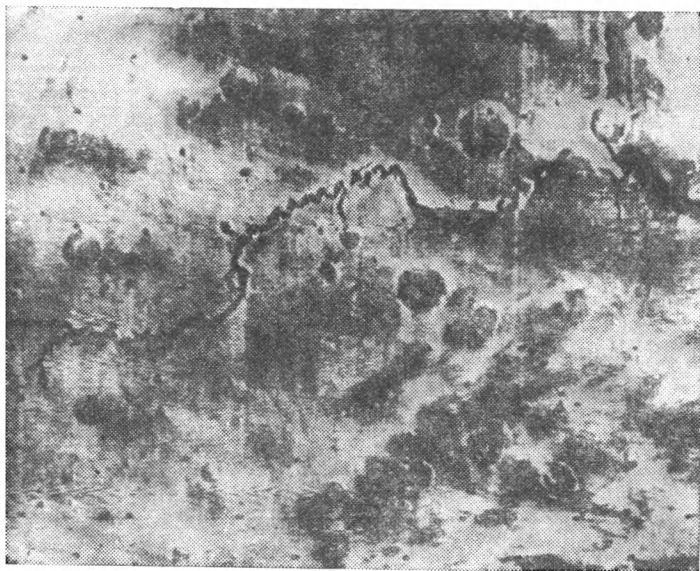


Рис. 17. Руслоподобные протоки на Марсе.

(рис. 17). Оно было сфотографировано еще в 1972 г. «Маринером-9» и получило название Ниргал*). Исследование возраста этого образования показало, что он измеряется многими миллионами, даже сотнями миллионов лет.

Как показывают фотографии со светофильтрами, дно некоторых кратеров имеет сине-зеленый оттенок, резко выделяющийся на общем оранжевом фоне. Пока еще

*) Прекрасная Ниргал — героиня одного из стихотворений В. Я. Брюсова.

нельзя сказать, имеем ли мы здесь дело с выходами пород другого состава или с растительностью, существование которой на Марсе все же не исключено.

Максимальная зарегистрированная на Марсе температура — около 0°C . Но поскольку эти измерения относятся к широтам $25\text{—}35^{\circ}$ южного полушария (где в это время была осень), можно считать, что в районе экватора в послеполуденные часы температура достигает $5\text{—}12^{\circ}\text{C}$. Не надо забывать, что Марс в феврале-марте 1974 г. был уже довольно далеко от перигелия, который он прошел в августе 1973 г.

К 6 часам вечера по местному времени температура на Марсе снижается до -20° и даже до -30°C , а еще спустя 3—4 часа — до -55°C . Вдоль трассы полета «Марса-5» наблюдались местные колебания температуры в пределах $5\text{—}8^{\circ}$, объяснимые различием поглощательных и отражательных свойств пород, устилающих поверхность планеты вдоль трассы. Неоднородность поверхности подтверждают и поляриметрические измерения, проведенные в ходе совместного советско-французского эксперимента. Участки, покрытые мелкой пылью, чередуются с обширными каменистыми районами.

Геология Марса развивается

Если до 1972 г. происходило в основном «первичное накопление» фактических данных о строении марсианской поверхности и рельефа, то уже в 1973—1974 гг. был выполнен ряд обобщающих исследований в этом направлении.

Американские ученые на основании 7300 фотографий Марса, полученных космическим аппаратом «Маринер-9», составили фотомозаичную карту его поверхности в масштабе $1 : 5\,000\,000$ и ряд геологических карт в разных масштабах. Анализ этих снимков и карт показал, что Марс более изменчив и динамичен, чем предполагали ранее. Характерным свойством поверхности планеты в глобальном масштабе является наличие как бы единого гигантского «материка» в южном полушарии и единого «океана» в северном. В то время как поверхность южного «материка» покрыта большим количеством ударных (т. е. метеоритных) кратеров, равнины северного полушария почти лишены их, но зато несут

на себе следы обширных отложений, частично осадочного происхождения. Здесь же сосредоточено большинство вулканов. Анализ фигуры Марса показал, что покрытые кратерами возвышенности лежат в среднем на 3 км выше, чем гладкий «океан» северного полушария. Наличие лишь слабых следов космической бомбардировки показывает, что поверхность океана сложена более молодыми породами (скорее всего, излияниями базальта), чем испещренный кратерами материковый район. Для равнин характерно наличие вулканов в виде

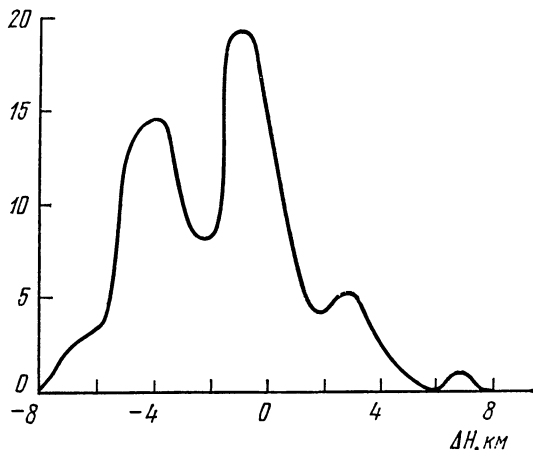


Рис. 18. Гипсометрическая кривая для Марса, показывающая частоту встречаемости уровней высот (от условного нуля).

конусов с кальдерами на вершинах. Свежие натеки на склонах конусов тоже указывают на их геологическую молодость.

Распределение участков поверхности Марса по уровням, построенное У. Хартманном на основе как радиолокационных, так и спектрофотометрических разрезов рельефа, позволило установить, что гипсометрическая кривая Марса, показывающая, как часто встречается на планете тот или иной уровень, имеет два максимума (рис. 18). Таким же свойством обладает, как известно, гипсометрическая кривая Земли. Причина этого явления состоит в том, что гранитные континентальные блоки земной коры как бы плавают в более плотном веществе

мантии, в соответствии со схемой Дж. Эри. При этом они подобно ледяным айсбергам в океане возвышаются над средним уровнем океанического дна на несколько километров. Два максимума на гипсометрической кривой Земли и соответствуют средним уровням материков и дна океанов.

Нечто подобное наблюдается и на Марсе. У. Хартманн построил такую схему для Земли и Марса (рис. 19). Данные для Земли известны из непосредственных определений плотности пород и сейсмических измерений. Средняя плотность гранитных материковых блоков $2,75 \text{ г/см}^3$, базальтовой «подложки» $3,05 \text{ г/см}^3$, среднее возвышение материковых блоков над «подложкой» $h_c = 3 \text{ км}$, их погружение $h_r = 31 \text{ км}$, а общая толщина $h_c + h_r = 34 \text{ км}$. Плотность верхней мантии Марса, по Байндеру и Девису, составляет $3,4 \text{ г/см}^3$ (эта

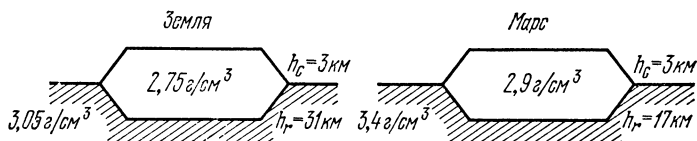


Рис. 19. Схема расположения материковых и морских участков коры на Земле и на Марсе.

величина рассчитана теоретически на основании средней плотности и модели внутреннего строения планеты). Для плотности материков Марса Хартманн принял значение $2,9 \text{ г/см}^3$ — несколько большее, чем для Земли, ввиду меньшей концентрации вещества к центру планеты. Из гипсометрической кривой для Марса можно получить величину $h_c = 3 \text{ км}$ (как для Земли). По величине h_c и значениям плотностей получается общая толщина коры Марса $h_c + h_r = 20 \text{ км}$ с возможными пределами от 15 до 33 км. Таким образом, кора Марса, по схеме Хартманна, тоньше земной и лунной коры (толщина последней по сейсмографическим данным равна 65 км). Близкие результаты независимо от Хартманна получил советский геолог В. Б. Нейман.

Для понимания дальнейшего необходимо напомнить, что мы еще не имеем общепринятой точки зрения на глобальную тектонику нашей Земли. За последние 15 лет все более широкое распространение получает

выдвинутая английским геологом А. Холмсом и разработанная американскими геологами Р. Дитцем и Г. Хессом «глобальная тектоника плит», суть которой заключается в следующем (рис. 20): земная кора (литосфера) состоит из нескольких гигантских плит протяженностью в тысячи километров, разделенных трещинными разломами, проходящими вдоль осей океанических хребтов, в так называемых рифтовых зонах (один из таких хребтов проходит по средней линии Атлантического океана). Как установлено непосредственными исследованиями, океаническая кора — весьма молодая (около 100 млн. лет). Кроме того, наблюдения свидетельствуют, что Европа и Америка отдаляются друг от друга со скоростью

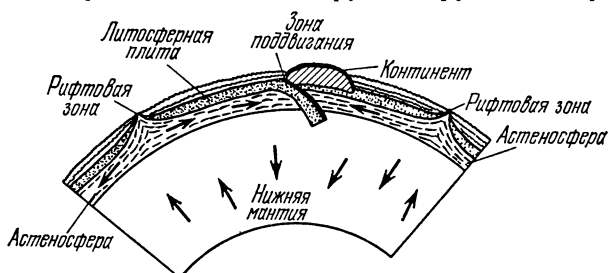


Рис. 20. Схема движений в литосфере и астеносфере согласно глобальной тектонике плит.

4 см/год. Возрождая старую гипотезу дрейфа материков, авторы глобальной тектоники плит утверждают, что в области океанических хребтов поднимаются вверх новые участки литосферы, что приводит к раздвиганию плит в стороны от зон поднятия. Встречаясь со старыми блоками материковой коры в районе островных дуг, расположенных вдоль границ материков, расходящиеся плиты уходят под материковую кору, погружаясь обратно в мантию. Места, где это происходит, называются зонами поддвига. Все движения плит происходят на размягченной верхней части мантии — астеносфере — слое, имеющем пониженную плотность. Источником энергии служат конвективные движения в мантии.

Гипотеза глобальной тектоники плит получила подтверждение со стороны палеомагнитных данных. Последние показывают, что ориентировка магнитных меридианов в древние эпохи на разных материках была

различной, что как будто свидетельствует о смещении, дрейфе материков. Однако эта концепция встречает ряд трудностей, главным образом геологического характера. Вокруг нее продолжаются острые дискуссии как в нашей стране, так и за рубежом*). Поэтому изучение данных по геологии Марса может сыграть известную роль в проверке и этой гипотезы.

Марсианская кора, особенно в районе Тарсис, показывает ясные признаки поднятия, вызванного движениями мантии. Эти поднятия сопровождаются уничтожением древних кратеров, образованием разломов и систем грабенов, подобных каньону Копрат, тянущемуся на 4000 км, и проявляются в интенсивном вулканизме. По мнению У. Хартманна, это указывает на текущую или недавнюю активность мантии планеты, достаточную для возмущения ее коры, объясняющую ее дифференциацию (наличие двух типов пород: темных и светлых) и образование материковых блоков, но недостаточную для создания развитого дрейфа материков или складкообразующего столкновения плит, как это имеет место на Земле.

Действительно, как отмечают американские специалисты Р. Шарп и М. Кэрр, на Марсе не удалось обнаружить никаких характерных признаков зон поддвига или признаков расширения плит коры. В частности, вулканы Марса аналогичны земным внутриплитовым вулканам, аналоги же вулканов земных зон поддвига отсутствуют.

Можно считать, заключает У. Хартманн, что Марс в геологическом отношении занимает промежуточное положение между Луной и Землей. На Луне мы не наблюдаем ни поднятий коры, ни признаков столкновений плит; на Марсе поднятия коры наблюдаются, а столкновения плит — нет; наконец, на Земле происходят и те и другие процессы.

Проявления вулканизма на Марсе были подробно изучены М. Кэрром. На Марсе есть два класса вулканических образований: покрытые редкими кратерами

*) См. Х а н н В. Е., Происходит ли научная революция в геологии? «Природа», № 1, 1970; А р т ю ш к о в Е. В., Что приводит в движение земную кору? «Природа», № 10, 1973; Г о р о д н и ц к и й А. М., С о р о х т и н О. Г., У ш а к о в С. А., Дрейф континентов и современные представления об эволюции Земли, «Земля и Вселенная», № 5, 1974.

равнины, напоминающие лунные моря, и круглые образования, к которым относятся щитовидные вулканы, купола и кратеры *). Вулканические образования распределены по поверхности планеты неравномерно, будучи сосредоточены почти полностью в одном полушарии — на территории северного «океана». Щитовидные вулканы Марса (см. рис. 13) больше их земных прототипов, поскольку марсианская кора неподвижна по отношению к мантии, что оставляет больше времени на рост щитов. Анализ крупномасштабных снимков поверхности Марса показывает, что вулканическая активность имела место на протяжении всей доступной дешифровке истории планеты.

Попытка проследить историю развития марсианского рельефа на основании анализа снимков «Маринеров» была предпринята советским геологом Ю. А. Ходаком и чехословацким планетологом К. Бенешем. Последний выделяет четыре основные системы, отражающие последовательность эволюции поверхности планеты: доэлладскую, элладскую, амазонскую и олимпийскую. В схеме Ю. А. Ходака — девять периодов развития Марса; 1) древнейший, с формированием древних кратеров; 2) элладский кряжистый, или мезогейский, сопровождавшийся образованием кряжей и кратерных площадей; 3) элладский выровненный, или аргирский, с образованием опущенных талассоидов; 4) девкалионский, с образованием несколько приподнятых кратерных площадей; 5) эритрейский, с образованием опущенных кратерных площадей с кряжами и расселинами; 6) атлантический, с образованием линейных депрессий типа «каналов»; 7) олимпийский, с образованием приподнятого массива; 8) неоолимпийский, с образованием вулканических структур; 9) новейший **).

*) Щитовидные вулканы образуются в результате поступления снизу, из астеносферы, легкой базальтовой лавы, растекающейся в стороны и создающей подобие щита. Эти вулканы имеют малые углы склонов (около 10°), в отличие от насыпных конусов типа Везувия. Типичный представитель щитовидных вулканов — Мауна Лоа на Гавайях. Купола — округлые поднятия, обычно вершины складок земной коры. Нередко на куполах образуются вулканы.

**) Названия периодов образования от русских наименований основных деталей альбедо (темных и светлых пятен) Марса: Эллада (Hellas), Мезогей (Mesogaea), Аргир (Argyre), Страна Девкалиона (Deucalionis Regio), Эритрейское Море (Mare Erythraeum), Атлантида (Atlantis), Олимпийские Снега (Nix Olympica).

Еще в 1959 г. советский планетолог Г. Н. Каттерфельд высказал гипотезу, что марсианские «каналы» — это в основном разломы, подобные глубинным разломам Земли. В 1973 г. Г. В. Чарушин и Г. Н. Каттерфельд произвели статистический анализ распределения «каналов» Марса и разломов Земли по направлениям и изменения их частоты по площадям. Им удалось выявить много общего в этих распределениях для Марса и Земли и сделать вывод о том, что фотографии «Маринеров» подтверждают разломную гипотезу.

Но произведенное уже в 1975 г. американскими астрономами К. Саганом и П. Фоксом детальное исследование связи сети «каналов» Ловелла с реальными структурами рельефа и деталями альbedo Марса (т. е. с границами материков и морей) показало, что только меньшая доля классических «каналов» связана с разломами (типа Копрата), горными хребтами, цепочками кратеров и другими образованиями. В их числе оказались, между прочим, и все те каналы, которые выходили на фотографиях. Большая же часть классических «каналов» все-таки оказалась оптической иллюзией. И гипотеза 3 (см. стр. 28) снова заняла доминирующее положение, сильно потеснив гипотезы 2б и 2в.

Пусть читатель, однако, не огорчается этим обстоятельством. На смену «каналам» Скиапарелли и Ловелла пришли другие каналы (без кавычек) — вполне реальные образования, поставившие перед учеными ряд трудных, но интересных проблем. О них будет рассказано в следующем разделе.

Большое исследование распределения марсианских кратеров по размерам в различных областях планеты выполнил У. Хартманн. Число малых кратеров на единицу площади даже в густо покрытых кратерами районах меньше, чем на Фобосе и Деймосе. Это позволило оценить скорость эрозии, разрушающей малые кратеры на Марсе и отсутствующей на его спутниках, а заодно оценить возраст различных кратерных площадей. Согласно этим оценкам, вулканический район Тарсис не старше 300 млн. лет, тогда как древние кратерные области южного полушария насчитывают возраст 3—4 млрд. лет. Самые крупные щитовидные вулканы в Озере Феникса и Олимпийских Снегах существуют не более

100 млн. лет. Заметно также, что около 600 млн. лет назад скорость эрозии резко уменьшилась.

Процесс ветровой эрозии и связанные с ней перенос пыли и образование слоистых отложений тоже явились предметом исследования американских специалистов. Выветривание на Марсе играет гораздо большую роль, чем на Земле, в изменении его рельефа. Перенос пыли

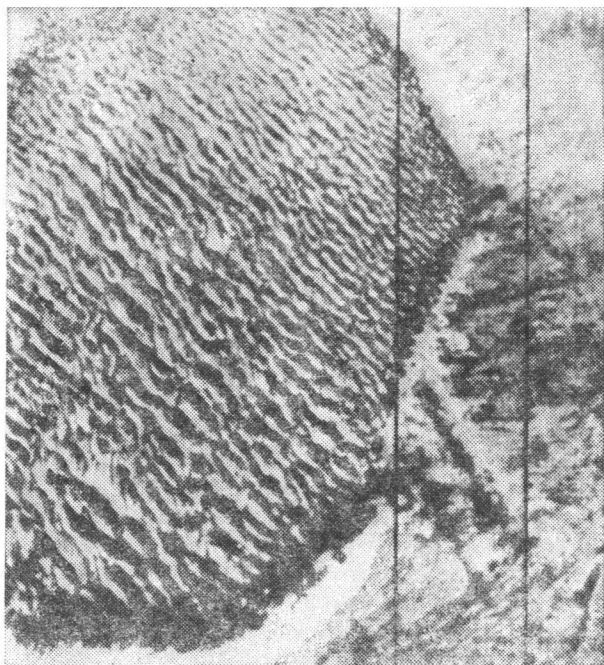


Рис. 21. Дюны на Марсе (снимок «Маринера-9»).

и золовы (ветровые) отложения определяют структуру многих районов на Марсе. Сплошным покровом таких отложений покрыта гигантская котловина Эллады. Вокруг границ полярных шапок древние слоистые отложения образовали большие лунки и ложбины. Из этих областей происходит постепенный перенос золовых обломков к экватору. В некоторых местах отмечены образования типа дюн (рис. 21), в других — слоистые

волнообразные отложения. Расположение слоев наносных пород почти симметрично относительно экватора планеты (их мощность возрастает к полюсам) и почти одинаково в обоих полярных районах.

Разумеется, все это — лишь первые шаги в понимании геологии и геоморфологии Марса. Впереди — новые исследования. Ценный вклад даст детальный анализ крупномасштабных фотографий поверхности Марса, полученных в феврале и марте 1974 г. советскими автоматическими межпланетными станциями «Марс-4» и «Марс-5».

Климат Марса в прошлом

Среди образований, обнаруженных на поверхности Марса, всеобщее внимание привлекли руслообразные протоки, или меандровые долины, о которых уже упоминалось *). Их внешний вид, наличие «притоков» вряд ли можно объяснить иначе, чем предположив, что это — русла рек.

Однако, как уже говорилось выше, на Марсе в настоящее время реки течь не могут, там вообще не может быть жидкой воды. Причина этого состоит в том, что при тех низких давлениях, которые господствуют на Марсе, вода закипает уже при очень низких температурах. Тройная точка воды, когда лед переходит в пар, минуя жидкую стадию, соответствует давлению 6,1 мбар, которое как раз характерно для среднего уровня поверхности Марса. Но даже при более высоких давлениях (10—20 мбар) вода должна закипать при температурах 7—18 °С, которые на Марсе осуществляются. Поэтому за короткий срок вода должна переходить в пар.

Никакая другая жидкость не могла образовать наблюдаемых русел: лава быстро застывает, а жидкая углекислота даже в земных условиях не может существовать: твердый CO₂ переходит непосредственно в пар и наоборот.

Итак, единственное возможное объяснение меандров на Марсе — это образование водных потоков, рек. Сейчас для него нет необходимых условий — значит, они были в прошлом. Для этого нужно допустить, что

*) Меандрами называют высохшие (старые) русла рек.

в более ранние эпохи атмосферное давление на Марсе было значительно выше, чем в настоящее время.

Возможно ли это? Оказывается, да. Ведь Марс — единственная планета, где вещество полярных отложений (полярных шапок) совпадает по составу с основным газом атмосферы — углекислым газом.

(В самом деле, на Земле полярные шапки состоят из замерзшей воды, а доля водяного пара в земной атмосфере не превышает 0,3%. На Венере же вообще не существует полярных шапок.)

Это значит, что если бы можно было вещество полярных шапок Марса превратить в пар, то давление его атмосферы существенно увеличилось бы. В самом деле, общая масса марсианской атмосферы равна $2 \cdot 10^{19}$ г, тогда как масса полярных шапок Марса, по расчетам американского астронома К. Кросса (1971 г.) и советского радиоастронома В. И. Алешина (1972 г.), почти такая же. В случае их полного испарения масса CO_2 в атмосфере Марса, а значит, и атмосферное давление, удвоились бы. Образование жидкой воды и текущих рек стало бы возможным.

Увеличение мощности атмосферы, состоящей из CO_2 , приведет к усилению парникового эффекта и повышению температуры планет. Однако парниковый эффект — лишь вторичная причина повышения температуры, появляющаяся уже в результате испарения полярных шапок. Должна существовать первичная причина, влияющая на климат планеты.

Для объяснения потепления климата Марса в прошлом были предложены две гипотезы. Одна из них (более прозаическая) была предложена американскими астрономами Дж. Бернсом и М. Харвитом и состоит в том, что из-за прецессии оси Марса (под действием Солнца) и плоскости его орбиты (за счет возмущений от планет) с периодом суммарной прецессии 50 000 лет эпохи резкого различия температурных условий лета и зимы (когда лето в одном из полушарий совпадает с положением Марса близ перигелия, а зима — близ афелия его орбиты) сменяются через 10—12 тысяч лет эпохами более умеренного климата, когда и лето, и зима в обоих полушариях наступают при средних расстояниях Марса от Солнца. В последнем случае минимальная температура на планете будет выше, а зима в южном

полушарии короче, чем в настоящее время. В эти эпохи и были, по мнению Бернса и Харвита, необходимые условия для полного испарения обеих полярных шапок. Оба ученых предложили даже фантастический проект, как «удержать» ось Марса в благоприятном для климата положении. Для этого нужно переместить Фобос на другую орбиту либо создать вокруг Марса кольцонных «естественных» спутников, позаимствовав их из пояса астероидов.

Гораздо более интересна и оригинальна другая гипотеза, предложенная К. Саганом. В ней американский ученый попытался объяснить с единой точки зрения такие, казалось бы, разные явления, как ледниковые периоды на Земле, недостаточный поток нейтрино от Солнца и реки на Марсе.

В самом деле, за последние 100 тысяч лет Земля пережила четыре периода оледенения, перемежавшиеся сравнительно теплыми межледниковыми периодами, один из которых мы переживаем сейчас. Наиболее вероятной причиной этих чередований теплых и холодных периодов является изменение притока солнечного тепла.

С другой стороны, поток нейтрино, улавливаемый современными нейтринными телескопами, намного меньше, чем следовало ожидать, исходя из представлений о происходящих на Солнце термоядерных реакциях*). К. Саган совместно с астрофизиком Э. Юнгом предложил следующее объяснение.

Ядро Солнца, в котором происходят термоядерные реакции, испытывает периодические (с периодом около 10^8 лет) расширения, вызванные перемешиванием легкого изотопа гелия He^3 , играющего важную роль в цепи так называемой протон-протонной реакции. Выход нейтрино отражает современную интенсивность термоядерных реакций, которая, по мнению Сагана и Юнга, понижена. Наоборот, излучение, испытывая на пути от ядра Солнца к его поверхности длинную цепь процессов рассеяния, поглощения и переизлучения на других длинах волн, характеризует уже прошедший этап в эволюции Солнца. Изменение светимости Солнца за счет пульсаций его ядра по схеме Сагана — Юнга может

*) См. Мартынов Д. Я., Что беспокоит астрофизиков, «Земля и Вселенная», № 1, 1971.

составлять 7—30%, а этого достаточно для объяснения ледниковых периодов на Земле и колебаний климата Марса. Однако период пульсаций, полученный Саганом и Юнгом, значительно больше периода повторения оледенений (на 3—4 порядка), и в этом — главная трудность такого объяснения ледниковых периодов. Правда,

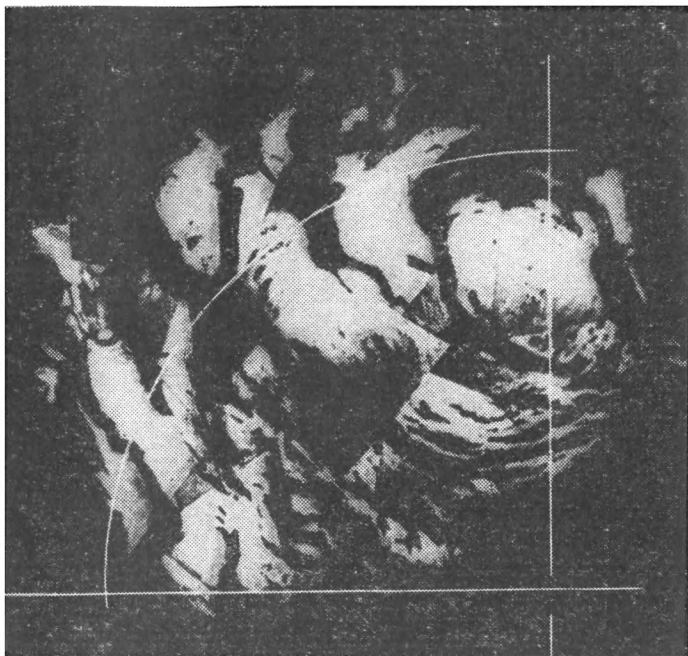


Рис. 22. Слоистая структура полярной шапки Марса (по снимкам «Маринера-9»).

косвенным ее подтверждением является наблюдаемый разброс на диаграмме «цвет — светимость» для звезд рассеянного скопления Ясли, возраст которого $3 \cdot 10^8$ лет. Этот разброс может быть объяснен пульсацией ядер этих звезд и колебанием их светимости.

На самом Марсе тоже обнаружены признаки оледенений. Это типичные формы рельефа, образуемые ледниками: U-образные долины, «висячие» долины, долины-притоки, острые гребни, седловины и другие. Но самих

ледников не видно. Отсюда ряд исследователей делает вывод, что оледенения были на Марсе в давнем прошлом, в эпохи большей влажности и более сурового климата.

В районе полярных шапок, после стаивания значительной части углекислого «снега», остаются хорошо наблюдаемые слоистые отложения, названные ламинами (рис. 22). Толщина каждого слоя — десятки метров, а всей системы отложений — около 2 км. Из чего они состоят? Из светлых мелкораздробленных пород, как полагает Дж. Каттс, или из слоев льда CO_2 , лишь защищенных минеральными отложениями от летнего таяния и испарения, как полагает К. Саган? Если верна последняя точка зрения, то масса твердого CO_2 в полярных шапках возрастает на несколько порядков против приведенных выше оценок К. Кросса и В. И. Алешина, и тогда плотность и давление атмосферы Марса в прошлом могли быть значительно выше, чем сейчас.

Большая пылевая буря и ее причины

Вернемся к ноябрю 1971 г., когда к Марсу подлетали сразу три космические станции: две советские («Марс-2» и «Марс-3») и американская «Маринер-9».

Метеорологическая обстановка на Марсе сложилась в это время довольно своеобразная. В июле 1971 г., согласно наблюдениям на Шемахинской астрофизической обсерватории Академии наук Азербайджанской ССР атмосфера планеты была умеренно прозрачна во всех длинах волн, и в ней не наблюдалось ни синих, ни желтых облаков. Южная полярная шапка четко выделялась на фоне материков, превышая их по яркости втрое (в фиолетовых лучах). Была видна и северная полярная шапка. Контраст морей и материков в красных лучах составлял около 30% и был примерно таким, как в первой половине августа 1956 г., до начала пылевой бури.

Как известно, в конце августа — начале сентября 1956 г. в южном полушарии Марса разыгралась сильная пылевая буря, скрывшая на две недели южную полярную шапку и резко понизившая контрасты «морей — материки» (до 10% в красных лучах). Новая пылевая буря, только еще большего масштаба, разыгралась на

Марсе во второй половине сентября 1971 г., еще до подлета к планете автоматических межпланетных станций.

В отличие от 1956 г., на этот раз пылевая буря была более длительной и устойчивой. Она началась 22 сентября в светлой области Noachis (в южном полушарии) и к 29 сентября охватила 200 градусов по долготе от Ausonia до Thaumasia. Яркость и цвет пылевых облаков были такими же, как у светлой области Hellas. 30 сентября исчезла южная полярная шапка. На следующий день пылевые облака закрыли Mare Sirenum, а 5—7 октября — область Solis Lacus. 11 ноября, когда «Маринер-9» на подлете начал фотографировать Марс (с расстояния 1 350 000 км), пылевая буря продолжалась. Она была столь интенсивной, что, по отзывам американских специалистов, планета имела «венероподобный вид». С расстояний 850 000 и 570 000 км уже можно было различить отдельные облачные образования.

15—20 ноября наступило, казалось, просветление. Но потом все началось снова. Когда к планете подлетели «Марс-2» и «Марс-3», все южное полушарие планеты было охвачено мощной пылевой бурей, которая до конца года затрудняла научные исследования поверхности Марса с его искусственных спутников. Лишь около 10 января 1972 г. пылевая буря прекратилась, и планета приняла свой обычный вид.

По фотометрическим наблюдениям, произведенным прибором станции «Марс-3» в декабре 1971 г., советским ученым В. И. Морозу и Л. В. Ксанфомалити удалось оценить средний размер частиц пыли: около 1 микрона. Температура поверхности планеты из-за поглощения солнечных лучей пылью понизилась на 10—60°, а температура атмосферы повысилась.

С 22 января по 18 февраля 1972 г. с борта космических аппаратов «Марс-2» и «Марс-3» была проведена большая серия измерений температуры поверхности и подповерхностного слоя планеты, изучался ее рельеф, характеристики атмосферы Марса и околопланетного космического пространства. Данные, полученные в этот период, показали, что пылевая буря окончилась, температура поверхности увеличилась до уровня, ожидаемого при высокой прозрачности атмосферы, возросли контрасты деталей поверхности в красной и ближней инфракрасной областях спектра.

Какие же причины вызвали столь мощную и длительную пылевую бурю? Американские ученые К. Саган, Дж. Веверка и П. Гиаш на основании теоретического исследования ветровых режимов на Марсе пришли к выводу, что наиболее эффективным механизмом подъема пыли с марсианской поверхности являются смерчи, или «пылевые дьяволы» (dust devils). Образование смерчей зимой невозможно из-за слабого солнечного нагрева. Летом и в экваториальных районах на плоских пространствах смерчи должны образовываться благодаря интенсивной инсоляции (солнечному нагреву), на склонах же их могут подавлять наклонные ветры. Для подъема пыли нужна скорость ветра в 80 м/сек. На Марсе имеются области, где такие скорости наблюдаются. Смерчи образуются преимущественно вблизи перигелия, когда интенсивность инсоляции на 23% больше, чем во время «среднего» противостояния, и на 47% больше, чем в афелии. Вот почему чаще всего пылевые бури бывают в периоды великих противостояний, когда лето в южном полушарии совпадает с прохождением Марса через перигелий. Замечательно, что пылевые бури 1956 и 1971 гг. начались почти на одинаковых гелиоцентрических долготах Марса ($\eta = 341^\circ$ в 1956 г. и $\eta = 346^\circ$ в 1971 г.), за 30 и 20 суток до летнего солнцестояния в южном полушарии соответственно.

Астрономы ожидали новую пылевую бурю в июле-августе 1973 г., когда Марс должен был вновь пройти через перигелий, но буря «опоздала» — она началась лишь 13 октября появлением трех пылевых облаков в районе Solis Lacus. Гелиоцентрическая долгота Марса была $\eta = 24^\circ$, в южном полушарии была вторая половина лета. По мнению американских астрономов, пылевая буря 1973 г., продолжавшаяся до ноября, уступает лишь большой пылевой буре 1971 г. и превосходит бурю 1956 г.

Измерения радиояркостной температуры поверхности планеты, проведенные в 1972 г. автоматической станцией «Марс-3», показали, что на глубине нескольких десятков сантиметров температура практически не зависит от времени суток (на самой поверхности суточные колебания температуры достигают 70 градусов). Заметно ослаблены и сезонные изменения температуры на этой глубине: об этом можно было судить по широтному распределению радиояркостной температуры, поскольку в южном

полушарии Марса в это время был конец лета, а в северном — конец зимы. Все эти данные указывали на низкую теплопроводность марсианского грунта.

Между тем еще наблюдения инфракрасного излучения Марса позволили определить так называемую тепловую инерцию марсианского грунта, а радионаблюдения — его диэлектрическую проницаемость. Тепловые и электрические параметры тоже свидетельствовали, что наружный слой Марса довольно рыхлый, хотя и не настолько, как в случае Луны.

Рыхлость наружного поверхностного слоя Марса способствует его ветровому разрушению. На сравнительно «крутых» склонах (угол наклона 3°) наиболее мелкие светлые зернышки пыли выдуваются ветрами начисто и переносятся на равнины, поэтому районы со склонами более темные. Так объясняют Саган, Веверка и Гиращ темный оттенок морей. Исследования рельефа Марса радиолокационным методом и по интенсивности полос CO_2 в спектре планеты над различными областями подтверждают предположение о том, что моря — не низины, как предполагали раньше, и не возвышенности, как считали Поллак и Саган, а области перепада уровней. Материки покрыты слоем тонко раздробленной светлой пыли, моря — более крупными зернами, возможно, иного состава. Это подтверждают и поляризационные исследования О. Дольфюса. Таково в настоящее время наиболее вероятное объяснение природы марсианских «морей».

Строение атмосферы и магнитное поле

Полет советских автоматических станций серии «Марс» много дал и для выяснения свойств марсианской атмосферы и магнитного поля планеты.

При заходе за диск планеты советских искусственных спутников Марса и автоматических станций, двигавшихся по пролетной траектории, проводились эксперименты по исследованию атмосферы Марса методом радиопросвечивания. Обработка принятых на Земле сигналов АМС «Марс-2» и «Марс-3» позволила определить зависимость давления и температуры в атмосфере Марса от высоты. Давление у поверхности планеты в тех районах, где были проведены измерения, лежит в пределах 4—8 миллибар. Эта величина хорошо согласуется с

прежними определениями, выполненными с американских станций серии «Маринер». Падение давления с высотой, как и в атмосфере Земли, происходит по барометрической формуле, но высота однородной атмосферы (т. е. высота, на протяжении которой давление падает в e раз, где $e = 2,72$ — основание натуральных логарифмов) в нижней атмосфере Марса равна 11 км против 8 км в нижних слоях земной атмосферы. Это значит, что давление в атмосфере Марса убывает с высотой медленнее, чем в нашей атмосфере.

Много интересного дали исследования атмосферы Марса советскими станциями «Марс-4» — «Марс-7». Снимки и измерения, проведенные АМС «Марс-4» и «Марс-5», показали, что в феврале 1974 г. атмосфера была гораздо прозрачнее, чем в 1971—1972 гг. Газоанализатор спускаемого аппарата АМС «Марс-6» установил довольно большое содержание в марсианской атмосфере инертных газов (скорее всего, аргона). По данным «Викингов» аргона в атмосфере Марса на два порядка меньше, чем в земной атмосфере.

Поскольку основным источником аргона в атмосферах Земли, Марса (и, очевидно, Меркурия) является радиоактивный распад калия-40, можно считать, что содержание радиоактивного калия в породах обеих планет одного порядка, а приведенное выше отношение количеств аргона в их атмосферах отражает прежде всего отношение их масс (9:1) и скоростей улетучивания атмосфер.

По результатам прямых измерений параметров атмосферы Марса, произведенных при спуске автоматической станции «Марс-6», группа советских ученых под руководством А. В. Авдуевского построила модель атмосферы Марса до высоты 80 км (рис. 23). В месте посадки «Марса-6» (район Эритрейского моря) давление у поверхности составило 6,1 миллибара (это, между прочим, среднее давление на Марсе, от уровня которого условились отсчитывать все высоты и глубины на планете). Средняя температура тропосферы 228°К, причем температура убывает с высотой в нижнем 30-километровом слое в среднем на 2,5 град/км. На уровне тропопавзы (около 30 км) плотность атмосферы составляет $5 \cdot 10^{-7}$ г/см³ (как в земной атмосфере на высоте 57 км). Выше начинается марсианская стратосфера с почти постоянной температурой 144°К.

С помощью двухканального ультрафиолетового фотометра с высоким пространственным разрешением, установленного на «Марсе-5», удалось обнаружить признаки озона в свободной атмосфере Марса. До этого озон был обнаружен приборами американских космических аппаратов «Маринер-6», «Маринер-7» и «Маринер-9», но только над полярной шапкой. Американские ученые К. Барт и М. Дик обнаружили связь между появлением над полярной шапкой облаков и увеличением содержания озона, причем то и другое зависит от температуры. Холодная и сухая атмосфера благоприятствует образованию озона. Измерения содержания озона в атмосфере Марса, выполненные АМС «Марс-5», позволяют оценить концентрацию атомарного кислорода в нижней атмосфере и скорость его вертикального переноса из верхней атмосферы, что важно для объяснения стабильности атмосферы Марса. По предварительным данным, концентрация атомарного кислорода на высоте 135 км составляет 2—8%.

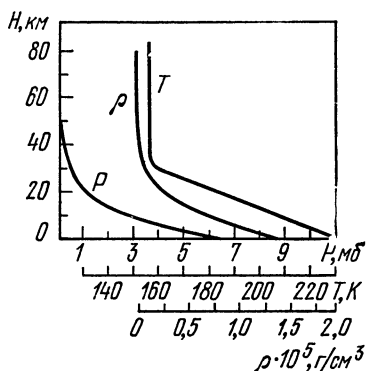


Рис. 23. Вертикальное строение атмосферы Марса до высоты 80 км (по данным «Марса-6»).

По данным измерений ультрафиолетового излучения, рассеянного в верхней атмосфере Марса, была определена интенсивность линий атомарного водорода и кислорода на разных высотах. Излучение в линии атомарного водорода прослеживается до высот порядка 12 000 км, где оно еще заметно превышает уровень фона межпланетной среды. Излучение в линии атомарного кислорода прослеживается до высот около 1000 км. Проведенные на АМС «Марс-2» и «Марс-3» измерения позволили найти зависимость концентрации атомов водорода от высоты над поверхностью Марса. На высоте 200 км концентрация атомов водорода около 10^4 атомов/см³, на высоте 4000 км она в 10 раз меньше, а дальше убывает все быстрее и на расстоянии около 15 000 км от центра планеты число атомов водорода становится меньше 30 атомов/см³.

По данным АМС «Марс-2» и «Марс-3» были определены свойства ионосферы Марса. Ее нижняя граница лежит на высоте 80 км. С увеличением высоты электронная концентрация резко возрастает, достигая максимума ($1,7 \cdot 10^5$ электрон/см³) на высоте 138 км, а затем плавно уменьшается. Замечены еще два максимума на высотах 85 и 107 км.

Во время пролета станции «Марс-4» за диском планеты 10 февраля 1974 г. было проведено радиопросвечивание ее атмосферы на радиоволнах 8 и 32 см. Обработка записей принятых сигналов группой сотрудников Института радиотехники и электроники АН СССР (М. А. Колосов, Н. А. Савич и др.) позволила обнаружить ночную ионосферу Марса с высотой главного максимума ионизации 110 км и электронной концентрацией $4,6 \cdot 10^3$ см⁻³. Обнаружены также два вторичных максимума на высотах 65 и 185 км.

Просвечивание ночной ионосферы Марса проводилось при выходе станции из-за диска планеты, причем впервые на двух частотах одновременно. При заходе станции «Марс-4» таким же методом была просвечена вечерняя ионосфера Марса. У нее главный максимум приходится на высоту 140 км с электронной концентрацией $5,9 \cdot 10^4$ см⁻³ и вторичный — на уровень 100 км с концентрацией 10^4 см⁻³ (что близко к уровню ночной ионосферы). Ход электронной концентрации вечерней ионосферы близок к тому, что был получен в 1971 г. для дневной ионосферы с помощью АМС «Марс-2».

По показаниям магнитометров станций «Марс-2» и «Марс-3» советскому ученому Ш. Ш. Долгинову удалось установить наличие у Марса слабого магнитного поля. Его напряженность на экваторе около 60 гамм, на полюсе 120 гамм. Напомним, что напряженность магнитного поля Земли на полюсе составляет 0,6 эрстеда, а 1 эрстед = 10^5 гамм. Таким образом, напряженность магнитного поля Марса в 500 раз слабее земного. Другая характеристика магнитного поля планеты — магнитный момент — оказался равным $2,47 \cdot 10^{22}$ эрстед·см³, т. е. $3 \cdot 10^{-4}$ магнитного момента Земли. По этим данным Ш. Ш. Долгинов определил границу фронта ударной волны, где поток частиц солнечного ветра вступает во взаимодействие с магнитосферой планеты. На этой границе происходит скачкообразное падение

скорости протонов и увеличение скорости электронов. Здесь же наблюдается скачок магнитного поля. Изменение скорости электронов действительно наблюдалось советскими межпланетными станциями. По этим наблюдениям советские ученые К. И. Грингауз и Т. К. Бреус определили средний радиус магнитосферы Марса в 4500 км и независимо оценили напряженность магнитного поля у полюса в 100—120 гамм.

Измерения магнитного поля Марса с помощью магнитометров АМС «Марс-5» позволили Ш. Ш. Долгинову и его сотрудникам подтвердить наличие магнитного поля. Его напряженность на магнитном экваторе Марса по данным станции «Марс-5» составляет 64 гаммы, а магнитный момент равен $2,4 \cdot 10^{22}$ эрстед·см³. Эти оценки почти не отличаются от приведенных выше.

Как показали приборы АМС «Марс-5», магнитосфера Марса вытянута в ночную сторону, где магнитное поле прослеживается до 7500—9500 км от поверхности планеты, в то время как с дневной стороны по данным станции «Марс-3» оно не обнаруживается уже на высоте 2200 км. Изучена ориентация диполя магнитного поля Марса. В отличие от Земли, северный магнитный полюс Марса находится в его северном полушарии.

Магнитосфера Марса была изучена также К. И. Грингаузом и его сотрудниками по зондовым измерениям ионной и электронной компонент плазмы в околопланетном пространстве приборами АМС «Марс-5» и «Марс-7». Помимо двух характерных зон, выявленных еще станциями «Марс-2» и «Марс-3» (зона *I* — невозмущенный солнечный ветер, зона *II* — переходный слой за фронтом ударной волны), обнаружена зона *III*, характеризующаяся резким падением ионных токов и усилением электронных. Эта зона отождествляется с плазменным слоем хвоста марсианской магнитосферы (рис. 24).

Факт наличия магнитного поля у Марса имеет громадное значение. По современным представлениям, магнитное поле Земли индуцируется электрическими токами в земном ядре, возникающими за счет конвективных движений в его внешних частях. Многие ученые связывают земной магнетизм с быстрым вращением Земли (динамо-эффект). Отсутствие магнитного поля у медленно вращающихся планет (Венера, Луна) и его наличие у быстро вращающегося Юпитера как будто подтвер-

ждают эту гипотезу. Марс вращается почти с такой же скоростью, как и Земля, но из-за малой массы у него не может быть значительного ядра. О том же говорит и определение момента инерции Марса. Можно полагать, что его ядро содержит не больше 6% массы планеты (на долю земного ядра приходится 31,5% массы Земли).

Марс должен был пройти через стадию расплавления и дифференциации его вещества, когда более плотные породы погружались в глубь, а более легкие всплывали наверх. Процессом дифференциации вещества Земли

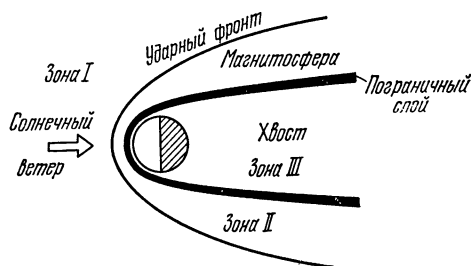


Рис. 24. Строение магнитосферы Марса (по Ш. Ш. Долгинову).

геофизики объясняют образование материков из вещества верхней мантии. На Марсе процесс дифференциации уже закончился, поэтому нельзя приписать образование его магнитного поля динамо-эффекту в его мантии. Но у Марса должна быть толстая кора (от 20 до 200 км), возможно, обогащенная железом. Такой вывод был сделан еще в 1966 г. советской исследовательницей С. В. Козловской из анализа моделей внутреннего строения Марса. Этот анализ показал, что вещество Марса — более плотное, чем вещество земной мантии, и содержит на 5—8% больше железа. Обогащение коры железом могло способствовать формированию магнитного поля планеты. Быть может, мы наблюдаем остаточный магнетизм, или палеомагнетизм, уже хорошо изученный на Земле и давший геофизикам так много ценных сведений о прошлом нашей Земли. Но, как полагает Ш. Ш. Долгинов, не исключено, что Марс — «живая» планета, но находящаяся сейчас в состоянии перехода магнитного поля через нулевое значение. Такие переходы, или инверсии, как указывают палеомагнитные данные, не раз происходили на Земле. За последние

4,5 млн. лет было около двадцати случаев изменения полярности геомагнитного поля. Таким образом, инверсии магнитного поля Земли происходят в среднем раз в 200 000 лет, причем сам процесс инверсии продолжается около 5000 лет, т. е. 2% длительности всего периода. Примерно такой можно считать вероятность того, что мы как бы присутствуем при подобной инверсии на Марсе.

Скончателно установить предысторию и современное состояние магнитного поля Марса можно будет лишь путем прямых измерений на его поверхности и, в частности, путем изучения вековых вариаций магнитного поля планеты. Для этого не придется ждать несколько веков: современные методы палеомагнетизма позволяют сделать такой анализ за относительно короткое время. Но для этого нужна высадка на Марс людей с приборами либо автоматических устройств, подобных советским «Луноходам», способных передвигаться по планете по командам с Земли и выполнять заданную программу исследований.

Есть ли жизнь на Марсе?

Несмотря на все успехи космических и наземных методов исследования «мертвой» природы Марса, перед астрономами неотступно стоял все тот же давний вопрос: существует ли на Марсе жизнь? И вот уже в 1976 г. американские ученые предприняли попытку решить его путем проведения тщательно продуманной серии экспериментов на поверхности Марса приборами спускаемых аппаратов «Викинг».

Программа «Викинг» готовилась несколько лет. Два космических аппарата («Викинг-1» и «Викинг-2») были запущены 20 августа и 9 сентября 1975 г. Каждый из них состоял из орбитального блока весом 2,3 т и посадочного блока весом 1,1 т.

«Викинг-1» 19 июня 1976 г., после 10 месяцев пути, вышел на ареоцентрическую орбиту, а спустя еще месяц — 20 июля — посадочный блок совершил спуск и посадку в области Хризе (широта $+22^\circ$, западная долгота $47^\circ, 5$).

Приборы «Викинга-1» немедленно начали передачу панорамных снимков поверхности планеты. Район посадки имеет довольно ровный рельеф и представляет собой

песчаную пустыню с большим количеством камней, наполовину занесенных слоем тонкой пыли. Большинство камней имеют размеры в десятки сантиметров, изредка встречаются глыбы в несколько метров.

Условия в месте посадки блока оказались довольно суровыми: температура после посадки была -86°C , потом постепенно поднялась до -30°C . Скорость ветра не превышала 7 м/сек, давление атмосферы равнялось 7,7 миллибара.

Рентгеновский флуоресцентный спектрометр передал предварительные сведения о составе марсианской почвы: 12—16% железа, 13—15% кремния, 3—8% кальция, 2—7% алюминия, 0,5—2% титана. Такой состав указывает на присутствие в числе пород, слагающих поверхность Марса, полевых шпатов (содержащих кальций и алюминий), пироксенов (содержат кальций, железо и кремнезем), оливина (содержит железо и кремнезем), ильменита (титанистого железняка). Красный цвет марсианских песков на цветных снимках указывает на присутствие гидратов окиси железа — гетита и лимонита.

В месте спуска посадочного блока «Викинга-2» — в светлой области Утопия — картина оказалась почти такой же, как и в области Хризе. Такие же камни и глыбы среди песчаной пустыни, некоторые из них испещрены ямками и напоминают пемзу.

Но всех в первую очередь интересовали результаты экспериментов по забору и анализу образцов грунта на присутствие микроорганизмов. Для этого в каждом из посадочных блоков имелись три совершенно одинаковые установки, содержавшие печь для пиролиза (т. е. для возгонки вещества проб при высоких температурах в вакууме), и три различных анализатора присутствия биогенных элементов. 28 июля «Викинг-1» начал эксперимент с анализом проб.

31 июля американские ученые пришли в крайнее возбуждение. Анализатор газообмена показал 15-кратное увеличение содержания кислорода по сравнению с нормой после двух часов инкубации. Спустя еще 24 часа концентрация кислорода выросла еще на 30%, а затем начала падать и спустя неделю упала до нуля.

Во втором эксперименте часть пробы загружалась в резервуар с питательным бульоном, в котором имелись радиоактивные (меченые) атомы. Анализатор детекти-

ровал выделявшиеся газы и обнаружил увеличение количества двуокси углерода, почти такое же, как при анализе биологически активных образцов земной почвы. Но вскоре и в этом приборе уровень отсчетов упал почти до нуля.

Третий эксперимент, в котором регистрировалось поглощение изотопа углерода C_{14} предполагаемыми органическими соединениями марсианского грунта, 6 августа показал повышенную активность.

На «Викинге-2» выделение кислорода из образцов проходило гораздо медленнее, чем на «Викинге-1». Однако американские ученые полагают, что эти результаты нельзя объяснить одними химическими реакциями. Как подчеркивает руководитель эксперимента Г. Клейн, эти данные неполны и хотя они подобны некоторым испытаниям с земными микроорганизмами, необходимы дальнейшие эксперименты для проверки полученных результатов.

Итак, первые эксперименты «Викингов» оказались обнадеживающими в отношении гипотезы о существовании на Марсе органической жизни. Конечно, это еще далеко не доказательство ее существования. Нужны дальнейшие исследования.

Можно полагать, что ближайшее будущее в исследованиях Марса прямыми методами принадлежит автоматам. Но мы не сомневаемся ни на минуту, что когда-нибудь, и может быть, скорее, чем мы думаем, на пыльную почву Марса ступит человек, посланец нашей родной Земли.

Рекомендуемая литература

- Д. Ю. Гольдовский, «Викинги» летят к Марсу, «Земля и Вселенная» № 3, 1976.
- В. Н. Коначенко, К. Я. Кондратьев, Новое о Венере и Марсе, Гидрометеиздат, 1970.
- К. Я. Кондратьев, А. М. Бунакова, Метеорология Марса, Гидрометеиздат, 1973.
- Л. В. Ксанфомалити, «Марс-5»: поверхность и атмосфера красной планеты, «Земля и Вселенная» № 5, 1974.
- Д. Я. Мартынов, Планеты. Решенные и нерешенные проблемы, «Наука», 1970.
- Ш. Мишо, Планета Марс. Физические свойства, «Мир», 1970.
- Новое о Марсе. Сборник статей, пер. с англ. под ред. В. И. Мороза, «Мир», 1974.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Вечно загадочный Марс	5
Марс как планета	6
Спутники Марса	14
Часть I. Исследование Марса классическими методами астрономии	19
Марс в телескоп	19
Каналы Марса	25
Атмосфера и фиолетовый слой	28
Из чего состоит атмосфера Марса?	35
Температурный режим планеты	42
Марсианские материки и «моря»	45
Макрорельеф «красной планеты»	54
Внутреннее строение Марса	57
Часть II. Космические исследования Марса	61
Кратеры и каньоны на Марсе	61
Геология Марса развивается	72
Климат Марса в прошлом	80
Большая пылевая буря и ее причины	84
Строение атмосферы и магнитное поле	87
Есть ли жизнь на Марсе?	93
Рекомендуемая литература	95

17 коп.