ПОЧЕМУ МАРС?

В.Н. Жарков,
В.И. Мороз

Опубликована в шестом номере журнала «Природа» в 2000г.

В.О. Ключевский на вопрос, зачем мы изучаем историю своей страны, ответил – чтобы лучше понять самих себя. На вопрос - почему мы изучаем Солнечную систему, можно ответить – чтобы понять свое место в ней и во Вселенной. Центральной задачей планетных исследований является создание научной теории образования и эволюции тел Солнечной системы - планет, их спутников, малых тел (комет, астероидов). Особо следует выделить проблему построения теории образования и эволюции Земли, способной дать прогноз дальнейшего ее развития. Это может быть сделано только в рамках сравнительной планетологии [1].

Марс с данной точки зрения представляет исключительный интерес. Поэтому не удивительно, что в исследованиях Солнечной системы при помощи космических аппаратов ему уделялось большое внимание. Перечень марсианских миссий выглядит весьма внушительно: пролетные аппараты - Маринер-4 (1965 г.), Маринер-6 и 7 (1969 г.), Марс-4 (1974 г.); искусственные спутники Марса - Маринер-9, Марс-2 и 3 (1971 г.), Марс-5 (1974 г.), Викинг-1 и 2 (1976 г.), Фобос-2 (1989 г.), Марс Глобал Сервейор (1997 г., продолжает работать и сейчас); посадочные аппараты Марс-6 (1974 г.), Викинг-1 и 2 (1976 г.), Марс Пасфайндер с марсоходом Соджорнер (1997 г.). Полученные результаты легли в основу современных представлений о поверхности, внутреннем строении и атмосфере Марса.

Бум, который в настоящее время наблюдается в науке о Марсе, связан, с одной стороны, с надеждой получить информацию о том, как формировалась Земля и о ранней эпохе её развития, и, с другой стороны, выяснить действительно ли на раннем Марсе были условия для возникновения биологической активности. В статье пойдет речь, главным образом, о месте Марса в сравнительной планетологии

В науке о Марсе важную роль играет изучение SNC метеоритов, которые, вероятно, имеют марсианское происхождение и представляют собой куски пород марсианской коры. Данные, полученные в миссии «Марс Пасфайндер», не противоречат гипотезе о марсианском происхождении SNC метеоритов (полный научный отчет о результатах этой миссии опубликован в [2]). На основе анализа изотопных систематик Sm-Nd и Hf-W в SNS метеоритах [3,4] показано, что дифференциация Марса – образование ядра и выделение коры – произошло в течение первых 100 млн. лет, т.е. очень быстро. Это можно рассматривать как прямое указание на эффективно горячее происхождение планеты.

Следующий вопрос, который подогревает интерес к изучению Марса, это существуют ли доказательства биологической активности на красной планете? Анализ бурных событий в этой области за последние несколько лет дан в статье [5]. Ниже мы дадим краткое резюме по текущему состоянию проблемы.

Роль метеоритной бомбардировки

Постепенно становится ясным, что заключительная катастрофическая метеоритная бомбардировка являлась одной из важнейших эпох в истории Луны, Земли и Марса. На Луне следы этой бомбардировки сохранялись в виде гигантских круговых морей и крупных кратеров. На Земле эти следы полностью стерты. Марс занимает промежуточное положение – на нем можно обнаружить некоторые последствия этих событий. Например, на кратерированном древнем южном полушарии это гигантские кратерные бассейны Эллады (рис.1) и Аргир. На более молодом северном полушарии следы гигантских круговых кратерных бассейнов стерты последующими геологическими процессами. На Луне круговые моря являются масконами – это понижения, характеризующиеся положительными гравитационными аномалиями, которые свидетельствуют о концентрации массы вблизи поверхности. По этому показателю, в северном полушарии Марса, бассейн Исидис скорее всего является реликтом марсианского кругового моря. Более надежно эффекты описываемых событий смогут быть выявлены после широкомасштабных исследований Марса с помощью космических аппаратов, абсолютного датирования, создания и нормировки кратерной временной шкалы.

Наибольшее изменение в истории Марса, скорее всего, связано с тем, что катастрофическая бомбардировка по существу разрушила имевшуюся в то время плотную атмосферу планеты, в результате чего теплый влажный климат сменился климатом близким к наблюдаемому в настоящее время.

На Луне круговые моря и гигантские кратеры имеют датировки. Эпоха катастроф началась примерно 4.1 млрд. лет назад (этот возраст имеет гигантский кратерный бассейн Аиткен с диаметром равным примерно 2250 км, расположенный у южного полюса Луны). Эпоха катастроф закончилась примерно 3.8 млрд. лет назад – дата образования Моря Восточного. Катастрофическая метеоритная бомбардировка завершила формирование лика Луны.

Данные, полученные при помощи космических аппаратов серии «Аполлон» привели к важным выводам [1]: Луна и планеты Земной группы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) имеют горячее происхождение, т.е. в конце процесса формирования их недра были сильно разогреты и, возможно, частично расплавлены. Факт быстрого образования мощной коры на Луне привел к становлению новой идеи, согласно которой планеты земной группы в заключительной фазе своего формирования проходили через стадию «океана магмы». Под «океаном магмы» понимается частично расплавленный мощный наружный слой, заканчивающей рост планеты. Он перемешивается падающими планетезималями – телами астероидных размеров. Измерение абсолютного возраста лунных пород, доставленных на Землю, позволило установить

временную кратерную шкалу – определение возраста поверхности по плотности расположенных на ней кратеров.

Аппел и Мурбат в обзоре «Исследование древнейших земных геологических записей в Гренландии» [6] указывают на то, что пока на Земле не обнаружено следов катастрофической метеоритной бомбардировки, закончившейся примерно 3.8 млрд. лет тому назад. Несмотря на то, что Земля как планета сформировалась примерно 4.5 млрд. лет назад, наиболее древние образцы горных пород, отобранные in situ имеют, возраст примерно 3.8 млрд. лет. Древнейшие следы биологической активности в осадочных породах на Земле имеют возраст на 50-100 млн. лет моложе. Наиболее древние ископаемые, имеющие клеточное строение имеют возраст примерно 3.4 – 3.5 млрд. лет и встречаются в осадочных породах из южной Африки и западной Австралии. На Земле эпоха от 4.5 млрд. лет до 3.8 млрд. лет, о которой на поверхности не осталось следов, изучается с помощью изощренных изотопных методов примененных к образцам горных пород извлеченных из мантии и атмосферным газам. Эти исследования указывают на то, что уже 4.4 – 4.3 млрд. лет тому назад химическая дифференциация и дегазация Земли практически была завершена.

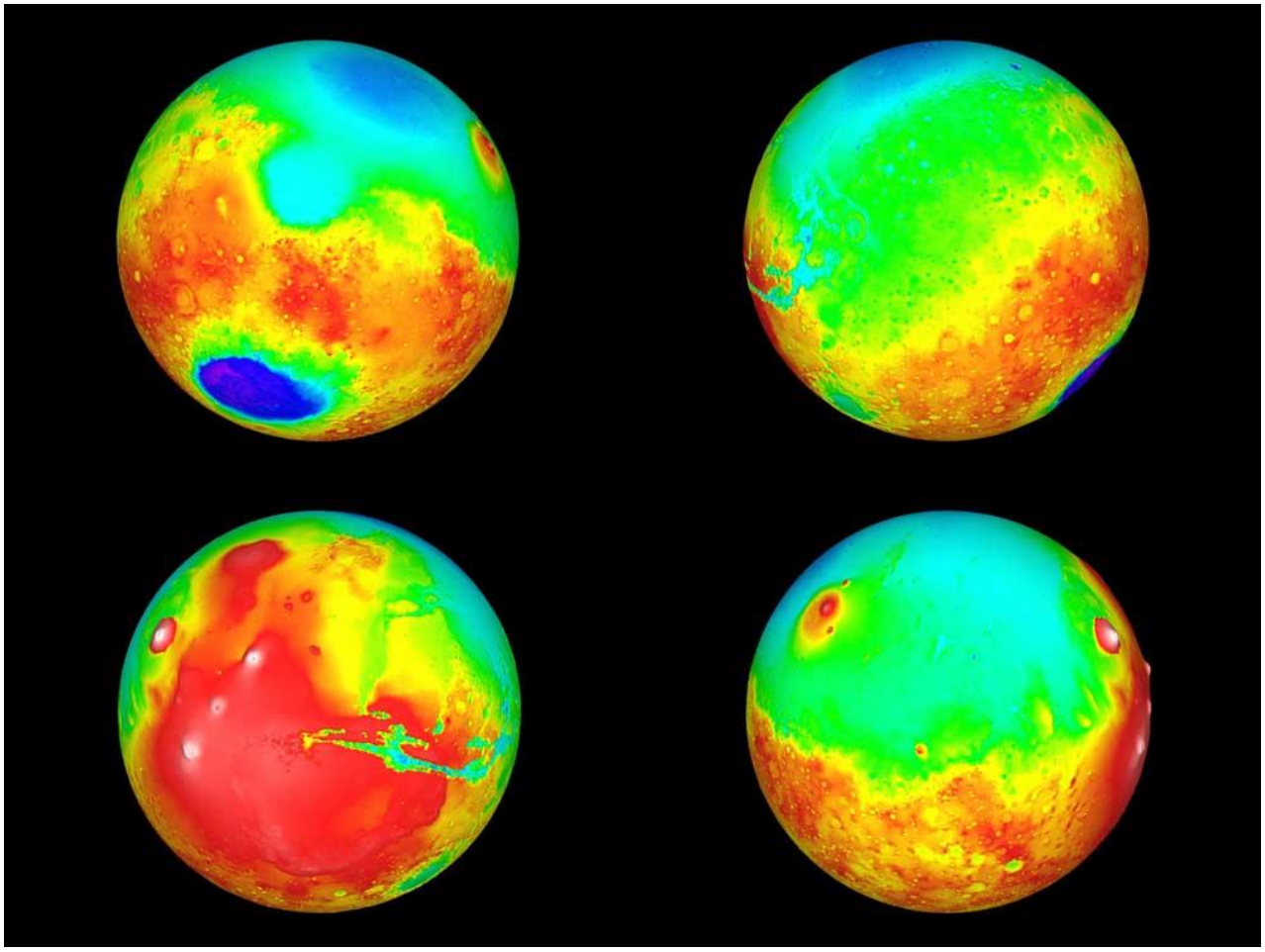

Рис.1. Гипсометрические карты полушарий поверхности Марса (с поворотом через 90°) построенные по данным измерений при помощи лазерного альтиметра на космическом аппарате Марс Глобал Сервейор. Красным цветом отмечены положительные высоты (до 10 км), максимальные высоты (более 10 км) розовым и бело-розовым; зеленым и синим отмечены отрицательные высоты. Карты А, Б и Г хорошо демонстрируют явление дихотомии в геологическом строении поверхности Марса, состоящее в том, что его северная половина в среднем значительно ниже южной. Предполагается, что несколько миллиардов лет назад северная низменность была заполнена океаном. Анализ данных лазерной альтиметрии показал детально форму его береговой линии. На карте А (внизу) хорошо виден бассейн Эллада, на карте В (в левой части) видно плоскогорье Фарсида с четырьмя гигантскими потухшими вулканами (Олимп – вблизи края, и горы Аскрийская - верхний из тройки, Павлина и Арсия); в правой части видна долина Маринеров – тектонический разлом протяженностью около 5000 км.

Как известно [1] тепловой поток из планетных недр характеризует основной масштаб внутренней энергетики планеты и определяет интенсивность её тепловой эволюции. По оценкам, тепловой поток из недр Земли первые 0.6 млрд. лет был более чем в пять раз больше современной теплопотери. Это означает, что, не располагая данными о жизни планеты в то время, мы не можем судить о начальной её эволюции, которая по своему масштабу эквивалентна эволюции в последние 3 млрд. лет.

Данные о ранней Земле могут быть получены при рассмотрении эволюции лунной орбиты [7]. Из-за приливного трения Луна, после своего образования отодвигается от Земли. Анализ, выполненный в [7] показал, что до эпохи катастрофической бомбардировки Луна отодвигалась от Земли за счет

приливного трения в теле Земли. Такая ситуация соответствует планете покрытой водной оболочкой – глобальным океаном. Катастрофическая бомбардировка привела к возникновению и росту континентального сегмента Земли, появлению мелководья – разрушение приливных волн на котором, приводит к более мощному механизму приливного трения. Таким образом, после эпохи катастрофической бомбардировки, отодвигание Луны от Земли связано с приливным трением океанских приливов. История континентов на Земле рассмотрена в обзоре Роджерса [8]. Заметим лишь, что первый континент образовался примерно 3 млрд. лет тому назад.

Мы уже отмечали, что поверхность Марса хранит следы событий, которые происходили в зоне планет земной группы до эпохи катастрофической бомбардировки. Одной из важнейших задач при исследовании Марса является сбор данных об этой ранней эпохе, которые также помогут нам продвинуться в разработке теории ранней Земли.

Проблема ранней эволюции планет земной группы в связи с изменениями светимости Солнца.

Теория образования и внутреннего строения звезд приводит к выводу, что светимость раннего Солнца была примерно на 30 % меньше современной [9]. Это заключение получено на основе детальных численных моделирований эволюции звезд. По достижении температуры в центре звезды значений, достаточных для начала термоядерных реакций и превращения водорода в гелий, Солнце вступает на главную эволюционную ветвь звездной последовательности. «Горение» водорода сопровождается выигрышем объема, то есть происходит сжатие вещества, которое сопровождается увеличением температуры. Скорости термоядерных реакций быстро нарастают с ростом температуры. Все это приводит к росту температуры излучающей поверхности звезды и увеличению ее площади поверхности. Расчет как раз и показывает, что в эпоху выхода Солнца на главную последовательность 4.6 млрд. лет тому назад его светимость была примерно на 30% меньше современной. Рост светимости Солнца со временем может быть описан линейным законом.

Низкая светимость молодого Солнца указывает на то, что на ранних Земле и Марсе должны были быть атмосферы, обеспечивающие заметный парниковый эффект. Об этом свидетельствуют данные, согласно которым на Земле в Архее был теплый влажный климат. Аргументы в пользу раннего теплого, влажного Марса приведены в работе [10]. Автор статьи [10] отмечает, что кратеры с диаметром в несколько десятков километров на территориях с возрастами старше ~ (3.8 - 3.5) млрд. лет обнаруживают разную степень старения. По его оценке, в эту раннюю эпоху (до заключительной тяжелой бомбардировки планеты, разрушившей раннюю плотную атмосферу) скорость эрозии кратеров составлена ≈10 микрон/год. Напротив эрозия кратеров образовавшихся в более поздние эпохи резко уменьшилась и составляла не более 0,01 микрон/год. Модели теплого влажного Марса рассмотрены в работе [11].

По-видимому, относительно теплый климат на Земле и Марсе в ранние эпохи обеспечивался парниковым эффектом в атмосферах, богатых углекислым

газом при небольшой примеси водяного пара [12]. Впервые эту модель предложили и количественно анализировали Мухин и Мороз [13, 14]. Лишь позднее ее стали рассматривать западные авторы [15, 16] – без ссылок на наши работы. Напомним, что парниковый эффект играет огромную роль в формировании климата современной Земли, поддерживая среднюю температуру ее поверхности на 38 градусов выше эффективной (т.е. соответствующей равновесию планетарного уходящего и солнечного приходящего излучения). На современном Марсе парниковый эффект тоже есть, но гораздо более слабый, всего около 4 градусов.

Пока что теоретические построения моделей ранних атмосфер все ещё носят умозрительный характер. Данные о приповерхностных слоях Марса, которые будут получены с помощью геофизических зондирований, позволят продвинуться дальше в решении этого вопроса. Особый интерес представляет поиск углерода и его соединений в наружных слоях Марса.

Космогонический аспект

Считается, что исследования Марса внесут крупный вклад в решение космогонической проблемы [17]. Марс является одной из планет земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс и не состоявшаяся планета - пояс астероидов). По массе он в 10 раз меньше Земли, хотя по оценке распределения не летучей компоненты (силикаты, железо, никель) в Солнечной системе должен был бы превосходить по массе Землю примерно в два раза. Малая масса Марса объясняется эффектом Юпитера.

Из планет Солнечной системы первым образовался Юпитер, хотя объяснить это обстоятельство пока не удается. Благодаря мощному гравитационному полю ранний Юпитер разбросал оставшиеся прототела из своей зоны питания. Эти прототела, а также резонансные взаимодействия разрушили зону питания планеты, которая могла сформироваться в поясе астероидов, и сильно уменьшили количество прототел в зоне питания молодого Марса, приостановив его рост. Именно поэтому масса Марса оказалась на порядок меньше. Мы знаем, что сильно кратерированное южное полушарие Марса является очень древним. Поэтому не исключено, что возраст древнейших пород марсианской коры позволит оценить сверху время формирования Юпитера – важнейшего неизвестного параметра в современной космогонии.

Влияние Юпитера привело к перемешиванию прототел из различных зон питания растущих планет земной группы; в этом смысле образование Земли и Марса было многокомпонентным. На основе анализа картины распространенности элементов в мантии Земли и в SNC метеоритах была выдвинута идея о том, что планеты земной группы сформировались из планетезималей с разной степенью окисленности. В работе [18], как первое приближение, была предложена двухкомпонентная модель аккумуляции планет земной группы, состав которых рассматривается, как некоторая смесь компонент «А» и «Б» (подробнее в [1]). В компоненте «А» вещество сильно восстановлено. Прототела, состоящие из компоненты «А», заполняли зону питания формирующейся Земли. В компоненте «Б» вещество сильно окислено и содержит все элементы, включая летучие, с отношениями, как у метеоритов

класса С1. Из компоненты «Б» состояли прототела зоны, где в настоящее время расположен пояс астероидов.

Было сделано заключение [18] о том, что компоненты «А» и «Б» в Марсе смешаны в отношении 60:40, а в Земле – 85:15, и аккумуляция Марса шла почти однородно, в противоположность химически неоднородной аккумуляции Земли. В работе [19] было показано, что именно в модели внутреннего строения Марса должна ярче всего проявиться двухкомпонентность.

Модель внутреннего строения Марса

При исследовании планет центральной задачей геофизики является построение модели внутреннего строения. На первых шагах разрабатывается сферически симметричная модель, когда плотность ρ (r) и давление p (r) зависят только от радиуса. Для ответа на самые сложные вопросы необходимо будет построить региональные модели наружных слоев Марса.

Модель внутреннего строения Земли построена с помощью сейсмических данных. Для определения вещественного состава недр используются данные о составе коры, ксенолитов – образцов мантии вынесенных вулканическими лавами на поверхность Земли, и данными, полученными в лабораториях под давлениями, при которых определяются физические параметры горных пород в условиях соответствующих недрам планеты.

Для Марса сейсмические данные отсутствуют, и для их получения потребуется создание обширной сейсмической сети на поверхности планеты. В настоящее время исходным пунктом построения модели внутреннего строения является химическая модель планеты, предложенная Вэнке и Дрейбус (ВД модель) [18].

В работе [20] был построен набор моделей внутреннего строения Марса удовлетворяющих данным о средней плотности ρ_0 = 3.94 г/см^3 и приведенном моменте инерции планеты (I), который удалось определить в последнее время в результате космической миссии «Марс Пасфайндер» [21], $I = (A+B+C)/3*M*R^2 = 0.3658 \pm 0.0017$, где A и B – главные экваториальные, а C – полярный моменты инерции, $M = 6.43 \cdot 10^{26}$ г – масса, R=3390 км - средний радиус планеты. Глобальная модель получилась путем соединения модели коры из [22], модели силикатной мантии [23] и модели ядра [19]. В будущем, когда будут получены данные, которые позволят детализировать модели коры, силикатной мантии и ядра, каждая из этих моделей сможет быть использована для ответа на ряд фундаментальных вопросов. Модель коры должна дать ответ на содержание в ней воды и карбонатов и, таким образом, приблизить нас к решению проблемы ранней плотной атмосферы состоящей из CO_2 и H_2O, обеспечивающих парниковый эффект и теплый, влажный климат на Марсе в период до 3.8÷3.5 млрд. лет тому назад. Модели мантии и ядра позволят конкретизировать космогонический процесс при образовании планет земной группы и понимание геологической истории Марса, модель ядра должна объяснить генерацию магнитного поля на раннем Марсе, причем ядро, судя по

огромным значениям полосовых магнитных аномалий, должно было находиться в состоянии развитой конвекции. Пробная модель внутреннего строения Марса, удовлетворяющая всем имеющимся на сегодня данным наблюдений, показана на рис. 2.

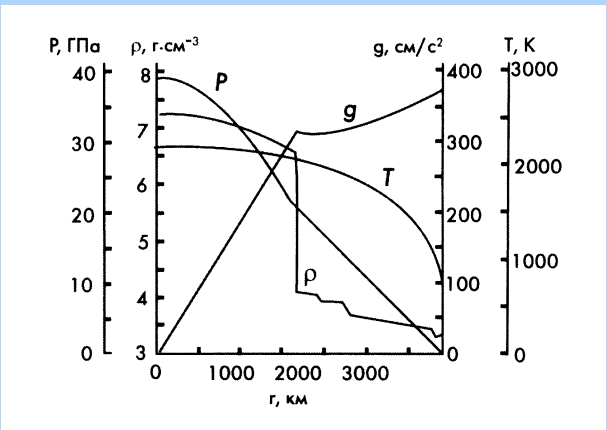

Рис.2. Модель внутреннего строения Марса, удовлетворяющая всем имеющимся на сегодняший день данным.

Основной вопрос, по которому в настоящее время идет дискуссия, это насколько космогоническая модель дающая массовое отношение Fe/Si = 1.71, может соответствовать современным моделям внутреннего строения планеты. Крупный шаг вперед будет сделан тогда, когда из наблюдений с хорошей точностью будет определен радиус ядра планеты. Хотя, практически никто, не сомневается, что ядро Марса жидкое, это также требует наблюдательной проверки.

В космическом центре JPL (США) построена модель гравитационного поля Марса, «Mars 50c», в которой разложение гравитационного потенциала планеты по сферическим функциям доведено до 50-ой гармоники [24]. В модели «Mars 50c» пики гравитационных аномалий 2387, 1646, 1221 и 1547 миллигал относятся к гигантским щитовым вулканам Olympus, Arsia, Pavonis и Ascraeus, соответственно, (1 гал = 1 см/с^2). Наибольшие гравитационные аномалии на Земле порядка 100 миллигал. Гигантские, по земным меркам, значения гравитационных аномалий Марса указывают на то, что планета имеет мощную литосферу, по оценкам ~ 500 км, которая выдерживает нагрузки от этих структур. Наружный слой Марса является достаточно холодным. Этот результат можно рассматривать как косвенное указание на то, что начальное развитие Марса прошло через стадию «океана магмы», во время которой произошло заметное обеднение содержания мантии радиоактивными источниками тепла из-за выноса последних в кору.

В настоящее время информационное обеспечение науки о Марсе основано на данных о поверхности планеты и её атмосфере. Ценность данных о гравитационном поле многократно возрастет после сейсмических просвечиваний планетных недр. Таким образом, геофизические зондирования (сейсмические, электромагнитные) добавят третье измерение к имеющимся данным. Как кульминация, исследований Марса с помощью автоматов, экспедиция к Марсу с участием человека позволит провести эксперименты с активной и пассивной сейсмикой, электромагнитные зондирования, бурение и измерение теплового потока, что позволит приступить к построению вещественных моделей наружных слоев планеты и реальной гидрогеологической модели криолитосферы. Детальный отбор образцов из осадочных слоев также будет иметь принципиальное значение.

Многообразие марсианской проблематики.

Изучение Марса представляет наибольший интерес с позиций сравнительной планетологии (геофизика, геохимия, экзобиология, физика атмосферы, история климата). Марс – планета, наиболее похожая на Землю. Но есть важные отличия. Кроме того, что Марс меньше по массе и размеру, многое различается в характеристиках коры, поверхности и атмосферы, в истории воды на планете. Относительно геологических процессов можно сказать, что на Марсе они исключительно разнообразны, а сама поверхность весьма региональна, так что ее изучение позволит обогатить геологические аспекты сравнительной планетологии. На поверхности Марса выделяется область Фарсиды, приподнятая на 4 км и занимающая около 15 % площади планеты (рис. 1В). На Фарсиде расположены гигантские щитовые вулканы, один из которых – Олимп (рис. 3) – является крупнейшим в Солнечной системе. Поверхность характеризуется дихотомией: южное полушарие, более древнее и испещренное кратерами, приподнято, а северное покрыто равнинами и несколько опущено. В промежутке расположена обширная переходная зона. От Фарсиды на восток протягивается гигантская рифтовая система – Долина Маринеров.

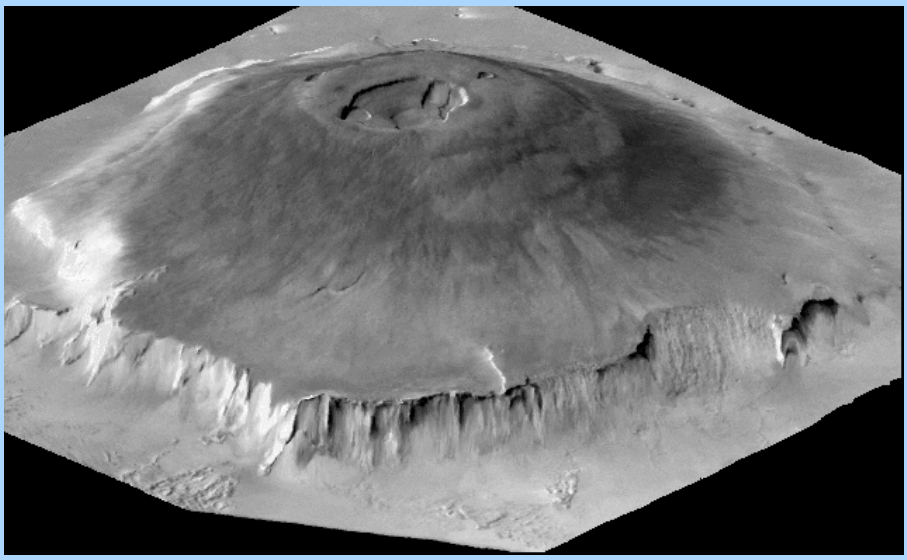

Рис.3. Гора Олимп – самый большой вулкан, среди известных на планетах Солнечной системы. Трехмерная реконструкция на основе анализа изображений, полученных на космических аппаратах "Викинг-1 и -2".

Большой прогресс в изучении марсианской топографии и поверхности был достигнут при помощи лазерного альтиметра и фотографической камеры высокого разрешения на борту космического аппарата «Марс Глобал Сервейер», которые обнаружили то, что слоистость верхней коры является общим свойством планеты (в долине Маринеров она прослеживается до глубины ~ 10 км).

Можно сделать общий вывод, что в отличие от Земли, развивающейся в режиме тектоники плит, развитие Марса происходит в режиме плюмовой тектоники. Один гигантский мантийный плюм создал Фарсиду, а другой, менее мощной, область Элизиума. Считается, что возникновение тектоники плит на Земле связано с наличием воды. На Марсе, в отличие от Венеры, также есть

вода, но, тем не менее, развитие планеты пошло, скорее всего, по линии тектоники плюмов, а не плит. Несомненно, изучение Марса внесет важный вклад в понимание механизма возникновения тектоники плит на Земле.

Причиной пониженного уровня северного полушария может быть то, что ранний плейт-тектонический процесс, локализованный в северном полушарии, затормозился из-за недостатка энергии в недрах планеты и ее охлаждения. Эта гипотеза, предложенная в [25] Слипом, критиковалась в [26], так что вопрос остался пока нерешенным. На Марсе, несомненно, будут сделаны крупные неожиданные открытия. Одно из них получено космическом аппарате «Марс Глобал Сервейор» и касается характеристик собственного магнитного поля планеты. Результаты предшествующих измерений (на наших космических аппаратах «Марс-3», «Марс-5», «Фобос-2») было трудно интерпретировать, хотя и был сделан вывод о том, что планета имеет некоторое, хотя и слабое собственное магнитное поле. Трудности были связаны с тем, что наши искусственные спутники работали на эллиптических орбитах с высоким перицентром. «Марс Глобал Сервейор» был выведен на почти круговую и более близкую к поверхности орбиту. Проведенные на нем магнитные измерения [27, 28] подтвердили, что собственное магнитное поле у Марса есть, но оно не является дипольным и состоит из локальных очагов. Самые сильные из них (с напряженностью до 1500 гамм) расположены в южном полушарии. Это своего рода магнитные полосы, которые протягиваются, примерно, с востока на запад, причем, соседние полосы намагничены в противоположных направлениях. Всего обнаружено 5-6 таких пар. Такую же магнитную структуру обнаруживает океаническое дно Земли, что связано с переполюсовками земного магнитного поля и раздвижением океанического дна по механизму тектоники плит. На Земле по мере удаления от срединно-океанических хребтов, возраст океанического дна возрастает. Датировка магнитных полос на Марсе отсутствует. Механизм образования полос не ясен, хотя можно ожидать, что они свидетельствуют о каких то важных процессах происходивших на Марсе в первые 0.5 млрд. лет, когда в жидком (по крайней мере, тогда) ядре планеты генерировалось собственное магнитное поле.

На Марсе имеется ряд других крупных геологических структур разных масштабов: гигантские кратерные бассейны, полярные шапки. Особый интерес с точки зрения более поздних эволюционных процессов представляют проявления флювиальных и карстовых процессов, переноса вещества ветром, полярные слоистые образования.

Атмосфера Марса состоит на 95 % из двуокиси углерода. Давление у поверхности близко к тройной точке воды – 6.1 мб. И это, возможно, не случайное совпадение [29]. Открытые водоемы не могут существовать на Марсе, однако вода на планете имеется: следы водяного пара в атмосфере, вода, адсорбированная реголитом, кристаллизационная вода в породах, водный лед в полярных шапках (имеется в виду, их квази-постоянная часть), вечная мерзлота и, возможно, при определенных условиях (наиболее теплые области в теплое время суток, соляные добавки) жидкая вода в грунтовых порах. Несмотря на то, что вода на Марсе «спрятана», ее роль в современной жизни планеты весьма значительна: она даже может служить регулятором, поддерживающим содержание двуокиси углерода в атмосфере на постоянном уровне.

Однако ряд особенностей современной поверхности планеты указывает на то, что были эпохи, когда вода играла еще большую роль: разветвленные долины, весьма напоминающие русла высохших рек (вади) являются наиболее ярким примером. Гипотеза о более теплом древнем Марсе с открытыми водоемами – реками (см. рис. 4), озерами, может быть, даже морями – и с более мощной атмосферой (на что указывает ее изотопный состав) обсуждается уже более двух десятилетий, она кажется почти неизбежной, однако многие вопросы с ней связанные еще ждут ответа [12, 30]:

(а) каковы запасы воды на Марсе,
(б) как они распределяются между разными резервуарами (реголит, вечная мерзлота и т.д.), разными широтными зонами, геологическими провинциями),
(в) как менялось это распределение со временем (история воды),
(г) действительно ли была и если да, то как давно началась и закончилась эпоха теплого и влажного климата на Марсе,
(д) была ли она однократным событием или повторялась?

В сущности, речь идет о том, что на Марсе произошла некогда глобальная экологическая катастрофа. Учитывая те изменения в климате Земли, которые происходят на наших глазах вследствие вмешательства индустриальной цивилизации и явно несут Земле угрозу глобальной экологической катастрофы, чрезвычайно важно понять, как и почему это случилось с Марсом. Здесь невозможно ничего сделать при помощи какого-то однократного космического эксперимента. Только длительная серия экспедиций разного типа (посадочные аппараты – стационарные и подвижные,

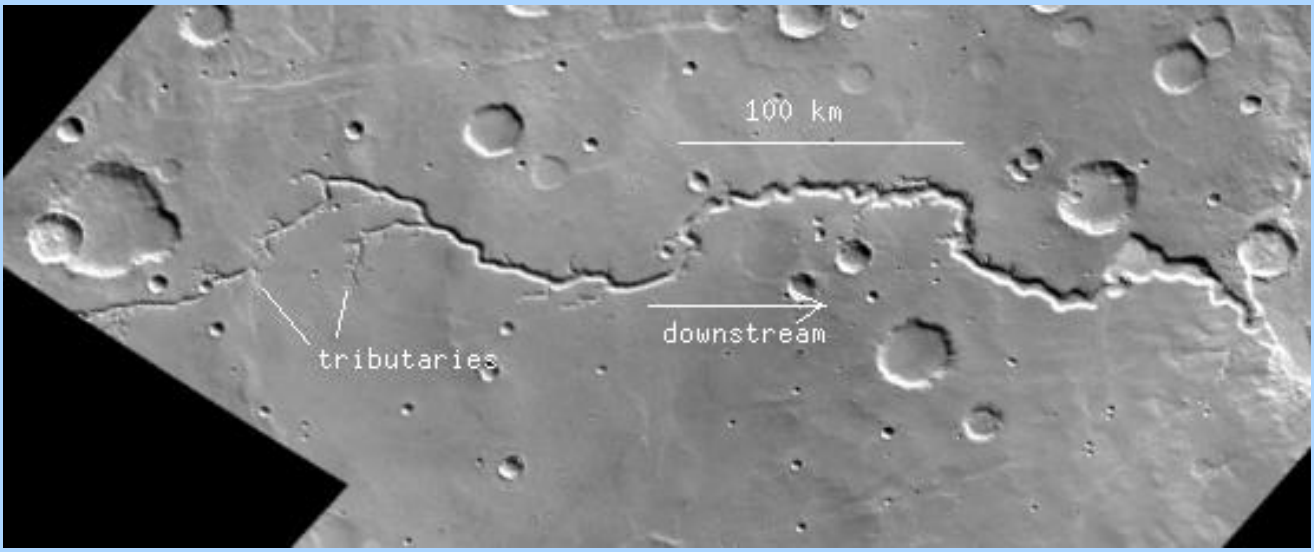

Рис.4. Ниргал – пример русла высохшей марсианской реки с разветвленной системой притоков .

спутники, миссии с доставкой вещества и, наконец, – крупномасштабные экспедиции с участием человека, позволит накопить сведения, необходимые для воссоздания климатической истории Марса. Это долгий и трудный процесс, требующий объединения усилий многих стран.

С проблемой запасов воды, истории климата и иссушения тесно связано строение наружного пористого слоя планеты толщиной 8-10 км. Эта задача будет решаться при помощи геофизических измерений in situ (сейсморазведка, электромагнитное зондирование, измерения теплового потока, бурение) и длинноволновой радиолокации со спутника. Прогнозируется, что запас воды на Марсе может составлять от 100 до 500 м (имеется в виду равномерный слой воды, порывающей всю планету).

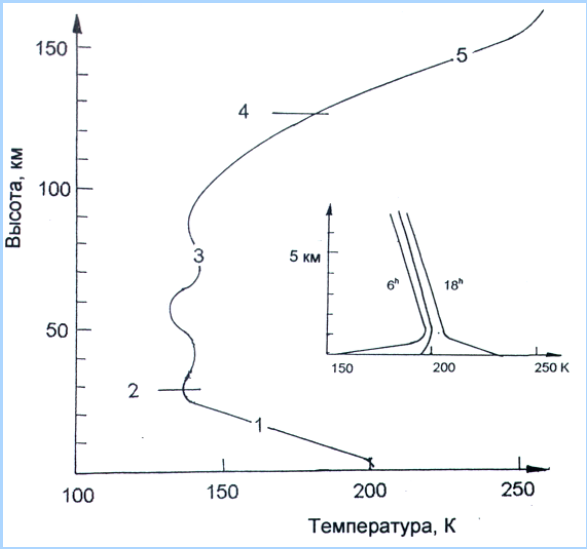

Рис.5. Схема строения атмосферы Марса: 1 – тропосфера, в которой тепловой поток переносится от поверхности вверх и температура падает с высотой, 2 – тропопауза – ее верхняя граница, 3 – мезосфера, где тепловой поток излучается в космическое пространство, и температура мало меняется с высотой (но имеются нерегулярные вариации), 4 – гомопауза – уровень, выше которого происходит диффузионное разделение атмосферных газов, 5 –термосфера, нагреваемая в результате поглощения солнечного жесткого ультрафиолетового излучения; здесь тепловой поток направлен вниз, и температура возрастает с высотой (до величины 250-400 К на высоте около 200 км). На врезке показан характер суточных вариаций температуры в нижней части тропосферы. Представленный здесь профиль соответствует, примерно, умеренным широтам и осени в северном полушарии. На врезке показан характер суточных изменений температурного профиля пограничного слоя (по расчетам его теплового баланса); их амплитуда значительно больше, чем на Земле.

Строение наружных слоев Марса не является горизонтально однородным. Установление локальной структуры в местах посадки геофизических станций может затем использоваться при создании глобальной модели криолитосферы планеты в виде реперных точек.

Понять историю марсианского климата невозможно, не поняв его современное состояние. Значительная по массе доля марсианской атмосферы проходит через процессы конденсации (осенью) и испарения (весной) двуокиси углерода в сезонных полярных шапках.

Это сопровождается сильным меридиональным переносом. Некоторое (и возможно значительное) количество двуокиси углерода не участвует в настоящее время в этих сезонных процессах, т.к. не успевает, по-видимому, испариться в одной из полярных шапок (северной), другая часть адсорбирована реголитом. При изменениях наклонения экватора, распределение двуокиси углерода между газовой и твердой фазой может измениться. Парниковый эффект на Марсе может значительно увеличиться при соответствующем изменении соотношения фаз.

Здесь прослеживается возможная аналогия со сменами периодов оледенений и потеплений на Земле.

На Марсе и на Земле большое влияние на формирование климата имеет атмосферный аэрозоль. На Марсе периодически это влияние резко усиливается – во время прохождения им перигелия. Часто, но не всегда, в этот период возникают глобальные пыльные бури, не имеющие аналогов на Земле в современную эпоху. Однако на Земле в пустынях бывают локальные пыльные бури. Перенос пыли ветром играет большую роль на обоих планетах, способствуя росту пустынь на Земле. На Марсе явления такого типа выражены более резко, поэтому их изучение может оказаться полезным для понимания механизмов и прогнозов изменения облика земных континентов. Пустыня Сахара, как известно, не всегда была пустыней.

Разработка моделей общей циркуляции атмосферы Марса и Земли проводится на основании одних и тех же или близких подходов и методов. Отсутствие океанов на Марсе делает его несколько более простым и очень полезным объектом для решения задач такого рода. Накопление данных о динамике атмосферы Марса создает независимую базу для проверки подходов и методов «земной» динамической метеорологии являющейся основой досрочных прогнозов погоды.

Некоторые характеристики циркуляции марсианской атмосферы уже изучались: это упомянутый меридиональный перенос с сезонным изменением направления, планетарные волны в северном полушарии, внутренние гравитационные волны, склоновые ветры, тепловые приливы. Общий характер строения атмосферы Марса известен (рис.5), однако, в целом, имеющаяся количественная информация недостаточна для создания полноценной модели общей циркуляции. Особенно бедны экспериментальные данные о пограничном слое атмосферы.

Исследования в области динамики марсианской атмосферы должны:

1) описать пространственно-временную структуру общей циркуляции,

2) объяснить количественно связь этой структуры с внешними факторами, такими как распределение нагрева и охлаждение в глобальном масштабе, скоростью вращения, свойствами поверхности (рельеф, альбедо, тепловая инерция),

3) найти связь всего этого с переносом пыли и летучих, и, наконец, с эволюцией климата.

Необходимая стратегия проведения космических экспериментов требует длительных одновременных измерений как при помощи метеостанций на поверхности, так и с орбиты.

Среди факторов влияющих на эволюцию атмосфер, значительную роль играют процессы в верхней атмосфере, а также взаимодействие планеты с солнечным ветром.

Взаимодействие Марса с солнечным ветром зависит от величины собственного магнитного поля планеты. Солнечный ветер индуцирует магнитные поля в ионосфере, и, следовательно, надо знать их структуру и поведение, чтобы выделить собственное поле. Одновременно с магнитными измерениями необходимо определять различные характеристики ионосферы и переходной зоны, такие как концентрация, потоки и температура, а также

свойства нейтральной верхней атмосферы – состав и температура на разных высотах.

Как уже упоминалось, марсианская атмосфера, по-видимому, эволюционировала. Важную роль при этом играла атмосферная диссипация. Водород уходил из-за тепловой диссипации, азот, кислород и углерод могли теряться в результате действия различных механизмов нетепловой диссипации, таких как диссоциативная рекомбинация, захват ионов солнечным ветром и выметание нейтралов захваченными ионами. Для понимания эволюции атмосферы необходимо изучение этих процессов, что требует прямых измерений в верхней атмосфере со спутников с достаточно низким перицентром.

Приведем вывод, сделанный на основе анализа результатов миссии «Марс Пасфайндер» [31]: «Сведение всех полученных данных вместе поддерживает идею, согласно которой ранний Марс возможно был землеподобен. Некоторые коровые материалы на Марсе возможно аналогичны по содержанию кремнезема континентальной коре Земли. Округлые валуны, булыжники и конгломераты обогащенные песком и пылевыми частицами и модели их происхождения поддерживают идею об обогащенной планете, в которой ранняя среда была более теплой и влажной и жидкая вода находилась в равновесии с атмосферой, возможно, аналогично тому, как это было на ранней Земле. В противоположность этому, Марс, начиная с Хесперийской эпохи (1.8 млрд. лет тому назад), стал весьма не похож на Землю, когда скорость процессов эрозии стала очень низкой, и она с тех пор привела к малым изменениям поверхности в месте посадки КА «Марс Пасфайндер».

Поиски жизни на Марсе.

Если у Марса в далеком прошлом были более плотная атмосфера, более теплый климат и жидкая вода на поверхности, там могла возникнуть жизнь. В 1996 г. было опубликовано сенсационное сообщение [31] о том, что в одном из SNC метеоритов - ALH84001 - обнаружен ряд возможных свидетельств биологической активности в далеком прошлом. Это сообщение вызвало громадный интерес не только ученых, но и широкой общественности. В течение трех лет, прошедших после этого сообщения проводятся большие работы по изучению SNC-метеоритов, различных аспектов проблемы марсианской палеобиосферы, а также возможности жизни в экстремальных условиях на Земле. Тем не менее, вопрос остается нерешенным. Может быть, более убедительные свидетельства будут получены позднее (в 2008 г.?) когда по планам должен быть доставлен образец марсианского вещества на Землю. Скорее же всего решение проблемы будет отложено до полета человека к Марсу, когда можно будет провести заборы вещества из осадочных слоев с детальным датированием и описанием обстановки мест из которых забран грунт.

Гипотеза о жизни на Марсе пережила долгую и драматическую историю, в которой можно выделить несколько этапов:

(1) открытие «каналов» и сезонных изменений (конец Х1Х – начало ХХ вв.),

(2) попытки идентификации полос поглощения органических веществ в спектре Марса (50-60е гг.),

(3) проведение на посадочных аппаратах Викинг-1 и 2 комплекса экспериментов по обнаружению следов жизнедеятельности микроорганизмов, а также сложных органических молекул (1976 г.),

(4) упомянутые выше исследования ALH84001.

Каналы оказались оптическим обманом. Сезонные изменения объясняют сейчас перемещением пыли. Полосы поглощения, как выяснилось, не имели отношения к Марсу. Наконец, результаты биологических экспериментов на посадочных аппаратах Викинг были отрицательными (хотя иногда они трактуются и как неопределенные). О ситуации вокруг ALH84001 мы уже упомянули. Тем не менее, поиски должны быть продолжены. Обнаружение марсианской биосферы, современной или вымершей, было бы одним из величайших открытий в истории науки.

Фобос и Деймос.

Спутники Марса, Фобос и Деймос, были открыты американским астрономом Холлом в 1877 г. Это объекты ~12 звездной величины, и наблюдение их в телескоп затрудняется соседством яркого Марса. Плоскости их орбит почти совпадают с плоскостью экватора планеты. Вращение – синхронное (к планете всегда обращена одна и та же сторона). Фототелевизионные камеры космических аппаратов Маринер-9, Викинг-1 и 2, Фобос-2 позволили определить их форму, размеры, строение поверхности. Это были первые тела «астероидальных» размеров, ставшие доступными для детального исследования. Не известно на самом деле, каково их происхождение: являются ли они захваченными астероидами или образовались вместе с Марсом.

Фобос исследован более детально. В 1988 г. к нему были отправлены космические аппараты «Фобос-1» и «Фобос-2». Один из них (Фобос-2) сблизился с Фобосом и даже стал его искусственным спутником, однако последняя фаза миссии (тесное сближение и высадка малых станций) не удалась. По этой причине люди, не знающие существа дела, оценивают всю миссию как неудачную, но это не так, поскольку было получено много новых научных данных как о самом Фобосе, так и о Марсе. Были определены масса и плотность Фобоса, уточнены карты поверхности, измерены тепловая инерция и спектр отражения поверхностного слоя. Фобос имеет очень малое альбедо, и ранее предполагалось, что он состоит из углистых хондритов, однако спектры отражения, измеренные на КА «Фобос-2» заставляют отказаться от этой гипотезы [33]. Загадочной особенностью являются борозды на его поверхности. Возможно, они связаны с глубинными трещинами ударного происхождения. Инфракрасные измерения показали, что на поверхности Фобоса находится раздробленный материал – реголит, похожий на лунный, но частицы его, по-видимому, имеют несколько большие размеры. Подозревается существование тороидального пылевого облака (кольца?) на орбите Фобоса. В этом случае происходит постоянный обмен материалом между ним и поверхностью.

Не исключено, что вещество Фобоса, как и других малых тел Солнечной системы, является первичным, т.е. сохранившимся со времени ее формирования. Поэтому его детальные исследования его состава, особенно

изотопного, являются задачей высокого приоритета. Многое можно сделать в прямых измерениях при посадке, однако самым надежным было бы доставить образец вещества на Землю и исследовать его в лаборатории. Для решения этой задачи в России приступили к созданию космического аппарата «Фобос-Грунт». Не будем говорить о сроках реализации, учитывая, что общее положение с финансированием фундаментальных научных исследований (включая космические) в нашей стране пока является катастрофическим.

Счет 2:6 - не в нашу пользу!

Далеко не все в исследованиях Марса получается так, как хотелось бы. За последние десять лет к Марсу стартовали 7 космических аппаратов. Один – японский – еще находится в полете. Что же касается остальных шести, то только два из них сработали успешно – «Марс Пасфайндер» и «Марс Глобал Сервейор». Погибли Российский «Марс-96» и американские «Марс Обзервер» (в 1992 г.), «Марс Клаймет Орбитер» и «Марс Полар Лэндер» (оба в 1999 г.). Высокий процент неудач наводит на еретическую мысль: а вдруг на Марсе все-таки существует разумная цивилизация, и марсиане решили оказывать организованное сопротивление? Но дело, конечно, не в этом. Во всяком случае, причины двух последних неудач, повидимому, имеют вполне земной корень - это внутренне противоречивое стремление делать все «лучше, дешевле, быстрее», чем раньше. Именно так НАСА сформулировала в 1992 г свой подход к организации научных космических проектов. Была сформирована весьма амбициозная программа исследований Марса, предусматривающая запуск двух космических аппаратов (спутник и посадочный аппарат) в каждое астрономическое окно, т.е. с интервалом, примерно 2 года. Кульминацией должна стать очень сложная миссия с доставкой на Землю образца марсианского вещества (2005 г. – старт, 2008 г. прибытие капсулы с образцом). Ресурсы на эту программу отведены, по нашим масштабам, громадные, но по американским «в обрез». Стали экономить на вещах, в которых экономить опасно. В результате получилось то, что получилось.

Один из способов экономить ресурсы – это международное сотрудничество. Несколько лет велись переговоры о совместных российско-американских полетах к Марсу. Объявили о том, что будем развивать концепцию «Вместе к Марсу». Например, рассматривался вариант, в котором наша ракета выводит к Марсу российский посадочный аппарат и американский спутник. Переговоры захлебнулись. В конце концов, все свелось к участию российских ученых в американских миссиях на уровне отдельных экспериментов. Такое участие было на аппаратах «Марс Клаймит Орбите» и «Марс Полар Лэндер», так что мы тоже – пострадавшие. После потери «Марса-96» еще и это!

Очень серьезное партнерство в будущих исследованиях Марса завязалось между НАСА и КНЕС (французское космическое агентство). Для проекта по доставке образца вещества КНЕС предоставит ракету «Ариан-5» и выведет на околомарсианскую орбиту спутник для перехвата контейнера с образцом. Вероятно, эта программа будет сдвинута по срокам, но вряд ли отменена.

Европейское космическое агентство развернуло работы над независимым проектом «Марс Экспресс» - искусственный спутник и посадочный аппарат, старт в 2003 г. На спутнике будет установлено несколько крупных приборов, взятых из запасного комплекта научной аппаратуры КА «Марс-96». Ответственными за эти эксперименты являются ученые Франции, Германии, Италии, Швеции, но в их подготовке участвуют также российские специалисты.

Таким образом, вокруг исследований Марса сложилась широкая международная кооперация. Задумкой дальнего прицела (~ 2020 г.?) является пилотируемая экспедиция на Марс. Россия уже внесла большой вклад в решение этой грандиозной задачи результами уникальных медико-биологических исследований на станции «Мир».

Требуется запасная планета.

Естественно поставить вопрос, а зачем нужно посылать на Марс пилотируемую экспедицию, высаживать на его поверхность космонавтов? Будут ли оправданы риск, огромные затраты ресурсов? Есть ли такие научные задачи, ради которых стоит это делать? Американские пилотируемые полеты на Луну (миссия Аполлон) дали отличные научные результаты. Однако всем ясно, что эти программа выполнялась не для науки, а для достижения мощного политического эффекта: доказать всему миру (и самим себе) американское превосходство в освоении космоса. Напомним, что запуск в СССР первого искусственного спутника Земли и полет Ю.А. Гагарина были шоком для всей той части мира, от которой мы были отгорожены железным занавесом. Хочется верить, что не будет больше ни железного занавеса, ни холодной войны, и такие грандиозные затеи как пилотируемая экспедиция на Марс будут выполняться с участием многих стран, включая и Америку и Россию. Но тогда что же остается – только решение научных задач?

Мы думаем, что в данной области науки (исследования Солнечной системы) такой научной задачи, которая оправдала бы затраты в сотни миллиардов «у.е.», в природе не существует. Но есть задача футурологическая. Космические катастрофы не раз обрушивались на планеты. Около 70 млн. лет назад на Земле исчезли динозавры – все и одновременно. Причиной может быть только космическая катастрофа: столкновение нашей планеты с астероидом или кометой. Можно предполагать, что подобное событие, если оно произойдет в будущем, может привести к гибели человечества. Чтобы от этого застраховаться, надо иметь в Солнечной системе обитаемые базы с автономным жизнеобеспечением. Лучше всего было бы иметь запасную планету. Марс кажется наиболее перспективной кандидатурой. Если в прошлом там были более плотная атмосфера и теплый климат, то, может быть, в очень отдаленном будущем удастся вернуть Марс в это состояние? Мы видим, что всего за 100 лет антропогенные процессы на Земле оказались достаточными для некоторых изменений состава атмосферы и климата (усиление парникового эффекта). Что же касается других планет, то уже есть в научной литературе термин «terraforming» – искусственное преобразование планетных атмосфер в сторону приближения по свойствам к земной. Есть надежда, что в очень далеком будущем человечество превратит Марс в еще одну обитаемую планету, которая может очень пригодится в случае, если на Землю обрушится космическая

катастрофа. На наш взгляд именно это является важнейшей мотивацией пилотируемых экспедиций на Марс, которые, несомненно, начнут осуществляться в XXI веке.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект 99-02-16013 (В.Ж.)

Литература.

1. Жарков В.Н. От физики Земли к сравнительной планетологии // Природа 1988. № 126.86-97.
2. J.Geophys. Res., v. 104, NE4, 8521-9096, 1999.
3. Harper C.L. Nyquist L.A., Bansal B., Weismann H. And Shin C.-Y. Rapid accretion and early differentiation of Mars indicated by ND / ND in SNC meteorites // Nature. 1995. V. 267. P. 217.
4. Lee D.C., and Halliday A.N. Core formation on Mars and differentiated asteroids // Nature. 1997. V. 388.p. 854 – 857.
5. Treiman A. Martian life «Still Kisking” in Meteorite ALH84001 // EOS. 1999. V. 80. N 18. P. 205-209.
6. Appel P.W.U. and Moorbath S. Exploring Earth’s Oldest Geological record in Greenland // EOS. 1999. V. 80. N 23. P.257-264.
7. Жарков В.Н. Об истории лунной орбиты. // Астрон. Вестн. 2000. Т. 34. № 1. С. 1-12.
8. Rogers J.J. A history of continents in the past three billion years //J. Geology. 1996. V. 104. P. 91-107.
9. Lunine J.I. Climate evolution on Mars, Earth, and Titan: was the ancient Sun fainer? // Planetary Systems, the long view // Eds. L.M. Celnikier, J. Tran Thrank Van. 1998,P. 231-236.
10. Carr M.N. Global history of water and climate // Abstracts 5-th International Mars Conference. 1999.
11. Carr M.H. Retention of an atmosphere on early Mars // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. NE9. P. 21897-21909.
12. Мороз В.И. Физика планеты Марс. Москва, «Наука», 1978.
13. Мухин Л.М. и Мороз В.И. Ранние этапы эволюции атмосферы и гидросферы Земли. Письма в АХ, т.3, с.78, 1977.
14. Мороз В.И. и Мухин Л.М. О ранних этапах эволюции атмосферы и климата планет земной группы. Космич. исслед.,т.15, с.901, 1978.
15. Castings XXXX
16. Forget F. and Pierrenhumbert R.T. Warming of early Mars and Earth with CO2 clouds ice clouds// // Planetary Systems, the long view // Eds. L.M. Celnikier, J. Tran Thank Van. 1998, P. 299-302.
17. Zharkov V.N. The Role of Jupiter in the Formation of planets // Geophys. Monograph 74, IUGG Am. Geophys. Union. 1993. V. 14. P. 7-17.
18. Dreibus G., Waenke H. Origin and evolution of planetary and satellite atmospheres // Eds. S.K. Atreya, J.B. Pollack, M.S. Mattehews. Tucson. 1989. P. 268-288.
19. Жарков В.Н. Внутреннее строение Марса – ключ к пониманию образования планет земной группы // Астрон. вестн. 1996. т. 30. № 6. с. 514-524.
20. Жарков В.Н., Гудкова Т.В. Модели внутреннего строения Марса и отношение Fe/Si // Астрон. Вестн. 1998. Т. 32. Т 5. З. 403-412.
21. Folkner W.M., Yoder C.F., Yuan D.N., Standish E.M., Preston R.A. Interior structure and seasonal mass redistribution of Mars from radio tracking of Mars Phathfinder // Science. 1997. V. 278. P. 1749-1751.
22. Бабейко А.Ю., Жарков В.Н. О минералогическом составе и сейсмической модели марсианской коры // Астрон. вестн. 1997. т. 31. № 5. с. 404-412.
23. Bertka C.M., Fei Y. A profile of Martian mineralogy and density up to core-mantle boundary // LPSC. 1998. V. 27.p. 107-108.
24. Konopliv A.S., and W.L. Siogren. The JPL Mars gravity field. Mars 50 c. Based upon Viking and Mariner 9 Doppler tracking data. JPL publ. 95-5. 1995.
25. Sleep N.H. Martian Plate Tectonics // J/ Geophys/ Res., 1994. V. 99. NE3. P. 5639-5655.

26. Prais M.J. and Tanaka K.L. The martian Northern plains did not result from plate tectonics // LPSC. 1995. V. 26. P. 1147-1148.
27. Acuna M.H., Connerney J.E.P., Ness N.F., Lin R.P., Mitchell D.L., Carlson C.W., McFadden J., Anderson K.A., Reme H., Mazelle C., Vignes D., Wasilewski P., Cloutier P. Global distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment// Science 1999.V.284, P.790-793
28. Connerney, J.E.P., Acuńa M.H., Wasilewski P., Ness N.F., Rčme H., Mazelle C., Vignes D.,Lin R.P, Mitchell D., Clotier P. Magntic Lineations in the ancient crust of Mars// Science 1999.V.284, P.794-798
29. Kahn R. The evolution of CO on Mars // Icarus. 1985. V. 62. P. 75-190.
30. Carr M. Water on Mars. Oxford Univ. Press. New York. 240 pp. 1996.
31. Golombek M.P., and 54 co-workers. Overview on the Mars Pathfinder Mission: Launch through landing, surface operations, data sets, and science results // J. Geophys. Res., 1999. V. 104. NE4. P. 8523-8553.
32. McKay D.S., Gibson E.K.,, Thomas-Kerta K.L., Vali H., Romanek C.S.,Clemett S.J., Chiller X.D.F., Maechling C.R., Zare R.N.,.Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001 // Science 1996,V.273, P.924-930.
33. Ksanfomality L.V. and Moroz V.I. Spectral Reflectivity of Phobos Regolith within the Range 315-600 nm, Icarus 1995, V.117, P.383-401.