



№ 4 (71), 2012  
АПРЕЛЬ

# НАУКА@ ТЕХНИКА

## Science & Technology



МАЗЕРАТИ



КА КБ «ЮЖНОЕ»



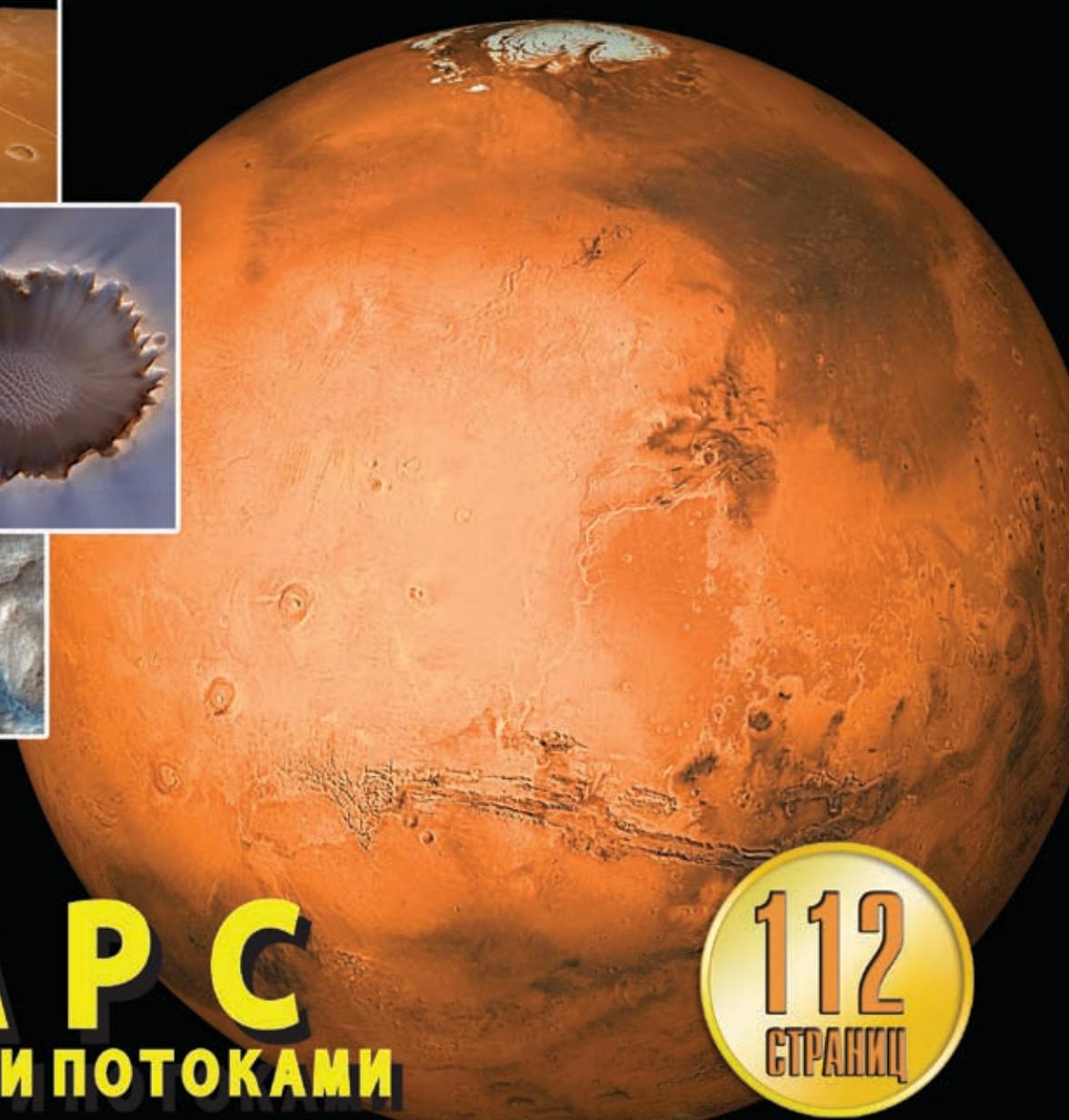
ТАНКИ КРИСТИ



ОХОТНИКИ ЗА ОБЛАКАМИ



КРЫМСКАЯ ВОЙНА



# МАРС

С ГОРАМИ И ПОТОКАМИ

112  
СТРАНИЦ

Леонид Ксанфомалити, доктор физико-математических наук, Институт космических исследований (ИКИ РАН).

# МАРС

## Часть 1

### С ГОРАМИ И ПОТОКАМИ

В кинокомедии «Карнавальная ночь» один из персонажей — лектор — сообщает: «Есть ли жизнь на Марсе, нет ли жизни на Марсе, науке не известно». С тех пор прошло почти полвека, но это утверждение справедливо и сегодня. Однако не менее справедливо и другое: «Где есть вода — там есть и жизнь». Сегодня с большой долей уверенности можно сказать: вода на Марсе есть. Дело за малым — отыскать там жизнь.

#### ПЛАНЕТА МАРС, ВОДА И МАРСИАНЕ

В процессе формирования планет Солнечной системы большую роль играла вода, а точнее, процессы изменения ее фазового состояния — пар-жидкость-лед. Вокруг молодого Солнца с его мощным излучением образовалась почти пустая зона. Вдали от Солнца, за той границей, где вода могла конденсироваться в ледяную пыль, возникли гигантские газожидкие планеты семейства Юпитера. Более близкие к Солнцу планеты группы Земли, к которым относятся Меркурий, Венера и Марс, образовались из почти сухого материала, как и спутник Земли Луна. Безатмосферные Меркурий и Луна воды практически не имеют. Венера, если когда-то и обладала запасами воды, лишилась их из-за особенностей своей эволюции и больших потерь водорода. Большим количеством воды располагает наша Земля. Масса земных океанов, покрывающих 71% поверхности планеты, составляет огромную величину, 2,4 десяти тысячные всей массы планеты. Самый распространенный пейзаж нашей планеты — это поверхность Мирового океана, а вовсе не леса, равнины, горы или долины. Около 60-70% воды при формировании Земли принесли с собой протопланетные и метеоритные тела, остальное выделилось из комет, упавших на формирующуюся Землю. Некоторые исследователи утверждают, что в каждом стакане воды, которую мы пьем, 1/3 — это вода комет. Вода Земли определяет метеорологические и климатические свойства нашей планеты. Поверхность океана удобна для отсчета высоты рельефа. Наконец, вода Земли была той средой, в которой когда-то возникла жизнь.

Марс сформировался из материалов, по составу подобных тем, что вошли в другие планеты земной группы. В процессе длительной эволюции его поверхность подвергалась ударам метеоритных тел различных размеров — от мелких пылинок до километровых глыб. Метеоритные удары образовали бесчисленные кратеры, а верхний слой грунта превратили в марсианский реголит — красноватую пыль, мелкие и крупные обломки. Красноватый цвет присущ всем изображениям Марса, получаемым с помощью телескопов (рис. 1). Более темные

или светлые районы соответствуют различиям в составе поверхности, в частности разному содержанию железа (рис. 2). Разреженная атмосфера Марса на 95% состоит из углекислого газа. Несмотря на ее низкое давление, в 150 раз ниже земного, ветер способен поднимать в атмосферу массу пыли, так что в периоды бурь поверхность планеты становится невидимой. В спокойное время пыль оседает и образует тонкий слой на поверхности, а самые мелкие пылинки остаются в атмосфере и придают красноватый цвет дневному небу. «Теплые», красновато-кирпичные оттенки обманчивы. Марс — холодная планета, средняя температура здесь составляет  $-60^{\circ}\text{C}$ , среднее орбитальное расстояние планеты от Солнца в 1,6 раза больше земного. Марс вдвое меньше Земли по диаметру и вдвое больше нашей Луны. Масса планеты составляет всего 11% земной. Планета в основном равнинная, но обладает высочайшими в Солнечной системе горами, до 24 км высотой. Эти горы — древние вулканические образования, сконцентрированные в нескольких районах планеты, прежде всего в районах Фарсида и Элизиум (рис. 3). Они представляют собой пологие конусы (так называемые щитовые вулканы), которые активно извергались примерно 60-30 миллионов лет назад. Одна из главных достопримечательностей Марса — гигантский каньон Долины Маринера (рис. 4), вытянутый на 5000 км в экваториальной зоне планеты. Протяженность земных каньонов, например знаменитого Аризонского, несравненно меньше. Но все эти свойства поверхности Марса стали известны, только когда появилась возможность исследовать его с помощью космических аппа-



Рис. 1. Таким Марс виден в телескоп при средних атмосферных условиях. Фото автора



**Рис. 2. С поверхности Марса космические аппараты передают изображения метеоритных кратеров и каменистой поверхности, покрытой пылью. Фото NASA**

ратов. Астрономы прошлого безнадежно напрягали зрение, проводя ночи у своих телескопов, но на всякие околонучные гипотезы не скупилась.

Еще философы античности в своих догадках об устройстве Вселенной пытались судить о возможности существования жизни в других мирах. Обитаемость планет считалась почти очевидной, а великий Исаак Ньютон допускал, что населено даже Солнце. Интерес к «братьям по разуму» вообще присущ человеку. Пожалуй, нет идеи более популярной, чем поиск жизни за пределами Земли. В 1897 году в русском переводе вышла книга знаменитого французского популяризатора науки К. Флам-Мариона «Живописная астрономия». В главе, посвященной Красной планете, автор писал: «Человеческий мир Марса, вероятно, значительно опередил нас во всем и достиг большого совершенства... Эти неизвестные нам братья не бестелесные души, но и не бездушные тела; это не сверхъестественные, но и не грубоестественные существа; они действуют, мыслят и рассуждают, как делаем это мы на Земле. Они живут в обществе, они состоят из семейств и образуют народы; они построили города и научились всяким искусствам». Журналы тех лет неизменно обращались к теме несчастных марсиан, страдающих от нехватки воды, чему немало способствовали опубликованные незадолго до того, в 1877 году, сообщения об открытии на Марсе ирригационной системы каналов (которых на самом деле нет). Был даже организован сбор средств для создания ракеты, которая доставит на Марс воду.

С тех пор прошло более ста лет. Сегодня с определенной натяжкой можно сказать, что физические условия, более или менее подходящие (хотя бы минимально) для земных форм жизни, из всех



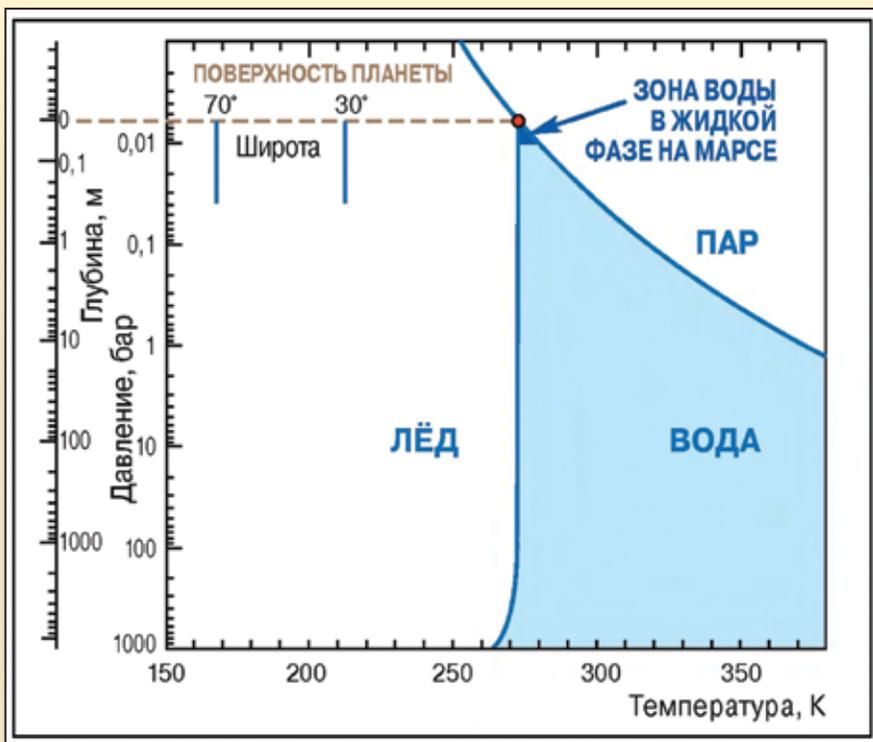
**Рис. 3. Вулканическая кальдера диаметром около 70 км венчает самую высокую вершину Марса, гору Олимп**



**Рис. 4. Гигантская сеть каньонов Долины Маринера простирается на 5000 км вдоль параллели 10°8. Впервые ее изображение передал американский космический аппарат «Маринер-9» в 1972 году**

планет Солнечной системы есть только на Марсе. Но для возникновения и поддержания жизни необходима вода. Проблема поиска воды на Марсе (и оценка ее количества), стоящая первой в списке наиболее актуальных задач исследований планеты, многократно и детально обсуждалась задолго до начала космических исследований тел Солнечной системы. Та единственная, аминокислотная форма жизни, которую мы знаем, без воды существовать не может. Поэтому поиск жизни на Марсе начинается с поиска воды. Еще за 40 лет до исследований планет Солнечной системы космическими аппаратами астрономы пытались установить наличие воды и подтвердить (или опровергнуть) давнишнюю гипотезу о марсианских каналах. В середине XX века советские ученые создали даже особый раздел исследований Марса — астроботанику. Ее задачей было исследовать высокогорную растительность Памира и Тянь-Шаня, имеющих климатические условия, сходные с марсианскими, и объяснить сезонные потемнения больших площадей на Марсе весенним пробуждением флоры. Эксперименты по измерению содержания водяного пара в атмосфере планеты ставились уже на первых российских космических аппаратах «Марс» и на американских «Маринерах» и «Викингах». После измерений с помощью аппаратов «Викинг» (1976—1977) возникла и стала быстро развиваться гипотеза, подразумевающая, что хотя водные запасы Марса на первый взгляд незаметны, но могут быть сконцентрированы в подпочвенной мерзлоте и полярных шапках планеты.

Присутствие жидкой воды на поверхности Марса долгое время вообще считалось невозможным не только из-за низких средних температур, но и по причинам, определяемым термодинамическими свойствами системы фаз лед-вода-водяной пар. При давлении 6,1 мбар и ниже вода кипит при любой температуре,



**Рис. 5. Термодинамические условия существования льда, пара и воды. Маленький кружок в верхней части диаграммы соответствует давлению 6,1 мбар и температуре 0°С. Слева показана соответствующая глубина под поверхностью планеты. Вертикальными линиями указаны среднегодовые температуры для широт 30 и 70°N. Условия существования воды в жидком виде на поверхности Марса отражает небольшая треугольная часть диаграммы, выделенная темно-синим цветом**

допускающей ее жидкое состояние. Водяной пар составляет ничтожную долю атмосферы Марса, но законы термодинамики таковы, что поведение фаз воды определяется полным давлением атмосферы, включая все ее компоненты. Принятая для «средней» поверхности планеты величина 6,1 мбар была выбрана как аналог «уровня моря» на Земле.

На рис. 5 показаны области существования льда, пара и воды на Марсе в зависимости от температуры и давления. Слева показана шкала глубины под поверхностью, которая соответствует такому давлению. Небольшой треугольник темно-синего цвета указывает на зону возможного существова-

ния воды в жидком виде на поверхности. Таким образом, своеобразный «запрет по давлению», то есть широко распространенное мнение, что вода вообще не может присутствовать в жидком виде на поверхности Марса, неверен. Запрет не носит абсолютного характера, поэтому некоторые геологические образования на поверхности планеты могут иметь природу, связанную с водой.

### СЛЕДЫ ДРЕВНИХ РЕК И ОЗЕР

Космические аппараты, доставленные в последней четверти XX века на поверхность Марса и на орбиты его спутников, показали, что климат планеты действительно очень сухой и холодный, а очевидных признаков воды нет. Постепенно стало ясно, что полярные шапки содержат много воды, но, по-видимому, далеко не всю. Вместе с тем на крупномасштабных снимках поверхности было обнаружено заметное число странных образований, очень похожих на долины земных пересохших рек. Одна из типичных протяженных долин, сходство которой с широким руслом пересохшей реки не вызывает сомнений, — долина Нанеди в Земле Ксанфа, с координатами 5,1°N и 48,3°W (рис. 6).

Размеры представленного здесь участка 28x10 км. По-видимому, именно вода оставила русло шириной около 2,5

км. Оно образовалось более миллиарда лет назад. Благодаря высокому разрешению справа на снимке можно увидеть следы более поздних узких потоков на дне долины — климат Марса меняется медленно. Этот снимок, полученный уже в наши дни с аппарата США «Mars Global Surveyor» (MGS), относится к наилучшим иллюстрациям следов древней гидрологии Марса. Эпоха еще больших открытых водоемов на Марсе относится к ранним периодам истории планеты (более 2 млрд. лет назад).

Водно-эрозионные следы на Марсе весьма многочисленны. Следы воздействия воды и ее потоков носят многие детали рельефа Марса. На рис. 7 показан снимок долины Ниргал, которая также относится к классическим водно-эрозионным



**Рис. 6. Долина Нанеди — одно из многочисленных геологических свидетельств богатой водой древней истории Марса**

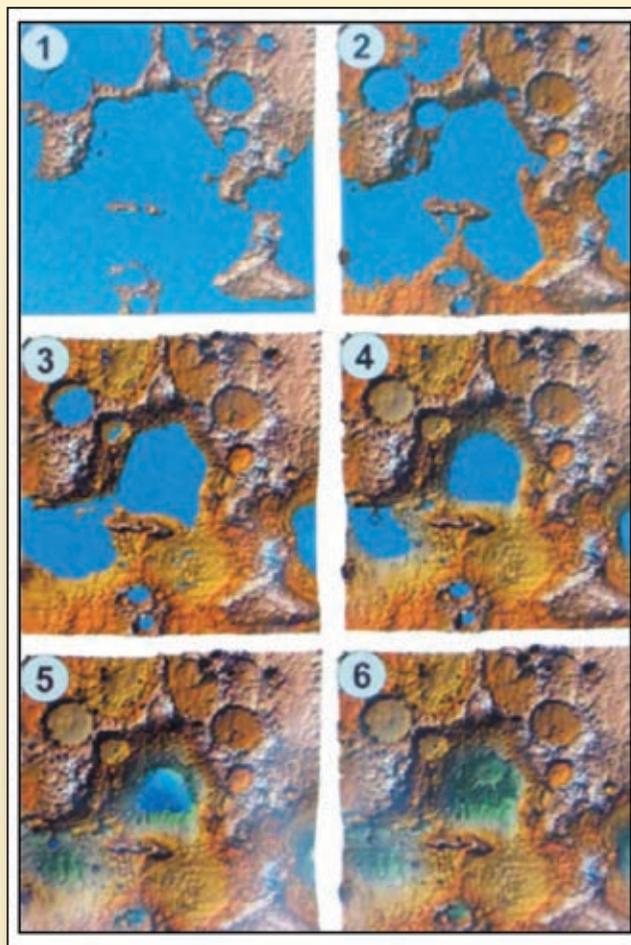


**Рис. 7. Долина Ниргал — одна из наиболее известных долин древних марсианских рек (29,4°S, 39,1°W). На врезке — современный снимок участка дна этого древнего русла. Размер выделенного фрагмента 3x6,5 км. (MGS MOC Release No. MOC2-254. NASA/JPL/MSSS)**

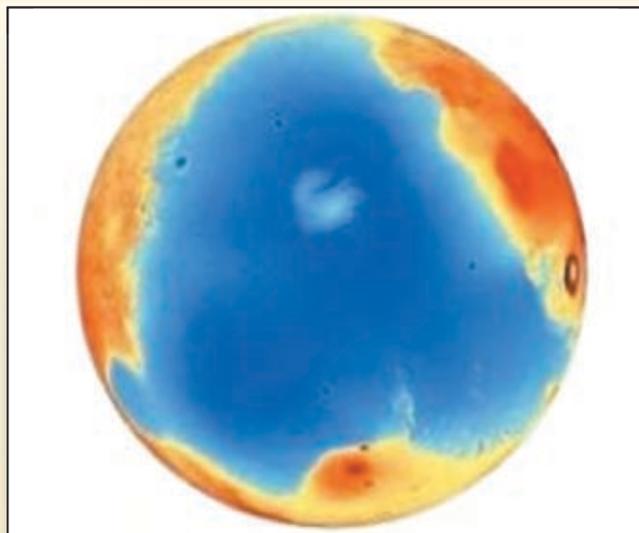
образованиям. Долина Ниргал была обнаружена по снимкам, сделанным с аппарата «Маринер-9», а врезка на рис. 7 представляет современный снимок аппаратом MGS. Сухое ныне узкое русло среди песчаных дюн на дне долины отражает более поздние времена гидрологической истории поверхности Марса. В эпоху полноводных древних рек давление атмосферы было намного выше и, вероятно, сопутствовало значительному парниковому эффекту. Но по мере прогрессирующего похолодания водоемов оставалось все меньше. Их постепенное обмеление и пересыхание иллюстрирует рис. 8, где представлен район 500x600 км с центром у координат 35°S, 177°W. Изучение особенностей рельефа показало, что в северной части планеты, возможно, существовал океан, который покрывал около 35% поверхности планеты (рис. 9). Это предположение разделяют не все специалисты; многие утверждают, что после него должны были остаться карбонаты (соли угольной кислоты), которых на Марсе мало.

Аппарат «Марс Экспресс» проводил минералогическое картирование значительной части планеты. При большом разнообразии минерального состава карбонаты, широко распространенные на Земле, все же не найдены. Это важный результат, поскольку на нашей планете именно в их залежах сосредоточено основное количество углерода. Больше того, «Марс Экспресс» не подтвердил наличия больших запасов углекислоты (прежде всего в виде льда CO<sub>2</sub>), достаточных при возвращении в атмосферу для существенных изменений массы атмосферы планеты, которые привели бы к изменению климата планеты из-за парникового эффекта. Этот результат входит в противоречие с постоянно упоминаемой в литературе гипотезой о теплой эпохе раннего Марса, когда возникновение жизни, как предполагается, было возможно. Не исключено, однако, что образованию карбонатов могла мешать повышенная кислотность воды.

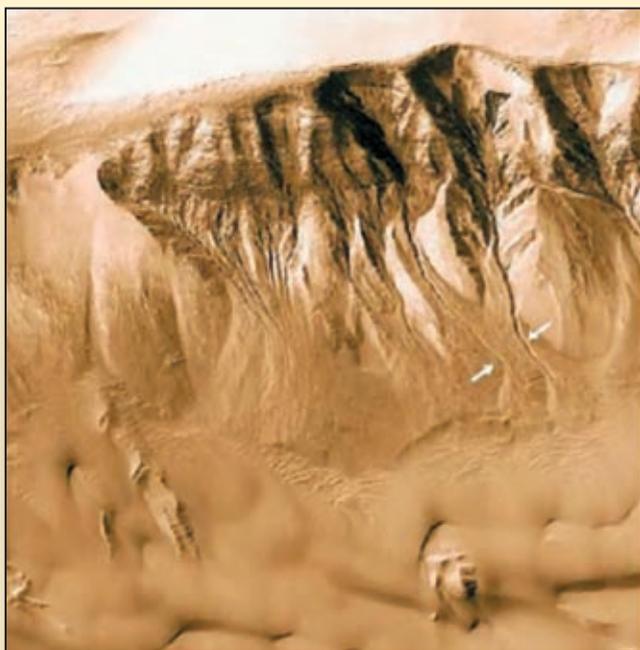
Предположение, что теперь главные водные запасы Марса сконцентрированы в подпочвенной мерзлоте, куда ушла почти вся вода с его поверхности, быстро завоевало популярность. Процесс похолодания на планете был длительным и растянувшимся на многие сотни миллионов лет. В наши дни лишь в экваториальных районах в летний полдень температура тонкого верхнего слоя грунта может стать положительной. Однако на долю водяного пара приходится ничтожная доля атмосферного



**Рис. 8. Моделирование процесса постепенного обмеления и пересыхания водоемов на Марсе в первые миллиарды лет его истории. Район 35°S, 177°W, 500x600 км. Фрагмент 1 соответствует древнему теплomu климату, фрагмент 6 — современным условиям**



**Рис. 9. Гипотетический океан Марса располагался в северном полушарии и содержал до 60 млн км<sup>3</sup> воды. Белое пятно выше центра рисунка — современное положение северной полярной шапки. Предполагается, что исчезновению океана сопутствовало изменение положения полюсов и наклона полярной оси планеты. Из работы Perron**



**Рис. 10. Осыпи грунта и нитевидные овраги (показаны стрелками) на склоне кратера (42,4°S, 158,2°W). Овраги похожи на следы земных горных рек, но, в отличие от земных оврагов, они не расширяются, а сужаются вниз по склону**

давления Марса, около 1/10 000. Реальные значения давления атмосферы у поверхности Марса, с его большими перепадами высот, лежат в широких пределах. Давление составляет всего 0,6 мбар на вершинах гигантских древних вулканов области Фарсида высотой до 24 км; 9 мбар в глубоких, до 4 км, частях каньона Кондор (Долины Маринера) и 10 мбар на дне глубокой впадины Эллада. Там открытая водная поверхность могла бы сохраняться вплоть до замерзания. Вода вполне может какое-то время присутствовать в жидком виде в некоторых районах и на поверхности Марса. Другое дело, что запасы воды на Марсе весьма ограничены.

### ОСЫПИ И ОВРАГИ

Следы сползаний и осыпей грунта на склонах кратеров и каньонов были замечены уже на первых снимках поверхности Марса. Камеры, установленные на аппарате МС8 и других современных аппаратах, обладают весьма высоким разрешением — до единиц метров. На прежних аппаратах разрешение было в тысячу раз хуже. Именно снимки с высоким разрешением позволили выделить новые классы объектов, особенно интересных для понимания как климатических изменений, так и современной гидрологии Марса.

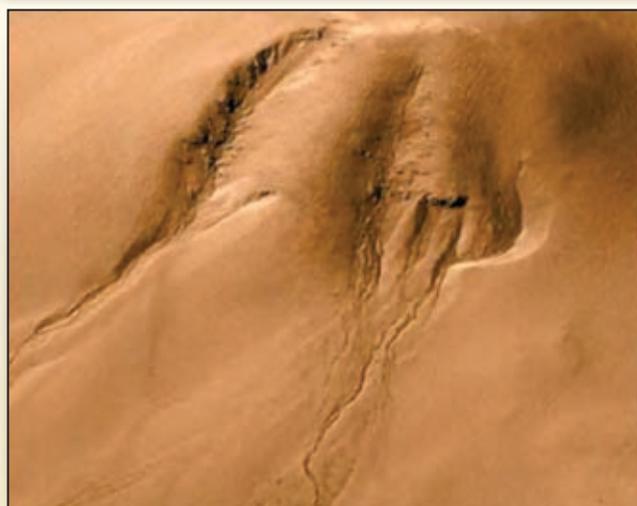
Перемещение больших масс грунта, вероятно песка, пыли и камней, по склону, происходящее в современную эпоху, иллюстрирует рис. 10. В нижней части снимка видны размытые валы осыпавшегося материала шириной около 3 км. Валы сыпучего материала огибают остатки прежнего рельефа, оставляя обнаженный склон. Такие же осыпи можно видеть и в других районах Марса; они известны со времен миссии «Викинга». Но значительно улучшенное разрешение фотокамер на новых космических аппаратах позволило обнаружить удивительные следы на склонах марсианских кратеров. Нельзя сказать, что образований, подозрительных в отношении наличия жидкой воды, раньше не замечали совсем. Но твердо установленная сухость и морозность марсианского климата заставляла исследователей искать ей альтернативу. Вначале предпола-

лось, что небольшие, но свежие изменения рельефа планеты объясняются большими осыпями мелкого песка и камнепадами на склонах глубоких долин и кратеров. Так возникли очень широкие и протяженные овраги. Труднее было объяснить недавнее возникновение оврагов поменьше, да еще и со следами каких-то потоков.

На рис. 10, наряду с осыпями сыпучего материала, можно видеть такие необычные образования. Это тонкие нитевидные километровые овраги или борозды, спускающиеся по склону (показаны стрелками). Их ширина в узкой части составляет всего от единиц до десятков метров. Овраги очень похожи на промоины земных горных рек или ручьев, но в отличие от земных оврагов они не расширяются, а сужаются вниз по склону. Среда, которая их создавала, либо куда-то исчезла на полпути, либо чем-то тормозилась в своем движении. Потоки в земных горных реках обычно расширяются вниз по склону. Для Земли это естественно. Так же ведут себя камнепады (сели), оставляя расширяющиеся следы (рис. 11).



**Рис. 11. Ручьи и следы камнепадов на склонах земных гор. Сели и горные реки оставляют следы, которые расширяются вниз по склону**



**Рис. 12. Одиночные ключи грунтовых вод выходят на склоны. Потоки замерзают на ложе из морозного грунта, пройдя несколько сотен метров**

Леонид Ксанфомалити, доктор физико-математических наук, Институт космических исследований (ИКИ РАН).

# МАРС

## Часть 2

# С ГОРАМИ И ПОТОКАМИ

Однако сторонники потоков воды провели всестороннее исследование гипотезы о жидкой углекислоте и других средах. Были детально рассмотрены практически все ее аспекты и сделаны убедительные выводы. Например, в аккуратной работе Стьюарта и Ниммо, вышедшей в 2002 году, результаты сформулированы следующим образом: «Мы нашли, что ни конденсированный  $\text{CO}_2$ , ни клатраты  $\text{CO}_2$  не могут быть накоплены в коре Марса в достаточных количествах... Таким образом, мы заключаем, что овраги не могут быть образованы жидким  $\text{CO}_2$ . В свете этих результатов потоки жидкой воды остаются предпочтительным механизмом формирования свежих протоков на поверхности».

Изображение склона с одиночными нитевидными «исчезающими» оврагами приведено на рис. 12 (НиТ №4, 2012). Узкие овраги или протоки довольно часто встречаются в полосе марсианских широт от  $30^\circ\text{N}$  до  $70^\circ\text{S}$ . Они действительно похожи на склоновые русла земных рек и не перекрываются более поздними образованиями (например, песчаными дюнами). Ширина (и, вероятно, глубина) оврагов близка к 10-20 м, а протяженность составляет от сотен метров до километров. Сотни снимков, сделанных с орбитальных аппаратов, показали, что источники следов грунтовых вод находятся на крутых склонах долин и кратеров, на глубине от 150 до 500 м ниже уровня окружающей поверхности. По-видимому, именно на этих глубинах в некоторых районах происходит таяние грунтовых льдов и вода выходит на склоны. На рис. 13 представлен еще один вид района с подобными оврагами. В отличие от рис. 10 здесь овраги извилистые. На Земле это значило бы, что на пути потока расположены крупные глыбы, а склон пологий. Ширина оврагов — от единиц метров до 10-20 м, они тоже не расширяются, а сужаются вниз по склону и исчезают.

Именно потоки (воды или какой-то другой жидкости) легко могли бы образовать такие промоины, но как объяснить их странный вид? Почему следы потоков теряются на склоне? Ускорение свободного падения на Марсе почти вдвое меньше земного, но это, конечно, не значит, что вода течет вверх. На первый взгляд такое сужение оврагов кажется парадоксальным, если они образованы потоком. Но для Марса можно предложить простое объяснение этого парадокса: низкие температуры. Если грунтовая вода действительно образовала ключ и поток вышел



**Рис. 13. Склон небольшого кратера в том же районе (кратер Ньютона), что и на рис. 10, с многочисленными извилистыми оврагами и осыпями сыпучего материала на дне. (MGS MOC Release No. MOC2-317. NASA/JPL/MSSS) Извилистые овраги свидетельствуют, вероятно, о каменистом склоне**

на поверхность, устремившись вниз по морозному склону, то в условиях Марса размеры развивающейся промоины будут зависеть, прежде всего, от температуры поверхности и температуры потока. Если температура поверхностного слоя днем составляет, в зависимости от широты на Марсе, от  $-60$  до  $-10^\circ\text{C}$  или ниже, поток, спускаясь по склону, должен постепенно и впитываться в сухой морозный грунт, и замерзает. Образуется ложе канала из промерзшего грунта, по которому оставшаяся часть потока устремляется дальше, впитываясь, наращивая промерзшее ложе, охлаждаясь и продолжая замерзать. Поэтому, в отличие от земных склоновых рек, потоки на Марсе сужаются. При переходе воды с температурой  $0^\circ\text{C}$  в фазу льда выделяется 80 ккал/кг. Теплоемкость марсианского грунта невелика, поэтому промерзшее ложе потока может получиться достаточно толстым, если ключ существует достаточно долго. Как ведет себя грунт Марса при увлажнении и сколько при этом поглощается тепла, точно неизвестно, но баланс отдаваемого тепла должен включать его потери в образующемся ледяном ложе канала, а также более медленное излучение и поглощение атмосферой. Температура истекающей воды также неизвестна, но высокой она быть не может, вероятно, около  $10^\circ\text{C}$ .

Сужающиеся по склону овраги известны и на Земле в районах пустынь и связаны с непосредственным поглощением (впитыванием) воды сухим теплым грунтом, что не имеет ничего общего с мгновенным образованием тонкого ледяного ложа потока на Марсе. Более близким аналогом могут быть потоки от гейзеров, бьющих в кальдере вулкана Эребус в Антарктиде.



**Рис. 14.** Тормозные ракетные двигатели аппарата «Феникс» (фото 2008 года) сдули тонкий слой песка и пыли и обнажили сплошной слой льда

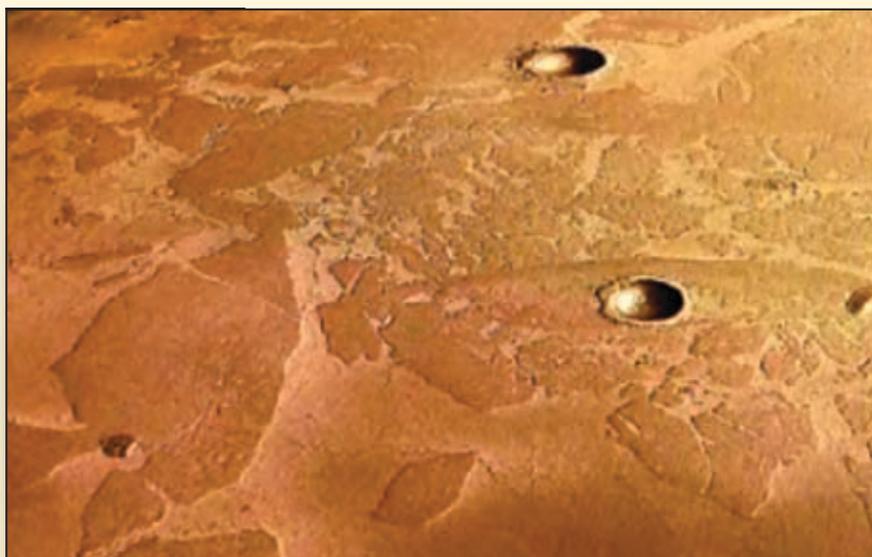
очень долго. Что же касается поясов экваториальных и умеренных широт, выход воды (и, возможно, водяного пара) из глубоких слоев тающего льда на поверхность неизбежен — куда им еще деваться. По результатам исследований на аппарате MGS было установлено, что в некоторых районах на глубине менее 500 м есть жидкая вода. На склонах кратеров на рис. 6 и 10 ясно виден выделяющийся чем-то слой глубиной 100-500 м. Можно предположить, что он отличается именно присутствием льда и воды.

В представлениях о Марсе как о «сухой, мертвой планете» произошел перелом. Как всегда, появление новых измерительных приборов приводит к ревизии прежних сведений. Но уместно отметить: еще в конце 1970-х исследователи предполагали, что на Марсе должны существовать частично или полностью промерзшие, скрытые слоем песка и пыли озера. На одном из снимков аппарата «Марс Экспресс» видна обширная гладкая равнина (рис. 15). Метеоритные кратеры на ее поверхности многочисленны, что указывает на сравнительно недавнее появление равнины. Верхний окрашенный слой — конечно, песок и пыль, но под ними просматриваются плоские блоки протяженностью в десятки и даже в сотню километров. Из сравнения с

Часто утверждается, что жидкая вода на поверхности Марса немедленно испаряется. Это недоразумение: роль испарения пренебрежимо мала, и ее нетрудно оценить. Пусть атмосферное давление в данном районе 8 мбар, тогда температура кипения воды, согласно диаграмме на рис. 5, составляет 4°C. При температуре воды в ключе, например, 10°C вода в потоке будет кипеть, постепенно уменьшая свое теплоемкость и остывая. Когда температура упадет до 4°C (или до 0°C при давлении 6,1 мбар), каждый килограмм воды потеряет 6 ккал и кипение прекратится. Чтобы найти, какая доля потока испарится с понижением его температуры до 4°C, следует эти 6 ккал разделить на теплоту парообразования (в земных условиях это 540 ккал/кг, на Марсе незначительно больше). Расчет показывает, что в пар превратится всего 1,1%, то есть сколько-нибудь заметная часть истекающей воды испариться не может, для этого негде взять необходимую теплоту парообразования. Реальные процессы могут быть сложнее, так как на крутых склонах поток несет с собой значительные массы грунта, что уменьшает его теплоемкость.

Когда дневная температура грунта становится положительной, как это наблюдалось с аппарата «Пасфайндер», потоки способны распространяться на большие расстояния, но их обильность также должна уменьшаться с расстоянием из-за расхода воды на увлажнение песчаного грунта. Заметную роль в протяженности потоков может играть солёность грунтовой воды Марса, понижающая точку замерзания.

Источником жидкой воды может быть только таяние подпочвенного льда (или вечной мерзлоты). Глубина залегания подпочвенного льда оценивается различно, в среднем от сотни метров до километра, а минимальная оценка глубины — всего несколько сантиметров. Так, в арктической зоне посадки аппарата «Феникс» лед оказался сразу под слоем пыли (рис. 14). Аппарат исследовал реголит на небольшой глубине. При посадке аппарата струи газа из тормозных двигателей (конусы вверху) сдули слой пыли. Под ее тонким слоем находится значительная масса льда, который, в отличие от льдов низких широт, здесь сохраняется



**Рис. 15.** Аппарат «Марс Экспресс» в 2005 году передал изображение обширной равнины, которая могла быть ледяной поверхностью древнего океана. Плоские блоки неправильной формы, покрытые песком и пылью, выглядят так же, как льдины в антарктических океанах Земли

видом ледовых полей Антарктики был сделан предположительный вывод, что это поверхность замерзшего моря или небольшого океана, возникших в эпоху более мягкого климата Марса. Метеоритные кратеры неглубоки и своей правильной формой отличаются от других ударных кратеров, позволяя предположить, что они образовались в толще льда.

Как уже отмечалось, километровые слои льда, воды и пыли образуют северную полярную шапку Марса (рис. 16). В отличие от южной, примесей льда  $\text{CO}_2$  здесь практически нет. Из-за низких температур таяния льда ожидать не приходится, лед сублимирует (испаряется, минуя жидкую фазу). Воды в северной полярной шапке сосредоточено много, но все же намного меньше, чем в подпочвенных льдах. На границе шапки при таянии возникают образования, природа которых не вполне понятна. В появлении жидкой воды полярные шапки, по-видимому, какой-либо роли не играют.



**Рис. 16. Структура северной полярной шапки включает слои льда и пыли. Диаметр шапки достигает 500 км**



**Рис. 17. Рождение нового потока на склоне кратера. Фото MGS**



**Рис. 18. Склон кратера с протоками (39°8', 166°Т^). В нижней части снимка находится бассейн, подобный чашам на рис. 22 и 23, но значительно большего размера**

### ВОДА НА МАРСЕ СЕГОДНЯ

Появляется все больше доказательств того, что природа протяженных темных или светлых вытянутых образований на склонах кратеров и возвышенностей Марса связана с ныне существующими источниками жидкой воды, ключами грунтовых вод, возникающими на склонах, и потоками воды, а вовсе не с перемещением больших масс сухого песка (пыли) или с камнепадами. Полученные с орбитальных аппаратов изображения с разрешением до единиц метров позволяют увидеть такие ключи в действии. В верхней части рис. 17 сравниваются два снимка склона кратера, сделанные с интервалом в шесть лет. За это время на склоне появился новый объект, очень похожий на поток или его след, длиной несколько сотен метров. Как будет показано ниже, часто потоки возникают повторно и движутся по старому или новому пути. Интересно, что в некоторых случаях они не обрываются, а заканчиваются чем-то вроде запруды.

На рис. 18 представлен склон кратера, богатого склоновыми протоками (39°S, 166°W). В нижней части снимка находится чаша, или бассейн, изрезанной формы. Внешняя граница бассейна выделяется светлой окантовкой. Поверхность бассейна по сравнению с примыкающей поверхностью гладкая даже при большом увеличении; возможно, это лед. В верхней (на снимке) части чаши видны два или три следа, соответствующие многократному понижению уровня поверхности. Сток воды через края бассейна образовал второй, внешний контур (в нижней части снимка). Два таких же, но меньших по размерам контура можно заметить в ле-

вой части снимка. Источников жидкости, пополняющих бассейн, видно несколько. Вероятно, главный источник находится справа над чашей. Это вытянутое образование с шестью направленными вниз отрогками, и, по-видимому, вдоль них стекает вода. Более мелкие структуры того же типа видны слева над бассейном и, вероятно, связаны с наиболее широким протоком вдоль склона. Форма промоин на рис. 18, соответствующая крутому склону, указывает, что поток несет с собой значительное количество грунта. Горизонтальная ось снимка — около 1500 м. Длина бассейна — около 600 м, а площадь — около 0,3 км<sup>2</sup>. Никакие песчаные запруды на Марсе не смогли бы удержать столь большие массы воды, даже с учетом втрое более низкой силы тяжести на планете. Но если грунт очень холодный, поступающая вода, впитываясь в морозный грунт, способна быстро создать запруды, чаши из льда и промерзшего грунта, обладающие определенной прочностью. По существу, это тот же механизм, о котором говорилось выше и который объясняет сужение протоков вдоль склона.

Возраст образований, показанных на рис. 18, не может быть большим. Вполне вероятно, что источники и бассейн действуют в наши дни. На это указывают чистая, насколько можно судить по снимку (без отложений пыли), кромка бассейна, примыкающий к нему второй контур и четкие нитевидные протоки на склонах. Протоки имеют разветвляющуюся форму, но направлены вверх, а не вниз по склону. Это свойство склоновых оврагов на Марсе уже рассматривалось выше; оно связано с быстрым вымерзанием потока и с частичным просачиванием воды в сухой песчаный грунт. Ветвящиеся отрогки представляют собой не притоки, а оттоки от основного русла.

Интересно оценить возраст нитевидных оврагов; он тоже очень большим быть не может хотя бы из-за массивных обрушений песка, которые хорошо видны внизу рис. 10 и которые неминуемо засыпали бы старые овраги. Разрушение оврагов происходит и под действием постоянной ветровой эрозии.

Хорошую возможность оценить возраст источников представляют рис. 19-21. На рис. 19 полная протяженность расположенного на склоне следа потока достигает 6 км. Можно предполо-

жить, что более темный оттенок соответствует увлажнению; во всяком случае, темный оттенок характерен для земных увлажненных грунтов. Источников на снимке два, на расстоянии примерно 150 м один от другого. Каждый из них, в пределах разрешения снимка, — «точечный». Дебет каждого из источников должен быть достаточно большим, чтобы оставить столь протяженный след или создать глубокие овраги. На снимке видно, что следы имеют разную плотность; более плотный и узкий возникает ниже и проходит вдоль менее плотного, но более широкого следа. Напрашивается вывод, что плотный след — более поздний и что он возник, когда верхний источник уже иссяк. Можно заметить, что след на рис. 19 отличается от рис. 10 и 12 тем, что глубокого оврага (промоины) здесь, по-видимому, нет. Возможно, это молодой источник, а промоина формируется, как и в случае земных горных рек, за длительное время.

Можно очень приблизительно рассчитать объем вытекшей воды, который для пейзажа на рис. 19 составил не менее 300 м<sup>3</sup>. Расчет осложняется тем обстоятельством, что продолжительность работы отдельного источника неизвестна, а глубина промерзшего ложа должна постепенно нарастать за счет теплообмена с потоком. Поэтому оценка (300 м<sup>3</sup>) опирается главным образом на проделанный несложный модельный эксперимент и может быть очень неточной. На возможную связь плотности (оттенка) следа с его возрастом указывает и рис. 20. Наряду с длинным правильной формы следом, возникающим, как и на рис. 19, из «точечного» источника на верхней кромке вала, на склоне видны многочисленные мало контрастные полосы той же природы — по-видимому, следы пересохших потоков. Интересные образования видны в левой части снимка: два коротких темных потока снова возникли у начала светлых (более старых) образований. Таким образом, источники многократно возникают на тех же самых местах.

В некоторых случаях темные потоки возникают вблизи вершины изолированного холма, как на рис. 21, где возвышающаяся гора украшена многочисленными радиально направленными



**Рис. 19. Протяженность следа потока на склоне достигает 6 км. Для земных грунтов потемнение соответствует увлажнению. Можно предположить, что темный след относится к более позднему источнику**



**Рис. 20. Наряду со следами свежих и старых потоков два коротких темных потока снова возникли у начала светлых (более старых) образований**



**Рис. 21. Возвышенность, из-под поверхности которой радиально отходят следы потоков разного возраста**

следами потоков разного возраста, в том числе и возникающими повторно. Вероятно, это один из лучших примеров быстрого таяния значительной изолированной массы подпочвенного льда или даже целой ледяной горы.

Как долго могут сохраняться покрытые реголитом ледяные поверхности, все еще неясно. Какой-то ответ могут дать бассейны, подобные показанному на рис. 18. С одной стороны, слои пыли настолько хорошо изолируют грунтовый лед, что он может сохраняться почти неограниченно долго, с другой — имеется эндогенное (внутреннее) тепло недр, которое все-таки постепенно лед выплавляет. Количество выделяемого тепла в разных районах различно, так как распределение в коре планеты радиоактивных элементов — урана, тория и калия-40, распад которых создает значительную его часть, неравномерно.

У марсианских бассейнов есть аналоги на Земле, особые природные образования, которые потоки порой образуют на земных горных склонах. На рис. 22 показаны такие удивительные структуры в природном заповеднике Памуккале (Турция). Здесь теплая вода многочисленных термальных источников на горном склоне (рис. 22а), обогащенная кальциевыми гидросолями, минерализуется и создает расположенные каскадом чаши, заполненные водой (рис. 22b). Масштаб чаш иллюстрирует рис. 22с. Постепенно вода отступает, образуя горизонтальные кромки на поверхности чаш. Когда источник иссякает, исчезает и вода в чашах. Пустые чаши окаймляют плато изрезанной белой цепью.

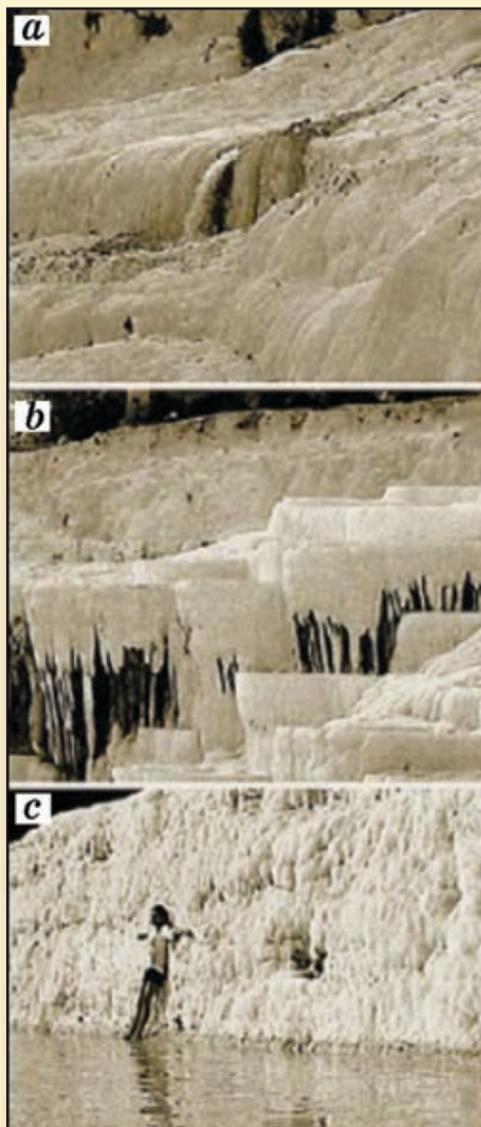
Пока никаких указаний на минеральные источники на Марсе нет. Но чаши Памуккале — это прямая морфологическая аналогия с гораздо большим бассейном изрезанной формы на рис. 18. Внешняя граница бассейна, похожая на края чаши Памуккале, выделяется светлой окантовкой, вероятно, ледяной кромкой.

Еще один такой же бассейн, но значительно больших размеров, можно видеть на рис. 23. Он находится на дне небольшого кратера, расположенного внутри кратера Ньютона. Горизон-

тальная ось снимка составляет 7 км, а размер видимого участка бассейна достигает 3,4 км. На крутом склоне видны многочисленные нитевидные следы потоков, возникающих в стенке вала кратера на глубине примерно 0,5 км под уровнем поверхности. Потоки состоят, по-видимому, из воды и полужидкого грунта. В отличие от рис. 13, следы здесь прямые, что, наверное, указывает на большую крутизну склона. Наиболее широкий проток расположен правее центра, под нависающим «языком», который, возможно, состоит из льда. Дно кратера выглядит затуманенным; не исключено, что это действительно испарения над открытой частью водной поверхности бассейна. Поверхность бассейна не такая гладкая, как на рис. 18. Связано ли это с возрастом бассейна, неизвестно. Судя по его площади, составляющей несколько квадратных километров, приток жидкости здесь значительно превышает ее приток к бассейну на рис. 18.

На снимках поверхность бассейнов по цвету не отличается от окружающего рельефа, поэтому предполагается, что вся ледяная поверхность покрыта песком и пылью. Но есть одно исключение. В 70° к северу от экватора, на дне 35-километрового кратера, находится ледяное озеро диаметром 10 км и глубиной до 200 м (рис. 24). Вал кратера высотой около 300 м круглый год надежно заслоняет лед от прямых солнечных лучей. Только вот почему он здесь чист от пыли?

Возраст бассейнов не может быть большим. Если бы ключи на склонах действовали постоянно, вместо чаш или бассейнов наблюдалось бы ровное дно кратера, покрытое твердой (или жидкой) средой. По-видимому,



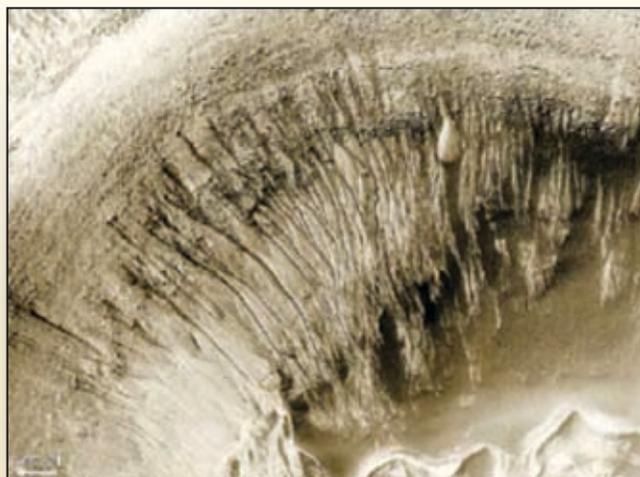
**Рис. 22. На горном склоне в природном заповеднике Памуккале (Турция) вода термальных источников минерализуется, образуя заполненные водой чаши. Фото автора**

снимки указывают на современные явления, которые возникают, развиваются и исчезают, хотя повторное появление следов на тех же местах может быть доказательством устойчивых и длительных процессов.

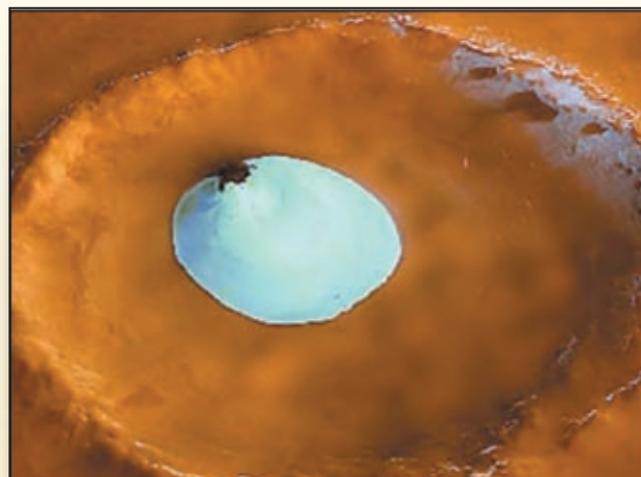
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно отметить интересное совпадение. Более 20 лет назад было высказано предположение, что марсианские полюса однажды переместились так, что льды прежних полярных шапок оказались на экваторе, где сохранились под слоями грунта и отложениями вулканического пепла. Почти все обнаруженные следы текущей воды сосредоточены в восточной части Равнины Амазония и в восточной части Земли Аравия — диаметрально противоположных экваториальных районах Марса. Вместе с тем вид поверхности в другом районе, где работал аппарат «Опортьюнити», по мнению многих специалистов, свидетельствует об осадочных процессах в древнем водохранилище, что возвращает нас к нерешенному вопросу об эволюции климата древнего Марса и странному отсутствию следов жизни на нем. Но об этом надо говорить отдельно.

Марс — сухая и морозная планета, но в некоторых его районах присутствуют действующие источники и, по-видимому, устойчивые каналы грунтовых вод. Наличие жидкой воды может играть важную роль в современных гидрологических циклах на планете. Если для поиска жизни на планете необходимо найти там воду, то эта задача, по-видимому, решена. Остается обнаружить на Марсе жизнь.



**Рис. 23. Бассейн на дне небольшого кратера, расположенного внутри кратера Ньютона. Размер видимой части бассейна достигает 3,4 км**



**Рис. 24. Ледяная линза на дне 35-км кратера, расположенного в полярной зоне. Вал кратера круглый год защищает лед от прямых солнечных лучей**