

Новые исследования Марса и сравнительная планетология



В.И.Мороз, О.И.Кораблев, А.В.Родин

В последние годы человечество демонстрирует огромные успехи в исследовании Солнечной системы. Несколько месяцев назад аппарат «Nuuygens» спустился на спутник Сатурна Титан, открыв нашему взору холодный углеводородный мир, до сих пор скрытый под плотным слоем фотохимического смога. За последнее десятилетие осуществлена мягкая посадка на астероид, проведен облет и детальное картирование галилеевых спутников Юпитера, осуществлен пуск зондов «Rosetta» и «Deep Impact» к ядрам комет. Однако самые впечатляющие успехи, безусловно, были достигнуты в исследовании Марса, где в последние годы сделано немало крупных открытий.

Самым значительным прорывом в исследованиях Марса за всю космическую эпоху стал проект «Viking» (1976 г., два спутника Марса и два посадочных модуля). Рекордным было время жизни аппаратов: например, посадочный модуль «Viking Lander-1» работал на поверхности более шести лет. Более двух марсианских лет охвачено дистанционными измерениями с орбиты. На основе обобщения огромного объема наблюдательных данных сформирова-



Василий Иванович Мороз (20.05.1931—23.06.2004), доктор физико-математических наук, профессор, 30 лет руководил отделом физики планет и малых тел Солнечной системы ИКИ РАН. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии СССР (1985). Специалист в области физики планет и инфракрасной астрономии. Научный руководитель экспериментов на космических аппаратах «Марс-2, -3, -5», «Венера-9-15», «Вега-1 и -2», «Фобос-2», научный руководитель программ «Марс-96» и «Марс Экспресс» (в России).



Олег Игоревич Кораблев, доктор физико-математических наук, заместитель директора и заведующий отделом физики планет того же института. Область научных интересов — физика планет и космические эксперименты. Участник экспериментов на космических аппаратах «Вега-1 и -2», «Фобос-2», научный руководитель экспериментов в программах «Марс-96», «Марс Экспресс», «Венера Экспресс» и «Бени Колombo».



Александр Вячеславович Родин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной физики Московского физико-технического института, старший научный сотрудник того же института. Занимается физикой планет, климатическим моделированием. Участник экспериментов на космических аппаратах «Вега-1 и -2», «Фобос-2», «Марс-96», «Марс Экспресс», «Венера Экспресс».

© Мороз В.И., Кораблев О.И.,
Родин А.В., 2005

лась картина современного климата Марса, которую иногда называют викинговской [1].

Важной вехой в исследовании Марса в нашей стране стал проект «Фобос-88». Хотя посадка на Фобос не удалась, за два месяца 1989 г. орбитальный аппарат «Фобос-2» сделал больше, чем все предыдущие советские миссии. Впервые исследована вертикальная структура нижней атмосферы, распределение в ней пыли, паров воды, получены уникальные для того времени изображения поверхности в тепловом диапазоне длин волн. Затем последовала череда неудач. На подлете

к Марсу погиб орбитальный аппарат НАСА «Mars Observer» (1992). Еще более амбициозный российский проект «Марс-96» (550 кг научной аппаратуры, две малые станции, два пенетратора) не вышел на межпланетную траекторию из-за отказа разгонного блока ракеты-носителя. Эта авария на многие годы затормозила российскую планетную программу. Большинство задуманных тогда экспериментов удалось осуществить лишь почти через десятилетие, в новом формате международного сотрудничества и, безусловно, с новыми идеями и решениями.

Переменчивый климат Красной планеты

Новейшую историю в исследованиях Марса можно отсчитывать с космического аппарата «Mars Global Surveyor» (MGS). Спутник с аналогами приборов «Mars Observer» — фурье-спектрометром «Thermal Emission Spectrometer» (TES), телевизионной системой, лазерным альтиметром и магнетометром был выведен на орбиту Марса в 1997 г. и работает до сих пор. В течение более трех марсианских лет подряд ведется мониторинг температуры, аэрозолей и содержания водяного пара на

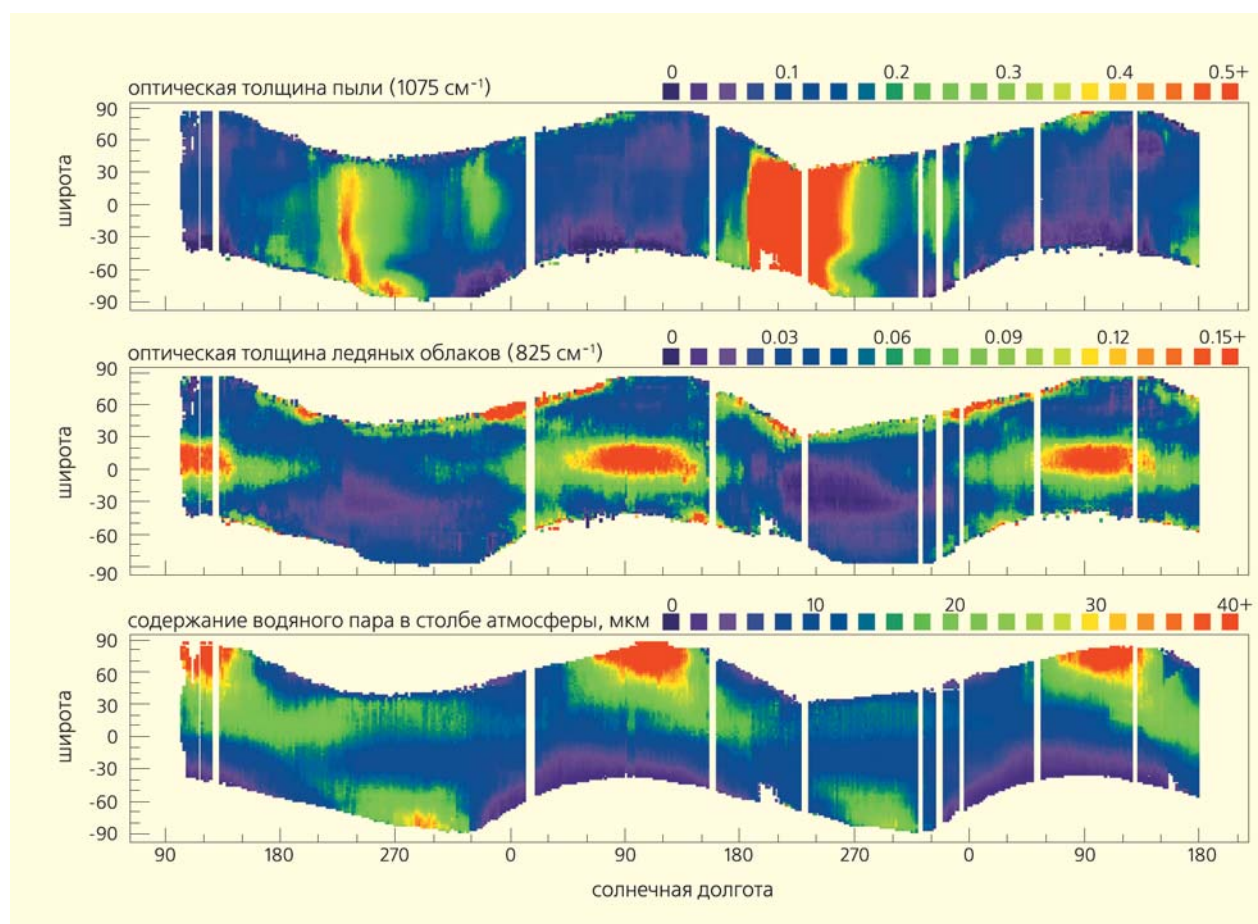


Рис. 1. Сезонный цикл водяного пара и аэрозолей в атмосфере Марса по данным прибора TES «Mars Global Surveyor» [2] для двух марсианских лет. На верхней панели — оптическая толщина пыли в полосе поглощения 1075 см^{-1} , на средней — оптическая толщина ледяных облаков в полосе 825 см^{-1} , на нижней — содержание паров воды в атмосфере. Солнечная долгота L_s обозначает сезон на Марсе ($L_s = 0-360^\circ$; 0° соответствует весеннему равноденствию в северном полушарии). Все данные усреднены по долготе. Максимум водяного пара в северном полушарии вблизи афелия сопровождается повышенной облачностью в экваториальных широтах. Пыли больше вблизи перигелия.

основе данных спектрометра TES (рис.1). Лазерный альтиметр позволил установить с высокой точностью как фигуру планеты с присущей ей глобальной асимметрией (южное полушарие Марса выше северного на 3–4 км), так и локальную топографию. Измерения магнетометра положили конец спорам о магнитном поле Марса: обнаружена остаточная намагниченность коры. Аппарат НАСА «Mars Odyssey» (2001) доставил к Марсу спектрометр гамма-излучения, еще один, после спектрометра TES, прибор, первоначально предназначенный для миссии «Mars Observer». Результаты этого прибора и работающего совместно с ним российского нейтронного спектрометра «High Energy Neutron Detector» (HEND) — обнаружение воды в верхних 1–3 м грунта с содержанием 35–50% в полярных областях и 5–10% в некоторых областях вблизи экватора — широко известны и причислены к важнейшим достижениям отечественной космической науки (см. статью И.Г.Митрофанова в этом номере).

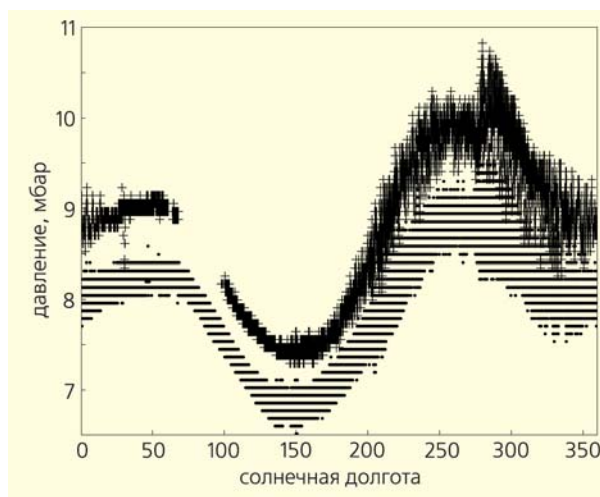
Давление у поверхности Марса от 4 до 10 мбар, средняя температура поверхности около 210 К, при больших суточных, широтных и сезонных вариациях: от минимально возможной, ограниченной конденсацией атмосферы, температу-

ры 145 К, которая достигается в высоких широтах в период полярной ночи, и до 290 К и более — в средних летних широтах после полудня. Такой огромный по сравнению с Землей диапазон температур, а также тот факт, что максимальные температуры достигаются не в тропиках, а в средних широтах, объясняется низкой плотностью атмосферы и отсутствием океана, который выполняет на Земле функцию термостата. Сезоны на Марсе похожи на земные, но сезонный цикл усложнен относительно большим ($e \approx 0.09$) эксцентриситетом орбиты, в результате которого южное лето короче и теплее северного. Зимой CO_2 , из которого в основном состоит марсианская атмосфера, конденсируется и выпадает на поверхность, образуя сезонные полярные шапки. При этом в твердую фазу периодически переходит до 25% массы атмосферы (рис.2). Кроме сезонных полярных шапок, на Марсе существуют постоянные, остаточные полярные шапки, которые заметно различаются между собой. Северная полярная шапка существенно больше южной и состоит в основном из водяного льда, тогда как южная шапка, судя по спектру ее теплового излучения, имеет температуру конденсации CO_2 и, следовательно, состоит из твердой углекисло-

ты. Асимметричен и гидрологический цикл планеты (рис.1).

Споры о причинах такой асимметрии идут достаточно давно. Вначале сезонную миграцию водяного пара связывали с высвобождением воды, адсорбированной марсианским грунтом, и асимметрию атмосферного цикла объясняли неоднородностью свойств поверхности планеты. На рубеже 1990-х годов стало ясно, что ведущую роль в гидрологическом цикле играют атмосферные процессы. Т.Клэнси с коллегами высказали гипотезу о ведущей роли эксцентриситета орбиты Марса в гидрологическом цикле [3]. В современную эпоху прохождение Марсом афелия, когда поток солнечного излучения и, следовательно, температура планеты минимальны, совпадает с летом северного полушария. Глобальная циркуляция атмосферы Марса, изображенная на рис.3, отличается от земной. Так же, как и на Земле, на Марсе есть глобальная конвективная ячейка, однако она не локализована в тропиках, а распространяется в высокие широты и пересекает экватор. Восходящая ветвь ячейки на Марсе всегда находится вблизи самой теплой точки планеты, т.е. в периоды солнцестояния — в средних широтах летнего полушария. Поэтому доминирующее направление переноса в марсианской

Рис.2. Сезонный цикл атмосферного давления на Марсе по данным метеорологических измерений на посадочных аппаратах «Viking». Первый зонд (VL1, измерения показаны точками) совершил мягкую посадку в долине Хриса в точке 22.48° с.ш., 49.97° з.д., второй (VL2, измерения показаны крестиками) — на плато Утопия в точке 47.97° с.ш., 225.74° з.д. По горизонтали отложена солнечная долгота L_s , начало координат в точке весеннего равноденствия северного полушария. Осцилляции более чем на 25% указывают на изменение массы атмосферы за счет конденсации на сезонных полярных шапках. Всплеск в данных VL1 при $L_s = 280^\circ$ — следствие мощного возмущения атмосферной циркуляции из-за глобальной пылевой бури.



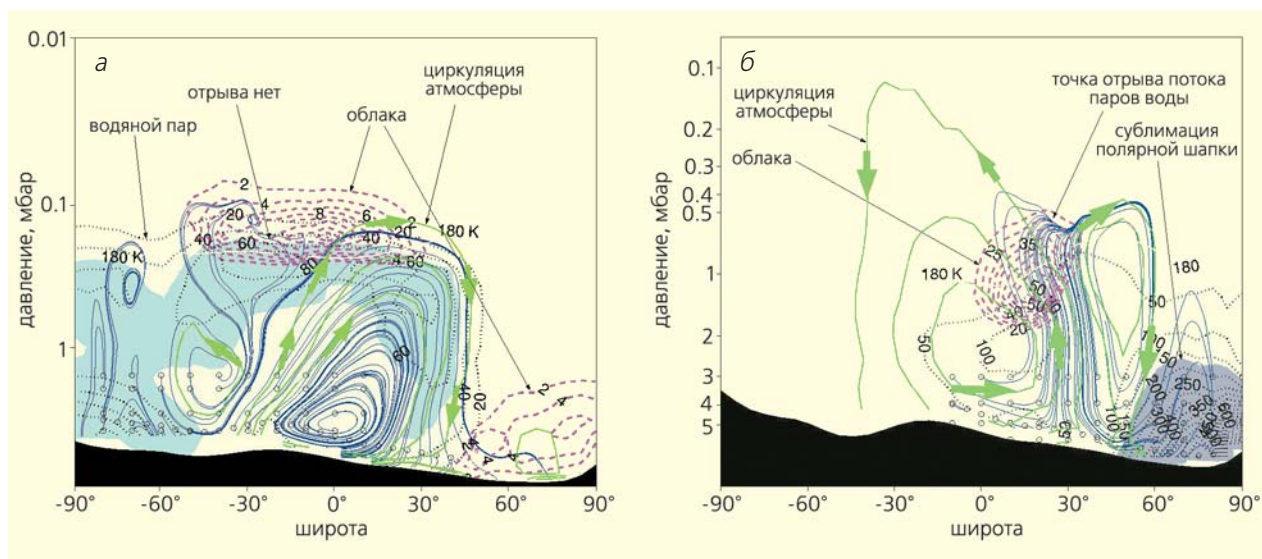


Рис.3. Гидрологический цикл Марса по данным разработанной в Лаборатории геофизической гидродинамики (США) при сотрудничестве с ИКИ РАН численной модели общей циркуляции атмосферы, иллюстрирующий роль облаков при переносе воды. По горизонтальной оси отложена широта, по вертикальной — давление в логарифмическом масштабе. Рисунки приведены в разных масштабах по вертикали (см. шкалу давлений). В афелии (а) мощная тропическая облачность приводит к быстрому оседанию ледяных частиц и отрыву потока масс воды (линии тока показаны синим цветом) от атмосферной циркуляции (линии тока зеленые, направление показано стрелками), препятствуя ее меридиональному переносу в южное полушарие. В перигелии (б) облачность слаба, и линии тока воды в атмосфере повторяют течение воздушных масс.

глобальной конвективной ячейке — не от экватора в тропики, как на Земле, а из летнего полушария в зимнее. Сама ячейка, в отличие от земной, простирается до полярных широт. Связано это с повышенной статической устойчивостью марсианской атмосферы за счет присутствия в ней дополнительного поглотителя — пылевого аэрозоля. Во время прохождения Марсом афелия глобальный пояс облаков, образующийся из-за относительно холодного и влажного климата в самом начале восходящей ветви глобальной конвективной ячейки (рис.3,а), препятствует переносу воды в южное полушарие. В перигелии (рис.3,б) температуры выше, облачной «пробки» не образуется, и весь находящийся в атмосфере водяной пар равномерно перемещивается между полушариями. За длительное время (период оборота перигелия Марса составляет около 50 тыс. лет) происходит

«перекачка» довольно существенных масс воды в полушарие, лето в котором совпадает с афелием, чем и объясняется различие полярных шапок. Очевидно, такой сезонный «насос» меняет направление через полпериода оборота перигелия Марса, и, если считать его основным объяснением асимметрии полярных шапок, следует признать, что возраст этой асимметрии около 25 тыс. лет. Другое объяснение [4] основано на глобальной асимметрии фигуры Марса. Во время северного лета меридиональный поток ячейки «взбирается в гору», что ослабляет ее интенсивность и, следовательно, ослабляет меридиональный перенос воды, способствуя накоплению воды на северном полюсе. В южное лето, напротив, атмосферный поток «скатывается с горы», его интенсивность выше, интенсивнее и меридиональный перенос, вследствие чего вода на южном полюсе не задерживается. Вопрос о коли-

чественном соотношении этих механизмов пока остается открытым, однако обнаружение аппаратом «Mars Express» водяного льда в Южной полярной шапке косвенно указывает на относительно молодой возраст ее углекислого покрова и, следовательно, поддерживает гипотезу Клэнси.

Иногда в период прохождения перигелия запыленность атмосферы начинает быстро расти, так что через несколько недель вся планета оказывается покрыта пылевыми облаками (рис.4). Возникают глобальные пылевые бури — атмосферные неустойчивости, не имеющие земных аналогов. В такие периоды возникает положительная обратная связь между атмосферным переносом пыли, поглощающей солнечное излучение, и интенсивностью циркуляции ячейки. В этом явлении много неясного — например, спусковой механизм, способствующий зарождению неустой-

чивости и, возможно, связанный с сублимацией полярных отложений и волновыми эффектами в глобальной циркуляции атмосферы. Не до конца понятен и механизм угасания глобальных пылевых бурь, и их изменчивость.

Наверное, ни одна из решаемых марсианскими экспедициями задач не освещалась столь подробно, как проблема воды, и на ней следует остановиться особо. Жидкая вода на Марсе неустойчива, хотя давление и температура недалеко от тройной точки, что на короткое время делает возможным образование и просачивание через грунт жидкой воды. Почти вся имеющаяся на Марсе вода находится в грунте в виде вечной мерзлоты, причем водяной лед служит существенной составляющей горной породы, слагающей марсианский грунт. Со времен проекта «Viking» воображение исследователей будоражили многочисленные свидетельства воздействия потоков жидкой воды на ландшафт планеты. Если справедлива гипотеза о том, что в геологически отдаленную эпоху

относительно высокое давление углекислой атмосферы поддерживало на высоком уровне парниковый эффект и жидкая вода была повсеместно распространена [5], то около 2.5 млрд лет назад Марс должен был пережить радикальное изменение климата — от относительно «мягкого» до нынешнего, непригодного для существования биосферы. Споры о том, был ли в прошлом климат Марса более теплым и существовала ли там гидросфера земного типа, длятся давно и переживают циклическое развитие. Полученные «Викингами» изображения открыли взору многочисленные русла рек, долины, осадочные отложения (рис.5), свидетельствующие о мягком климате прошлых эпох. С течением времени позиции сторонников «теплого и сырого раннего Марса» (выражение Дж.Поллака) несколько ослабли: марсианские долины, их форму и поперечный профиль все чаще стали интерпретировать как результат деятельности ледников либо катастрофических потоков селевого типа. Недавно гипотеза

о существовании древнего океана в северном полушарии вновь нашла подтверждение. На месте посадки «Pathfinder» (1997) обнаружены свидетельства активности текущей воды, марсоходы «Spirit» и «Opportunity» обнаружили минералы, для формирования которых необходима жидкая вода [6]. Последние открытия сделаны при помощи мессбауэровского и альфа-рентгеновского спектрометров, подготовленных с участием наших ученых и восходящих к малым станциям проекта «Марс-96» (рис.6).

Несмотря на эти разногласия, сейчас можно с уверенностью утверждать, что еще в относительно недавнем прошлом Марс испытывал серьезные изменения климата. Связаны они периодическими изменениями угла наклона оси вращения планеты, в результате которых изменяется тепловой режим различных широт. На Земле, где накоплено достаточно эмпирического материала о квазипериодических изменениях климата, подобные колебания были объяснены около 100 лет назад

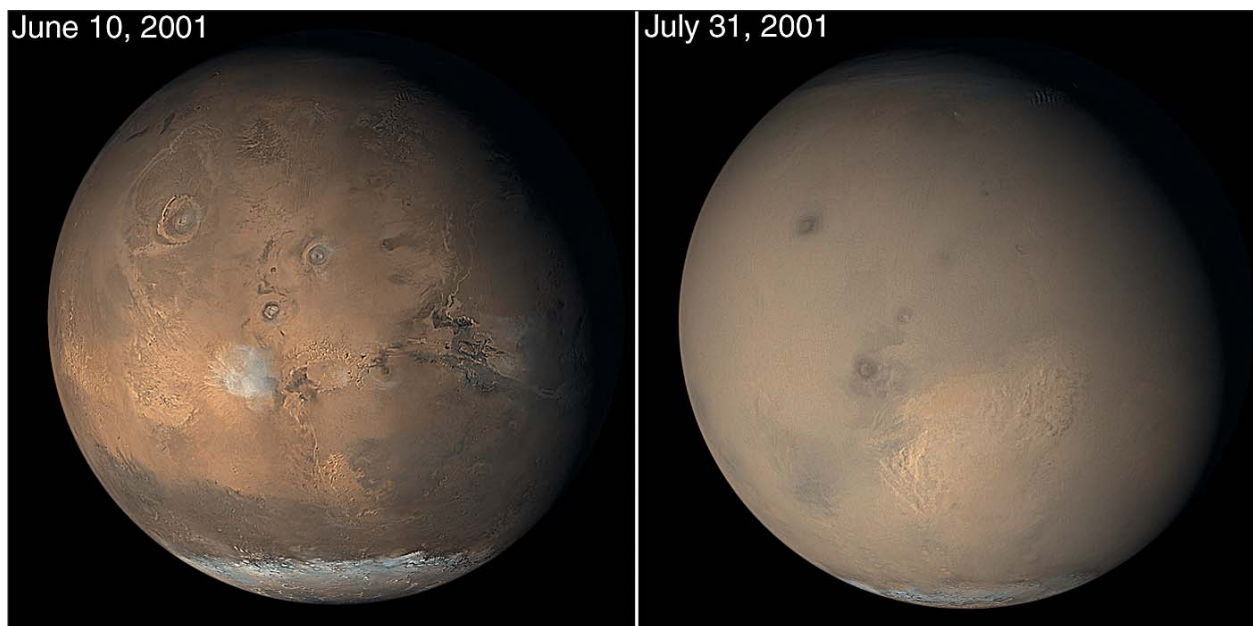


Рис.4. Изображения Марса, полученные 2001 г. камерой МОС перед началом и в момент развития глобальной пылевой бури. Видны области Элизима, Фарсиды и Долины Маринеров, уменьшающаяся со временем сезонная полярная шапка в южном полушарии. (NASA/JPL/Malin Space Science Systems.)

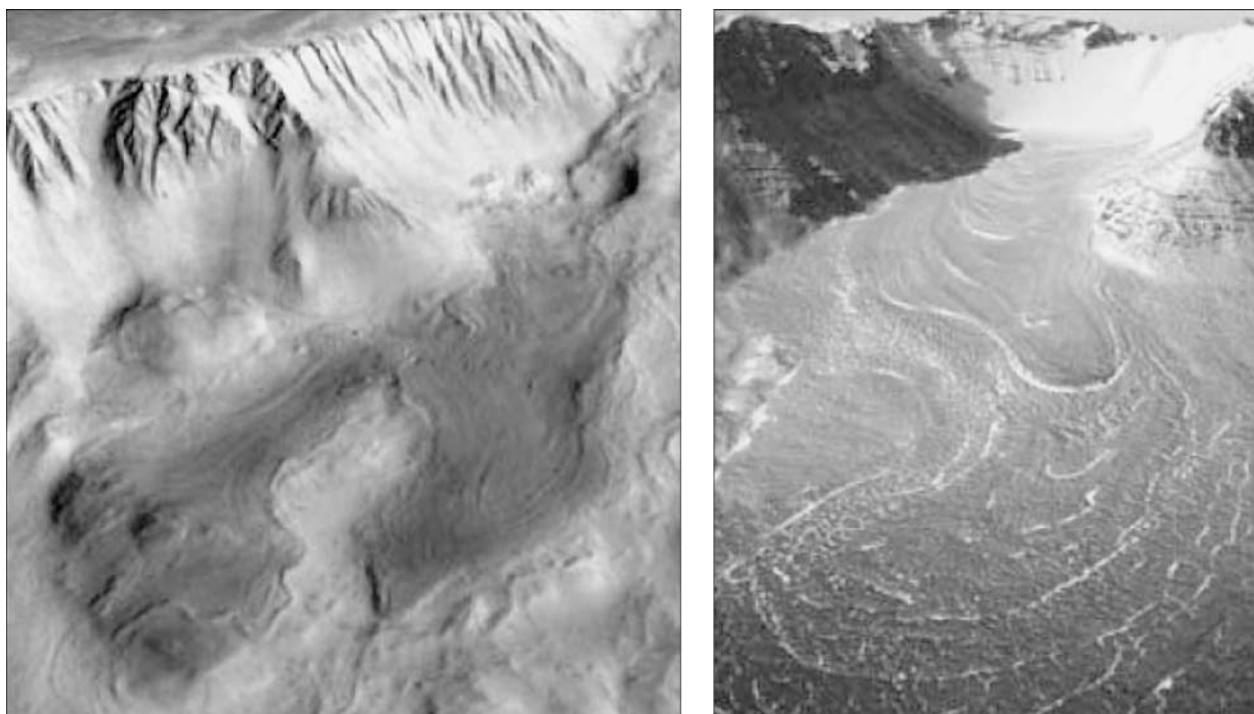


Рис.5. Отложения, оставшиеся от относительно недавнего ледника у подножья горы Олимп (138°з.д., 18°с.ш.), и земная аналогия [6]. слева — снимок камеры HSRC КА «Mars Express» с орбиты №143, справа — ледник, покрытый скальными отложениями толщиной ~5 м в Антарктиде.



Рис.6. Мёсбауэровский спектрометр анализирует грунт в борозде, прорытой колесами марсохода «Spirit» в районе Лагуны Холлоу. Снимок сделан служебной камерой «HAZCAM», предназначенной для предотвращения нештатных ситуаций, 21 февраля 2004 г. (NASA/JPL/Cornell.)

сербским ученым С.Миланковичем. На Марсе этапы геологической истории просматриваются лишь в общих чертах, и исследования реакции климата на изменение орбитальных параметров возможны лишь с помощью моделей общей циркуляции атмосферы. По современным представлениям, угол наклона оси вращения, значение которого в наше время составляет 25°, достигает 45° с периодичностью около 125 тыс. лет, и даже 60° — с периодом в несколько миллионов лет. Все существующие модели показывают, что при увеличении угла наклона оси вращения происходит перераспределение конденсированных форм воды, в первую очередь льда, из полярной шапки в низкие широты, где могут формироваться ледники [7]. Мобилизация воды и перенос ее в атмосфере происходит весьма интенсивно, и эти процессы, как и на Земле, влияют на геологический облик планеты (рис.5). Немало данных, свидетельствующих о недавних изме-

нениях климата, получено последней марсианской миссией «Mars Express».

Первые результаты «Mars Express»

Аппарат Европейского космического агентства «Mars Express» работает на орбите Марса с января 2004 г. Реализация этого проекта — преемника российского «Марс-96» — крупнейший успех европейской и российской планетной науки. На борту аппарата семь научных приборов: ТВ-камера «High Resolution Stereo Camera» (HRSC) для стереосъемки поверхности планеты с разрешением до 10 м, спектрометры «Observatoire pour la Mineralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activite» (OMEGA), «Planetary Fourier Spectrometer» (PFS) и «Spectroscopy for Investigations of Characteristics of the Atmosphere of Mars» (SPICAM), анализатор плазмы и нейтрального газа «Analyser of Space Plasmas and Energetic Atoms» (ASPERA), длинноволновый радар «Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding» (MARSIS) и аппаратура для радиопросвечивания атмосферы «Mars Radio Science» (MaRS). Эксперименты «Mars Express» повторяют аналогичные исследования в программе «Марс-96»; в случае OMEGA даже использован запасной прибор. Хотя для этого были все предпосылки, «Mars Express» не стал совместным проектом ЕКА и Роскосмоса. Руководителями всех экспериментов являются ученые из стран Евросоюза, в шести экспериментах российские ученые входят в научные команды в качестве официальных участников и имеют равные права на научные результаты.

Для трех приборов — спектрометров OMEGA (картирующий спектрометр, диапазон 0.5–5.2 мкм, пространственное разрешение 0.3–5 км), PFS (ИК-фурье-спектрометр высокого

спектрального разрешения, диапазон 1.2–40 мкм, разрешение 1.4 см⁻¹) и SPICAM (универсальный УФ-ИК-спектрометр для измерений в надире и режимах затмений Солнца и звезд) Россия поставила важные элементы: сканер OMEGA, детекторы PFS и один из двух измерительных каналов SPICAM — спектрометр ближнего ИК-диапазона на базе акустооптического фильтра (1.0–1.7 мкм, спектр. разрешение 3.5 см⁻¹).

Измерения при помощи созданных российскими учеными совместно с западноевропейскими коллегами спектрометров уже позволили получить ряд важных результатов, многие из которых только готовятся к публикации. Это измерения структуры атмосферы с высокой точностью (PFS и SPICAM) от поверхности до 100–150 км. Прибор PFS позволяет по каждому спектру одновременно восстанавливать температурный профиль атмосферы до 50–55 км, измерять содержание пыли и конденсационного аэрозоля. Впервые одновременно измерены содержания и построены карты водяного пара и озона в атмосфере. Водяной пар измеряется PFS и SPICAM в ИК-диапазоне, озон — в УФ-диапазоне (SPICAM) и по регистрации свечения возбужденного кислорода

да на длине волны 1.27 мкм. Свечение возникает при фотодиссоциации озона выше уровня 15–20 км. Оно наблюдалось в спектрах всех трех экспериментов: с высоким спектральным разрешением экспериментами SPICAM и PFS и высоким пространственным разрешением — OMEGA. Изображения OMEGA в полосе излучения 1.27 мкм имеют волновую структуру, подобные же волны наблюдаются и в изображениях облаков из водяного льда и CO₂. Это могут быть внутренние волны плавучести, впервые наблюдаемые с такой наглядностью. Прибором SPICAM обнаружено ночное свечение монооксида азота, известное на Венере, но не наблюдавшееся ранее на Марсе. Открыты мельчайшие, субмикронные аэрозольные частицы, заполняющие атмосферу Марса до высот 70–100 км. Объем статьи не позволяет подробно комментировать эти результаты. Остановимся лишь на двух самых интересных открытиях.

Впервые обнаружен **водяной лед** в постоянной южной полярной шапке Марса в конце марсианского лета. На Южной полярной шапке в ИК-спектрах трех приборов отождествлены полосы поглощения CO₂-льда с примесями льда H₂O и пыли (рис.7), причем распределение

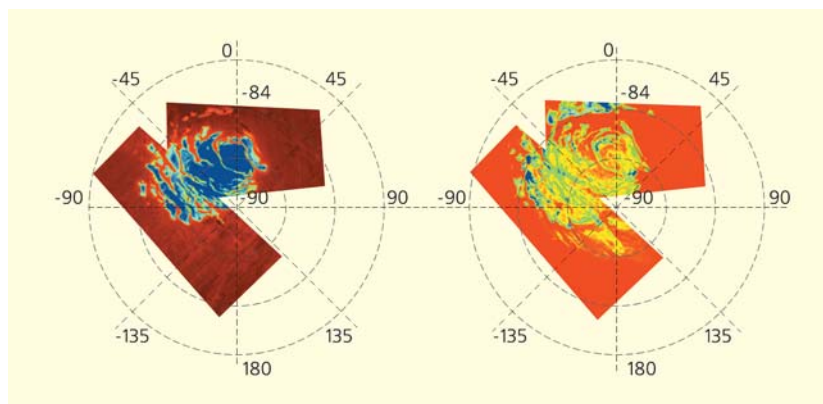


Рис.7. Изображение южной полярной шапки Марса картирующим спектрометром OMEGA: в полосе поглощения углекислотного льда и в полосе поглощения водяного льда (содержание льда возрастает от красного к синему цвету, по Бибрингу и др.). Видно, что залежи водяного льда «выглядывают» из-под слоя твердой углекислоты.

льдов и пыли неоднородно. Карты, построенные по данным OMEGA с разрешением 1–3 км, свидетельствуют о том, что участки водяного льда находятся на краях более обширных областей CO₂-льда. При совместном анализе со снимками высокого разрешения MGS можно заключить, что толщина слоя CO₂-льда не превышает нескольких метров, а под ним находится мощный захороненный слой водяного льда, возможно, эквивалентный постоянной северной полярной шапке. Исследования северной полярной шапки в конце 2004 г., после летнего солнцестояния, подтвердили ее состав — водяной лед с небольшой (менее 1%) примесью пыли. Прибором OMEGA проведено минералогическое картирование значительной части планеты, и, при существенном разнообразии минерального состава, карбонаты не были обнаружены. Таким образом, данные «Mars Express» не подтверждают наличия запасов твердого CO₂ на Марсе, достаточных для существенного изменения массы атмосферы [8].

После долгих бесплодных попыток **метан в атмосфере Марса** был обнаружен практически одновременно тремя независимыми группами исследователей. Планетный Фурье-спектрометр PFS КА «Mars Express» обладает высоким спектральным разрешением, что позволяет детектировать и исследовать распределение малых газовых составляющих ат-

мосферы. По слабому поглощению в Q-ветви полосы 3.3 мкм определено среднее содержание метана, равное 10±5 ppb (частей на миллиард). Измерения ПФС свидетельствуют о различном содержании CH₄ в различных областях Марса: от 0 до 30 ppb [9]. Несколько ранее аналогичное количество метана, а также изменчивость его содержания были отождествлены по данным наземных наблюдений [10]. Конечно, 10 ppb — это очень мало, но, так как метан непрерывно разрушается в атмосфере за счет фотодиссоциации, для поддержания такого количества на Марсе необходим источник метана производительностью порядка 300 т/год. Хотя Марс тектонически неактивен, такой источник может быть связан с «точечной» тектоникой: остаточным вулканизмом либо геотермальной активностью. Однако картирующий ИК-радиометр THEMIS (КА «Mars Odyssey»), специально созданный для поиска «горячих точек», пока не обнаружил ни одной. Падающие на Марс кометы или метеориты могут дать только 2–4% необходимого воспроизводства метана. Поэтому нельзя исключить и самых экзотических предположений, в том числе и наличия на нижней границе криосферы, на глубине более 2 км, месторождений газогидратов и даже существования там бактерий-метаногенов, подобных обнаруженным в глубоких подземных экосистемах Земли.

Сравнительная планетология: мост от Земли к другим планетам

Являются ли все эти интересные факты лишь пищей для человеческого любопытства или все же имеют практическое приложение? Связующее звено между планетной наукой и науками о Земле — область междисциплинарных исследований, которую называют сравнительной планетологией [11, 12]. Различные процессы в атмосферах Венеры и Марса, а также Титана, спутника Сатурна, можно напрямую сравнивать с аналогичными процессами на Земле. Для жизни на планете наиболее важен ее климат: температура, давление, наличие или отсутствие жидкой воды, а также состав атмосферы. История климата нашей планеты записана в геологической летописи осадочных пород. Это позволяет ученым заглянуть в прошлое, судить об изменении условий обитания на Земле вплоть до момента зарождения жизни и оценить условия более ранних эпох. Исследования пород более раннего периода проводить гораздо труднее из-за отсутствием биомаркеров, позволяющих судить об их возрасте. Однако даже такую ценнейшую информацию, как геологическая летопись, зачастую бывает трудно интерпретировать. История других планет может помочь в ее расшифровке.

Аналогия с другими планетами помогает заглянуть не только в прошлое, но и в будущее Земли (табл.1, 2). Все возрастающее

Таблица 1

Некоторые характеристики планет земной группы

| | Среднее расстояние от Солнца, а.е. | Масса относительно Земли | Давление у поверхности, бар | Температура поверхности, К | Основные атмосферные газы | Парниковый эффект, К |
|----------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|----------------------|
| Меркурий | 0.39 | 0.052 | 10 ⁻¹⁶ | 440 | Na, He | 0 |
| Венера | 0.72 | 0.81 | 92 | 735 | CO ₂ , N ₂ | 500 |
| Земля | 1 | 1 | 1 | 289 | N ₂ , O ₂ , (CO ₂ , H ₂ O) | 39 |
| Марс | 1.52 | 0.11 | 0.006 | 214 | CO ₂ , N ₂ , (H ₂ O) | 4 |
| Титан | 9.54 | 0.0225 | 1.6 | 90 | N ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂ | <20 |

Таблица 2

Относительное содержание основных атмосферных газов и запасы летучих на планетах земной группы

| | CO ₂ | N ₂ | Ar | H ₂ O | D/H (отн. Земли) |
|----------|----------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
| Меркурий | — | — | 0.07 | — | — |
| Венера | 0.965 | 0.035 | 7·10 ⁻⁵ | (3–10)·10 ⁻⁵ | 146 |
| Земля* | 3.7·10 ⁻⁴ | 0.78 | 9.34·10 ⁻³ | <0.03 | 1 |
| Марс** | 0.953 | 0.027 | 0.016 | <10 ⁻⁴ | 6 |
| Титан*** | — | 0.90 | 0.06 | — | 2 |

* В океане и ледниках Земли содержится эквивалент 270 бар H₂O, а в коре Земли — эквивалент 53 бар CO₂.** В вечной мерзлоте и полярных шапках Марса не более 30 бар H₂O.

*** На Титане водяной лед составляет существенную часть коры и, вероятно, мантии.

беспокойство в обществе вызывают изменения климата, связанные с деятельностью человека. Насколько устойчива климатическая система Земли, действительно ли увеличение содержания антропогенной углекислоты в атмосфере представляет угрозу с точки зрения изменения условий обитания? Могут ли слабые изменения температуры, вызванные увеличением содержания CO₂, вызвать резкие изменения в тропосфере, повлечь к необратимому увеличению содержания водяного пара и парниковой катастрофе? Для поисков ответа на подобные вопросы применяют

трехмерные модели общей циркуляции атмосферы. Однако модель хорошо работает, когда ее можно сравнить с измерениями. И здесь на помощь приходят другие планеты. Их атмосферы и климатические системы — прекрасные испытательные стенды для проверки моделей общей циркуляции и тестирования лежащих в их основе многочисленных допущений и параметризаций. В силу разных причин, главная из которых — отсутствие на других планетах биосферного фактора, их климатические системы намного проще и легче поддаются количествен-

ному описанию *ab initio*. В каком-то смысле подход, развиваемый в сравнительной планетологии, родствен зарекомендовавшему себя еще в Средние века методу изучения физиологии человека с помощью аналогий с примитивными биологическими видами. Результат налицо — сегодня человечество не мыслит себя без современной медицины. Успехами в «лечении» нашей планеты пока гордиться рано, однако очевидно, что будущим поколениям этого не избежать. И опереться им придется на те знания, которые мы им оставим. ■

Литература

1. Мороз В.И. Физика планеты Марс. М., 1978.
2. Smith M.D. // Icarus. 2004. V.167. P.148.
3. Clancy R.T. et al. // Icarus. 1996. V.122. P.36.
4. Richardson M.I., Wilson R.J. // Nature. 2002. V.416. P.298.
5. Мороз В.И., Мухин Л.М. // Космические исследования. 1978. Т.15. С.901.
6. Morris R.V. et al. // Science. 2004. V.305. P.833.
7. Head J.W. et al. // Nature. 2005. V.434. P.346.
8. Bibring J.P. et al. // Nature. 2004. V.428. P.627.
9. Formisano V. et al. // Science. 2004. V.306. P.1758.
10. Krasnopolsky V.A. et al. // Icarus. 2004. V.172. P.537.
11. Жарков В.Н., Мороз В.И. Почему Марс? // Природа. 2000. №6. С.58–67.
12. Жарков В.Н. От физики Земли к сравнительной планетологии // Природа. 1998. №12. С.86–97.