

2
Древнее
сухое русло,
42° с. ш.
268° в. д.
Данные
орбитального
аппарата
«Викинг»

1
Постоянная северная
полярная шапка

Вода на Марсе

Н.Э.Демидов,
доктор физико-математических наук
И.Г.Митрофанов,
Институт космических исследований РАН

Вода в Солнечной системе

Земля богата водой. Юпитер на 90% состоит из водорода, а у его спутников водяной лед — одно из основных породообразующих веществ. Поверхность Европы, вероятно, покрыта водным океаном под толстым слоем льда. А как обстоит дело с водой на Марсе, который расположен вблизи границы между планетами земной группы и газовыми гигантами? В общем-то наличие воды на Марсе никогда не вызывало сомнений у планетологов. Главный вопрос — в каком виде она там находится.

История воды в ходе возникновения и эволюции Солнечной системы — область предположений и споров. Согласно наиболее популярной гипотезе, первичная вода в протопланетном облаке главным образом сконцентрировалась на периферии. Между орбитами Марса и Юпитера проходит снеговая линия Солнечной системы: во время формирования планетной системы за этой линией скопились водород и другие летучие элементы, из которых образовались планеты-гиганты. В их составе преобладают легкие вещества, в том числе и вода. Ее обнаружили на всех планетах юпитерианской группы и на большей части их спутников.

Исходное вещество планет земной группы было практически иссушено солнечным излучением. Воду на них принесли уже после образования Солнечной системы ледяные тела комет, во множестве прибывавшие из-за снеговой линии под действием взаимных столкновений и притяжения Солнца. Наиболее интенсивная кометная бомбардировка, вероятно, происходила в интервале между 4,6 и 3,9 млрд. лет назад. О ней нам напоминают изрытые ударными кратерами древние участки поверхности Меркурия, Марса и Луны.

Из-за близости Меркурия к Солнцу температура его поверхности оказывается слишком высока, чтобы на ней сохранились летучие вещества. У Венеры в прошлом, по видимому, были близкие к земным объемы воды, однако под воздействием солнечного ультрафиолетового облучения, а также разогрева атмосферы она испарилась и разрушилась. Напротив, на Земле создались практически идеальные условия для возникновения и сохранения жидкой гидросферы. Данные космических наблюдений Луны также свидетельствуют о возможных залежах водяного льда на дне вечно затененных полярных кратеров. Лед мог накопиться там после многократных столкновений Луны с кометами, когда при их испарении возникла кратковременная атмосфера из водяного пара. Из-за малой массы Луна не могла удержать ее, но на дне вечно затененных кратеров температура не превышает 50—100К; водяной пар частично должен осаждаться в таких холодных ловушках.

Марс, как наиболее удаленная планета земной группы — он расположен близко к снеговой линии, — мог бы захватить наибольшее количество воды, но сумел ли он сохранить свои водные запасы к настоящему моменту? И как велики эти запасы? Современные исследования Красной планеты позволили вплотную подойти к ответу на этот вопрос, а он имеет особое значение для построения модели природной среды на современном Марсе, для поисков внеземной жизни, для понимания законов ее возникновения и развития и, наконец, для построения стратегии освоения Марса человеком. Как оказалось, вода на Марсе есть буквально везде — пар в атмосфере, лед на полюсах, вечная мерзлота в глубинах планеты.

Водяной пар и лед на Марсе

Свойства марсианской атмосферы стали интенсивно изучать после запуска межпланетных космических аппаратов в начале 70-х годов. Первые оценки содержания водяного пара в атмосфере получили В.И.Мороз и А.Э.Наджип на



ЦИКЛ ВОДЫ

основе измерений с борта советских аппаратов «Марс-3» и «Марс-5», а также Рудольф Ханел и Варни Конрат на американском аппарате «Маринер-9». Орбитальные аппараты «Викингов» были оснащены приборами Крофтона и Фармера, которые позволили измерить содержание влаги в атмосфере по интенсивности линии поглощения воды в инфракрасном диапазоне. Оказалось, что воды в атмосфере Марса в 10 тысяч раз меньше, чем в атмосфере Земли. Это очень мало: если весь пар воды марсианской атмосферы размазать по поверхности планеты, то толщина возникшей пленки составит всего 15–20 микрон. Сам по себе такой факт не удивляет: на Марсе холодно (средняя температура поверхности -60°C), а атмосфера чрезвычайно разрежена — давление $6 \cdot 10^{-3}$ атм. Однако марсианская атмосфера суха не только абсолютно, но и относительно: оценки показывают, что на экваторе она могла бы содержать в 200 раз больше влаги. Вместе с тем, несмотря на столь низкое содержание воды в атмосфере Марса, на снимках планеты можно обнаружить водяные облака, низкие туманы и даже изморозь на поверхности.

Сейчас благодаря наблюдениям с борта космических аппаратов мы достаточно хорошо знаем характер пространственных и сезонных вариаций атмосферной влаги на Марсе. Наиболее интересная черта — сильное, в разы, увеличение концентрации водяного пара в начале лета над высокоширотными районами Северного полушария. Там относительная влажность может достигать до 100%, то есть вода атмосферы и лед на поверхности летом близки к равновесию между конденсацией и сублимацией. А над Южным полюсом ничего такого не происходит: над ним концентрация водяного пара летом возрастает всего в полтора раза. Причина — в строении полярных шапок Марса.

Атмосфера Марса практически полностью состоит из углекислого газа, поэтому сезонные полярные шапки — это зимний покров конденсата CO_2 толщиной до 2 м. Он выпадает примерно до 60° широты во время зимней полярной ночи, а весной и летом испаряется, обнажая поверхность и относительно небольшие постоянные полярные шапки (рис. 1). Из наблюдений известно, что постоянная шапка на севере состоит из льда воды. На юге полярная шапка также главным образом состоит из воды, но вследствие эллиптичности орбиты Марса южное лето короче, и на поверхности южной шапки частично сохраняется конденсат CO_2 .

Результаты измерений рельефа лазерным высотомером «MOLA», выполненных под руководством профессоров Дэвида Смита и Марии Зубер с борта аппарата НАСА «Марс глобал сервейер» в конце 90-х годов, позволили оценить объемы воды в постоянных полярных шапках. Центр постоянной северной полярной шапки примерно совпадает с полюсом, ее диаметр — около 800 км, толщина в центре — 3–4 км. А центр постоянной южной полярной шапки смещен относительно полюса примерно на 300 км, и при сравнимой толщине ее диаметр существенно меньше, всего около 300 км. Масса обеих полярных шапок соответствует слою воды толщиной 20–30 м в пересчете на всю поверхность планеты.

Как давно возникли шапки? Ответ на этот вопрос дает подсчет числа ударных кратеров на них. На постоянной северной полярной шапке крупные кратеры не обнаружены, значит, возраст ее поверхности по геологическим меркам чрезвычайно мал — не более 100 тысяч лет. На южной шапке обнаружено около 15 кратеров диаметром более 800 м. Это соответствует возрасту 7–17 миллионов лет. Такое различие в возрастах свидетельствует, что у поверхности южной полярной шапки обмен с атмосферой идет менее активно, чем у северной. Вероятно, причина в том, что постоянно присутствующий на поверхности слой твердого CO_2 изолирует водяной лед южной шапки. Напротив, на севере шапка и атмосфера интенсивно взаимодействуют: осенью атмосферная влага конденсируется, а весной и летом — сублимирует.

Потоки жидкой воды

Современная атмосфера Марса слишком холодна и разрежена, чтобы жидкая вода могла стабильно существовать на его поверхности. (Автор биологических экспериментов программы «Викинг» Дж. Левин, впрочем, предполагает, что на камнях в районе экватора могут существовать пленки жидкой воды, см. «Химию и жизнь», 1998, № 7. — *Примеч. ред.*) С другой стороны, рельеф Марса сохранил многочисленные следы потоков, существовавших продолжительное время. Вероятно, в прошлом, когда атмосферные условия сильно отличались от современных, жидкая вода могла играть важную роль в формировании поверхности планеты (см. «Химию и жизнь», 2005, № 6). Уже на первых изображениях, сделанных советской межпланетной станцией «Марс-5» и американскими аппаратами «Маринер», были обнаружены сухие русла рек и ветвящиеся системы долин и каньонов, образованных водными потоками. Однако основные результаты были получены в последние пятнадцать лет.

Гигантские марсианские каньоны не имеют аналогов на Земле, их размеры грандиозны: протяженность каньона Арес превышает 1000 км, ширина более 100 км, глубина более 500 м. Их, берущих начало в районах с хаотическим рельефом, вероятно, образовали громадные массы подземных вод, изливавшихся на поверхность. Предполагается, что к выбросам подземных вод, находившихся под давлением вечной мерзлоты, могли привести тектонические явления, плавление мерзлоты в результате магматической интрузии либо гидроразрывы панциря ледистой мерзлоты из-за превышения критического значения давления в резервуаре подземной воды.

Не менее интересны ветвящиеся системы флювиальных долин, похожие на земные речные системы. Они образованы относительно небольшими протоками с характерной шириной 1–10 км и глубиной 100–200 м и хорошо развитыми системами притоков (рис. 2). Масштабы таких систем на поверхности достигают сотен и тысяч километров. Большинство исследователей Марса сходятся во мнении, что палеоречные системы были образованы постоянно текущей водой, но остается нерешенным вопрос об ее источнике. Вода марсианских рек могла поступать из плотной атмосферы в виде осадков, либо, как и в случае с каньонами, в истоках речных систем могли происходить спорадические истечения подземных вод.

Естественно, что предположение о выпадении осадков в виде дождя и о длительном присутствии жидкой воды на поверхности ставит вопрос о существовании в прошлом на Марсе теплого и влажного климата — и о причинах его изменения на современный, холодный и сухой. Пока еще ранние стадии эволюции Марса изучены недостаточно хорошо, чтобы дать однозначный ответ на этот вопрос. И все же датировка флювиальных форм по числу кратеров на них позволя-

Ледяные щиты

ет предположить, что стационарные речные системы сформировались в древнейшую ноахидскую эпоху (4,6—3,9 млрд. лет назад), совпадающую по времени с интенсивной метеоритной и кометной бомбардировкой, которая могла вызвать повышение температур на планете. В эту древнейшую эпоху Северное полушарие Марса могло быть частично покрыто океаном, о чем свидетельствуют линии постоянной высоты поверхности, обнаруженные высотометром «MOLA». Джим Хэд интерпретировал их, как морские террасы. Когда в конце ноахидского периода бомбардировки ослабели, грунт промерз и на поверхности образовалась вечная мерзлота с высоким содержанием водяного льда. Эпизодические излияния подземных вод при разрывах верхнего слоя мерзлоты могли привести к образованию долин или каньонов. Марсианские каньоны проходят через поверхности с меньшим числом кратеров и датируются гесперийским периодом (3,9—1,5 млрд. лет назад), следующим за ноахидским.

Дополнительное свидетельство существования гидросферы на раннем Марсе — гематитовые отложения в районе равнины Меридиани. Это открытие было сделано с борта аппарата «Марс глобал сервейер» инфракрасным спектрометром «TES» под руководством профессора Филиппа Христенсена. Известно, что на Земле минерал гематит на основе Fe_2O_3 преимущественно образуется в водной среде. Для более детального изучения равнины Меридиани в 2004 году на ее поверхность был успешно посажен марсоход «Оппортьюнити». Изучение коренных пород приборами марсохода, которое провела группа исследователей под руководством профессора Стивена Сквайерса, показало: гематит находится в форме конкреций, похожих на ягоды голубики и вкрапленных в сульфатные отложения. Считается, что такие сульфатные отложения с вкраплениями гематита формировались при периодическом затоплении поверхности и образовании здесь мелководного бассейна. Эти затопления перемежались испарением и осаждением эвапоритов (например, тех же сульфатов).

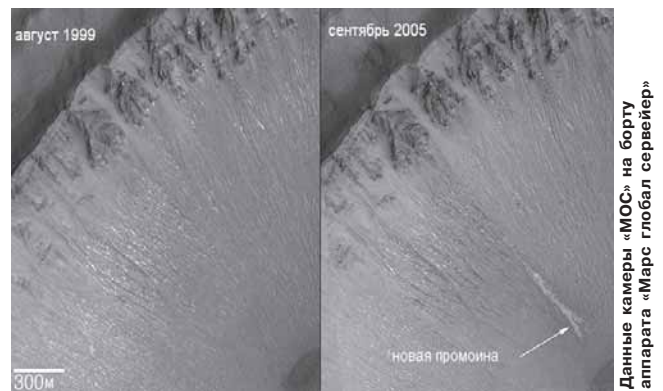
С начала самого позднего амазонийского (от 1,5 млрд. лет назад) периода климат Марса, вероятно, был близок к современному: он меняется плавно и периодически по мере изменения наклона оси вращения планеты. Смог ли Марс сохранить громадные запасы воды древнейшей ноахидской эпохи, которая текла в его речных системах и заполняла океан в Северном полушарии? Или же современные полярные шапки остались единственным резервуаром воды на современной планете?

В 1999 году, по данным телевизионной камеры «МОС» с борта космического аппарата «Марс глобал сервейер», Майкл Малин впервые обнаружил тонкие промоины на крутых склонах кратеров, каньонов и русел. Эти промоины в нескольких случаях прорезают современные дюнные поля, то есть их возраст невелик, менее двух миллионов лет. Промоины обычно наблюдаются на стенках, обращенных в сторону полюсов, что похоже на следы таяния водяного снега, который мог накопиться на затененных склонах. Альтернативный механизм формирования промоин может быть связан с высачивающимися на склонах подмерзлотными или внутримерзлотными водами, не замерзающими из-за высокой солености (см. «Химию и жизнь», 2000, № 7).

В апреле 2005 года группа экспериментаторов, работавших с прибором «МОС», обобщила полученные результаты наблюдений и пришла к выводу, что Марс гидрологически активен и ныне. В частности, на повторном изображении склона одного из кратеров была обнаружена новая промоина, заполненная светлым материалом (предположительно льдом или соевыми отложениями), которой не было на снимке 1999 года (рис. 3). Следовательно, она образовалась между 1999 и 2005 годами. А значит, потоки воды могут стекать по склонам Марса и сейчас.

Обнаружение свежих промоин на Марсе возобновило дебаты о скрытых в его поверхности резервуарах воды. Тейоретические расчеты тепловых условий на поверхности показали, что на широтах выше 40° в обоих полушариях возможно существование грунтового льда на глубинах начиная от нескольких сантиметров. Впервые проверить гипотезу о наличии в грунте Марса водяного льда удалось на основе измерений нейтронного и гамма-излучения Марса с борта американского космического аппарата «Марс Одиссей», который был выведен на орбиту вокруг Марса в октябре 2001 года. На его борту большая международная группа ученых под руководством профессора В.Бойнтонна установила комплекс научной аппаратуры «ГРС», который включает германиевый гамма-спектрометр (университет штата Аризона), нейтронный спектрометр (Национальная лаборатория в Лос-Аламосе), а также российский прибор «ХЕНД», созданный в Институте космических исследований РАН под руководством одного из авторов этой статьи (И.Г.М.) по заказу Федерального космического агентства. Установка российского прибора «ХЕНД» на борт американского космического аппарата «Марс Одиссей» была предусмотрена межправительственным Исполнительным соглашением между НАСА и Федеральным космическим агентством России.

Применение ядерных методов для исследования состава поверхности Марса связано с тем, что галактические космические лучи свободно проникают через его тонкую атмосферу и взаимодействуют со слоем грунта толщиной 1—2 м. На Земле же галактические лучи не способны достигать поверхности из-за плотной атмосферы. В результате взаимодействия возникают вторичные нейтроны и гамма-лучи. Данные о потоке вторичных нейтронов и позволяют оценить количество воды в грунте — чем больше воды, тем меньше от него поток надтепловых (двигающихся с относительно небольшой скоростью) нейтронов. Дело в том, что тяжелые ядра слабо замедляют нейтроны (так же, как теннисный мячик практи-

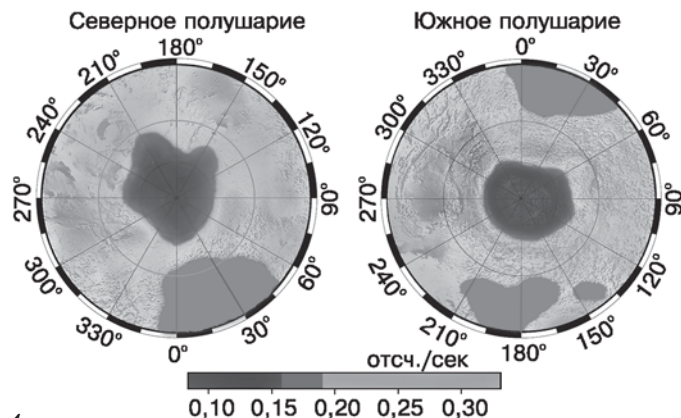


3 Два снимка, показывающие появление новой промоины, заполненной светлыми отложениями, — она возникла между августом 1999 и сентябрем 2005 г.

чески с исходной скоростью отскакивает от баскетбольного мяча). Поэтому поток надтепловых нейтронов от сухого грунта относительно велик. Максимальный эффект замедления достигается при столкновении нейтронов с ядрами водорода — протонами (которые в марсианском реголите связаны в основном с молекулами воды H_2O или ионами гидроксидов OH^-). Подобным же образом теннисный мяч максимально замедляется при ударе о другой теннисный мяч. Поэтому нейтроны в грунте с высоким содержанием воды замедляются гораздо эффективнее, и поток надтепловых нейтронов от влажного грунта относительно уменьшается.

Измерения с орбиты прибором «ХЕНД» показали большие вариации потока нейтронов над разными участками поверх-

ности Марса. Первое, что бросается в глаза, — это огромные области с низким потоком нейтронов на широтах выше 60° в Северном и Южном полушариях (рис. 4). Обработка данных нейтронных измерений показала, что грунт в этих районах содержит более 30 масс. % водяного льда. Северная полярная шапка характеризуется минимальным для всей планеты потоком нейтронов, и содержание водяного льда в ней, видимо, превышает 50 масс. %. Южная полярная шапка, в отличие от северной, по потоку нейтронов не слишком существенно отличается от окружающих мерзлых отложений, что не противоречит предположению о ее двухслойном строении — южный водяной лед даже в летнее время остается частично покрыт тонким слоем углекислотного снега.



4
Карта потока нейтронов на орбите космического аппарата «Марс Одиссей» по данным российского прибора «ХЕНД». Темным отмечены области с богатым водой грунтом

Весьма неожиданным результатом нейтронного картографирования Марса оказалась находка двух обширных районов с пониженным потоком нейтронов в районе экватора: области Аравия (50°—350° в. д.) и Мемнония (180°—210° в. д.) (рис. 4). По данным прибора «ХЕНД», содержание воды в грунте этих районов может достигать 16% по массе. Причина столь высокого содержания воды остается непонятной: либо это связано с наличием большой доли гидратированных минералов, либо необходимо предположить постоянную подпитку недр водой из атмосферы, или же в этих районах на глубине нескольких десятков сантиметров находится реликтовая льдосодержащая мерзлота. Если в Аравии и Мемнонии будет доказано наличие водяного льда, эти две экваториальные области станут наиболее интересными местами для проведения детальных исследований, в том числе с целью поиска следов внеземной жизни.

Толщина марсианских ледяных щитов

В декабре 2003 года на орбиту вокруг Марса был выведен аппарат Европейского космического агентства «Марс экспресс», на борту которого установлен радар «MARSIS» (руководители — профессор Джованни Пикарди (Италия) и Джеффри Плаут (США)). Он работает в частотном диапазоне 1,3—5,5 МГц. Когда радиоволны под поверхностью Марса проходят границу двух слоев с различной диэлектрической проницаемостью — возникает сильный отраженный сигнал. По времени задержки и амплитуде принимаемого радаром отраженного сигнала устанавливаются глубина и свойства границы. Эта стандартная методика применяется для изучения толщины ледников на Земле, а теперь с ее помощью исследовали структуру мерзлоты в высоких широтах Марса.

Оказалось, что в обоих полушариях постоянные шапки Марса окружены так называемыми полярными слоистыми отложениями: перемежающиеся слои льда и пыли либо слои льда с различным содержанием пылевой примеси. Считает-

ся, что полярные слоистые отложения — это следствие циклических изменений климата, вызванных изменением угла наклона и колебаниями параметров орбиты Марса.

Данные радионаблюдений показали, что льдистые слоистые отложения простираются как минимум до глубины 1,8 км на севере и до 3,7 км на юге, причем нижняя граница мерзлоты вглубь не зафиксирована. Отраженные радиоволны претерпевали минимальное затухание на предельных глубинах, указывая на близкий к чистому льду состав слоистых отложений. Из оценок следует, что одни южные слоистые отложения содержат достаточно воды, чтобы покрыть всю поверхность Марса слоем примерно в 11 м. Таким образом, только измеренное количество воды в районах льдосодержащей вечной мерзлоты на Марсе оказалось сравнимо с той массой льда, которая содержится в постоянных полярных шапках. Можно предположить, что на самом деле водяного льда в грунте гораздо больше, то есть льдистая вечная мерзлота представляет собой основной запас воды современного Марса.

Следующий этап — гидрологическая разведка Марса

Дальнейшее исследование воды на Марсе будет играть ключевую роль не только для понимания его происхождения, климата, геологии или для астробиологических исследований. Многие вопросы гидрологической разведки Марса должны быть решены до того, как на эту планету ступит нога человека. Ведь вода — важнейший технологический ресурс освоения: это источник кислорода, энергии, ракетного топлива, и незаменимая часть среды обитания человека. Будущую базу можно расположить в районе постоянной полярной шапки и использовать воду ее ледника. Однако экстремальный холод, продолжительная полярная ночь, сильные ветры и выпадение снега из CO₂ сделают условия ее функционирования не самыми благоприятными. Гораздо лучше расположить базу на экваторе, где температуры не сильно отличаются от температур в полярных районах Земли. На Марсе будет проведена разведка грунтовых отложений льда воды в экваториальных областях с низким нейтронным потоком от поверхности. Также будут искать резервуары подмерзлотной воды на склонах кратеров и каньонов.

Обсуждение возможности существования примитивной жизни на Марсе лежит за пределами темы данной статьи. Но можно с уверенностью сказать, что глубинные подмерзлотные воды, богатые газами вследствие тектонической активности и бронирующего влияния мерзлоты, представляют собой наиболее перспективную среду для поисков примитивной жизни на Красной планете. Подобные «геотермальные оазисы» могут возникать внутри криосферы, если Марс не утратил полностью вулканическую активность, и магматические расплавы местами периодически проплавляют мерзлоту. Существование практически изолированных экосистем на дне земных океанов в районах «подводных курильщиков» вселяет надежду на обнаружение похожих экосистем в недрах Марса.