

ГЕОРГИЙ БУРБА, кандидат географических наук

# Извержения

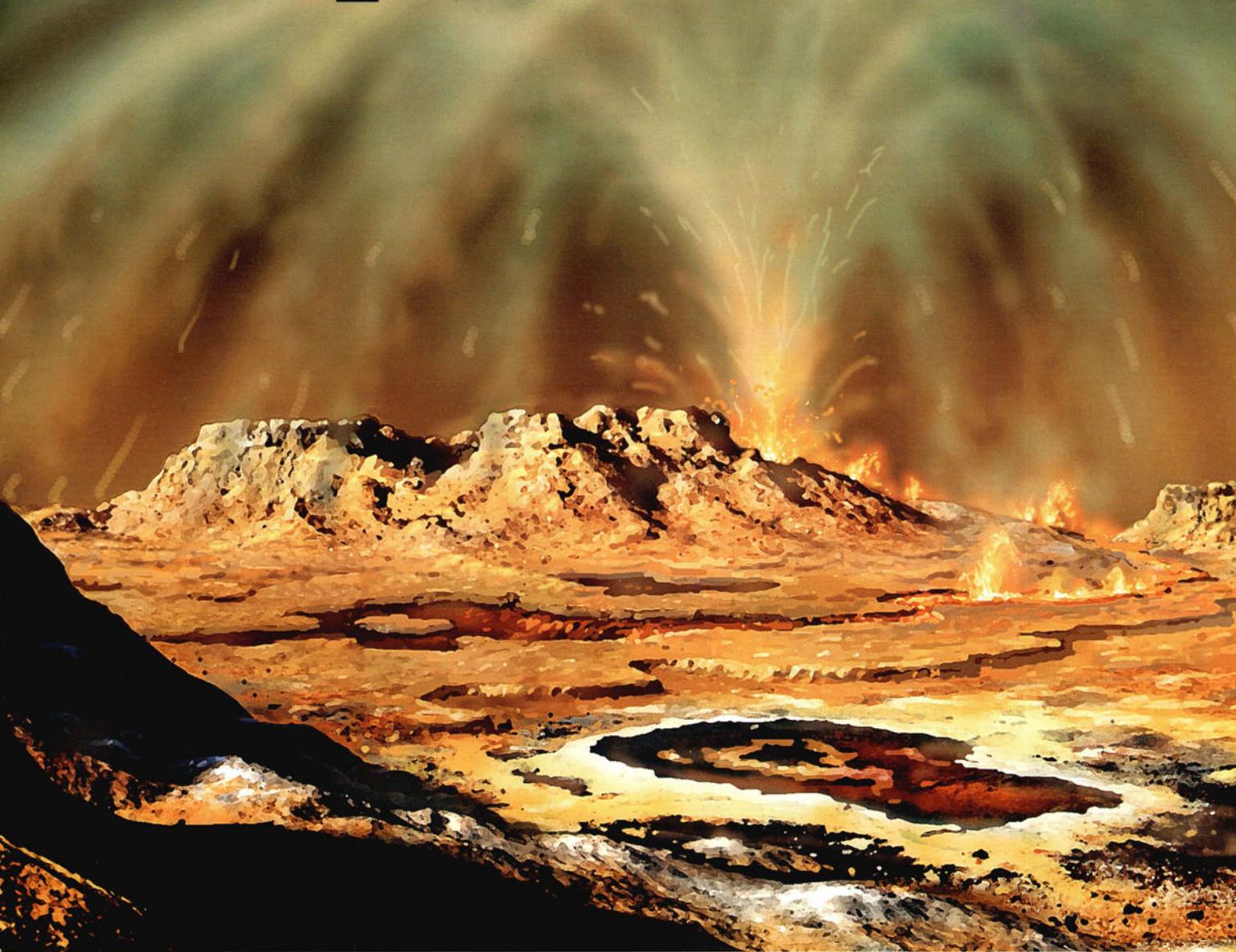
Вулкан, вопреки известным представлениям, оказывается, не всегда бывает огнедышащей горой и находится может не только на Земле. В 2005 году станция Cassini обнаружила действующие вулканы на спутнике Сатурна Энцеладе. Процесс их извержения происходил «непривычным» образом: из «нутра» ледяного объекта на сотни километров вверх выбрасывались фонтаны воды, которая тут же становилась холодным туманом из ледяных кристаллов. И это эффектное зрелище галеко не единственное в Солнечной системе: многие небесные тела выдают свои внутренности — раскаленный базальт, иней сернистого газа, метан с азотом — через поры поверхности. Что же заставляет их это делать?

Первые активные вулканы вне Земли были обнаружены на Ио, одном из четырех так называемых галилеевых спутников Юпитера. Эта честь в 1979 году выпала Линде Морабито, инженеру калифорнийской Лаборатории реактивного движения NASA. Выполняя рутинную работу по изучению снимков Ио, только что полученных с автоматической станции Voyager-1, она совершенно неожиданно нашла действующие вулканы в космосе — сразу два! На одном из снимков Линда увидела серое грибообразное пятно с рас-

плывчатыми границами, нарушавшими линию горизонта, отображавшуюся на остальных фотографиях четкой светлой полосой на фоне темного неба. Внимательно присмотревшись, она увидела на том же снимке еще одно серое пятно, на этот раз уже на границе освещенной и затененной частей спутника — как будто огромная гора «выпирала» с дневной стороны на ночную. Эти образования можно было бы принять за облака, но в данном случае такое предположение не подходило — ведь атмосферы-то нет. Разгадку нашли, когда после

просмотра большого количества снимков обнаружили еще несколько подобных нечетких пятен. Нанеся их на карту, увидели, что всего таких пятен девять и расположены они как раз над яркими оранжевыми кругами на поверхности спутника. Стало ясно, что эти «грибы-зонтики» высотой до 300 км представляют собой газовые фонтаны, бьющие из недр спутника Юпитера, вещество которых, оседая на поверхность, образует яркие оранжевые пятна вокруг вулканических жерл. Первые два вулкана назвали Пеле и Локи в честь гавайской

# МИРОВ



богини вулканов и скандинавского бога огня.

Более подробное исследование вулканов на Ио было выполнено с помощью американской автоматической станции Galileo, которая была искусственным спутником Юпитера с 1995 по 2003 год. Эта станция даже пролетела однажды внутри газового фонтана высотой 500 км — выбросом вулкана Тор, названного в честь скандинавского бога громавержца. Дремавший до 2001 года вулкан неожиданно проснулся, и станции Galileo удалось провести химический анализ выбрасываемого веще-

ства. Оказалось, что это — иней сернистого газа (диоксида серы), состоящий из нанохлопьев, всего по 15—20 молекул  $\text{SO}_2$  в каждом. Вообще на этом удивительном небесном теле обнаружено несколько сотен активных вулканов, среди которых есть крупные, интенсивно фонтанирующие и совсем небольшие с раскаленной лавой на дне кратеров.

Наибольшее количество действующих вулканов на Ио обнаружила геолог Розали Лопес, уроженка Бразилии, работающая в той же Лаборатории реактивного движения NASA, где

были открыты самые первые вулканы на этом спутнике. Она выявила 71 вулкан и за это достижение внесена в 2006 году в «Книгу рекордов Гиннеса» как человек, открывший наибольшее количество действующих вулканов — столько не открыл никто даже на Земле.

Вся поверхность планетоида покрыта разноцветными лавовыми потоками, многие из которых окрашены в желто-оранжевые тона благодаря примесям серы. Это небесное тело расположено в пять раз дальше от Солнца, чем Земля, поэтому на его поверхности довольно хо-

**Выброс сернистого газа на дневной стороне Ио. Такие фонтаны достигают 500 км в высоту. Поскольку на этом спутнике Юпитера нет атмосферы, то небо там всегда черное и звезды видны даже днем**

лодно. В наиболее теплой, экваториальной области температура не поднимается выше  $-50^{\circ}\text{C}$ . На фоне такой холодной поверхности имеется множество теплых и даже горячих участков с температурой от  $0$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ , нагретых в результате вулканической деятельности. В некоторых кратерах наблюдаются лавовые озера с температурой  $+1\ 100^{\circ}\text{C}$ , что указывает на силикатную лаву, то есть не с серой, а с расплавленным каменным материалом, подобным лавам на Земле. Среди вулканов Ио весьма примечателен Прометей, извержение которого длится 20 лет. В греческом мифе Прометей похитил у богов огонь, чтобы дать его людям, а его тезка на Ио неустанно раздает вулканический жар. Крупнейший в Солнечной системе активный поток лавы находится как раз на этом спутнике Юпитера. Он протянулся на  $500$  км от действующего вулкана Амирани, который носит имя грузинского мифологического героя, обучившего людей добывать огонь.

При извержениях на Ио из недр выбрасывается гораздо больше энергии, чем при типичной вулканической деятельности на Земле. Более того, вулкан Локи, например, мощнее, чем все земные вулканы, вместе взятые. Почему же на сравнительно небольшом спутнике (его диаметр —  $3\ 630$  км, это чуть больше, чем у Луны) поддержи-

вается такая бурная вулканическая активность? Разгадка кроется не в самой Ио, а в ее соседке Юпитере — крупнейшей планете Солнечной системы — и эллиптичности ее орбиты. Этот гигант, масса которого в  $318$  раз больше, чем у Земли, постоянно сжимает спутник в объятиях своего гравитационного поля, оказывая на него столь сильное приливное воздействие, что поверхность Ио прогибается с амплитудой  $500$  м. Подобный процесс, но с меньшей интенсивностью происходит и на Земле. Это — приливы и отливы в океанах под влиянием лунной и солнечной гравитации. В недрах же Ио за счет такой сильной приливной деформации выделяется огромная энергия, расплавляющая образующее ее вещество. Считается, что слой расплавленного вещества начинается уже на глубине  $20$  км от поверхности и, возможно, охватывает все недра до самого центра. Если бы орбита спутника была точно круговой, то приливные силы давно бы «повернули» его строго одной стороной к Юпитеру, и нагрев прекратился бы. При движении по эллипсу такое абсолютно синхронное вращение невозможно, и Ио, двигаясь по орбите, вынуждена чуть-чуть поворачиваться к гиганту то одним, то другим боком. Изменение расстояния до Юпитера также приводит к периодическому сжатию этого спутника.

**Наиболее вероятная модель работы «холодных гейзеров» на Энцеладе**



## СНЕГОПАД В КОСМОСЕ

Имя гиганта Энцелада, погребенного, согласно древнегреческой мифологии, под вулканом Этна на средиземноморском острове Сицилия, получил в свое время один из спутников Сатурна. Оно оказалось пророческим, поскольку как раз на данном спутнике позже обнаружилась сильно развитая вулканическая активность. Энцелад стал четвертым небесным телом после Земли, Ио и Тритона, на котором нашли действующие вулканы. Произошло это совсем недавно, в прошлом году, хотя предположения высказывались еще за четверть века до открытия, когда в 1981 году Энцелад был впервые детально заснят с борта автоматической станции Voyager-2. Оказалось, что его поверхность — самая светлая среди всех планет и спутников Солнечной системы, она отражает практически весь падающий на нее свет, то есть Энцелад выглядит белее свежеевыпавшего снега. На этом основании решили, что поверхность спутника время от времени покрывается свежими отложениями снега или льда. Такое возможно лишь путем выброса какого-то вещества из недр, поскольку атмосферы у этого небольшого спутника нет, ведь его диаметр всего лишь  $500$  км (в семь раз меньше, чем у Луны) и удержать газовую оболочку вокруг себя он не может.



Крупнейший лавовый поток в Солнечной системе (темная полоса справа) простирается по поверхности Ио на 500 км. Этот поток в 50 раз длиннее самого большого активного потока Земли, вытекающего из кратера Килауза на Гавайских островах



Энцелад находится в 10 раз дальше от Солнца, чем Земля, поэтому там весьма холодно: средняя температура его поверхности  $-200^{\circ}\text{C}$ . Несмотря на столь сильный холод, на этом спутнике бьют водяные фонтаны. Они вырываются время от времени из недр Энцелада через расположенные в районе южного полюса протяженные трещины и поднимаются на высоту до 500 км. Эти несколько трещин в ледяном панцире, температура вдоль которых на несколько десятков градусов выше, чем на окружающих равнинах, получили прозвище «тигровые полосы» — настолько они ровные и параллельные друг другу. Впервые выбросы вещества на этом небесном теле были сфотографированы в 2005 году европейско-американской автоматической станцией Cassini, которая стала первым искусственным спутником Сатурна. Двигаясь по сильно вытянутой орбите вокруг планеты-гиганта, она время от времени пролетает рядом с одним из его многочисленных спутников, после чего передает на Землю их подробные фотографии. В июле 2005 года Cassini пролетела прямо через облако выброшенного вещества. Было установлено наличие паров воды и мельчайших кристаллов льда. Частицы, из которых состоят «фонтаны» над южным полюсом Энцелада, име-

## Вулканизм вызывают перепады давления и температуры внутри космического тела

ют в среднем размер 10 микрон. Это крошечные кристаллики водного инея, застывшего при выбросе воды из недр в холодное космическое пространство. Наиболее крупные из них падают на поверхность спутника, постоянно обновляя ее, поэтому она чрезвычайно светлая. Мелкие частички, размером 3 микрона и меньше, навсегда остаются в космосе, распределяясь вдоль орбиты Энцелада. Они образуют самое внешнее из колец Сатурна, называемое кольцом Е. Это очень слабо заметное кольцо, хотя оно и наиболее широкое, простирающееся на 1 миллион километров.

Открытие геологической активности на Энцеладе озадачило планетологов, поскольку спутник слишком мал, чтобы сохранять внутри себя разогретые недра. Источник энергии для поддержания геологической активности на этом небольшом небесном теле остается пока загадкой. Предполагается, что сильное гравитационное воздействие Сатурна, а также соседних крупных спутников приводит к приливной «раскачке» и нагреву недр Энцелада. Однако неясно, почему разогреву подвергается только область вокруг южного полюса, которая

в целом на  $10^{\circ}$  теплее, нежели районы вблизи экватора Энцелада. А узкие участки вдоль «тигровых полос» теплее еще на  $70^{\circ}$ . Неясно также, почему не подвержен такому разогреву расположенный еще ближе к Сатурну спутник Мимас, диаметр которого — 400 км — лишь немного меньше, чем у Энцелада. Некоторые исследователи сравнивают последнего с гигантской кометой, выбрасывающей порции вещества, которое рассеивается в пространстве. Правда, есть большая разница в источниках энергии — у комет это внешний нагрев Солнцем, а у Энцелада происходит разогрев вещества в недрах самого спутника. Выбросы водяных фонтанов напоминают в определенной степени деятельность гейзеров на Земле с той лишь разницей, что у земных аналогов температура весьма высокая, а гейзеры Энцелада — холодные, разбрасывающие кристаллики льда.

### «СОЛНЕЧНЫЕ» ГЕЙЗЕРЫ

Наиболее удаленная от Солнца вулканическая активность наблюдается на Тритоне — крупнейшем из спутников Нептуна. Он расположен в 30 раз дальше от Солнца, чем Земля, поэтому ►

Трещины на поверхности Энцелада — это своеобразные вулканические жерла, из которых время от времени вырываются фонтаны водяного пара и мельчайших ледяных кристалликов. Температура в районе трещин хотя и довольно холодная (около  $-130^{\circ}\text{C}$ ), но все же на  $70^{\circ}$  теплее, чем поверхности Энцелада в целом

достоверные сведения о нем появились сравнительно недавно — в 1989 году, когда до Тритона добралась автоматическая станция Voyager-2, впервые сделавшая подробные снимки этого спутника. Главной неожиданностью, которую преподнес Тритон, оказалась вулканическая активность. Его диаметр 2 700 км, то есть лишь 0,75 от лунного. До полета Voyager-2 никто даже и не предполагал, что на этом небольшом и холодном спутнике возможна какая-то тектоническая активность. Ее объяснили необычным химическим составом Тритона, одного из самых холодных тел в Солнечной системе — температура там чрезвычайно низкая, около  $-240^{\circ}\text{C}$ . Поэтому лед и иней, покрывающие его поверхность, состоят из твердого азота. В столь холодных условиях вулканизм имеет весьма необычную природу. На снимках были обнаружены газовые гейзеры — темные столбы азота, идущие строго вертикально до высоты 8 км, где под действием ветра они наклоняются и вытягиваются параллельно поверхности Тритона «хвостами» длиной до

150 км. Было обнаружено десять действующих гейзеров.

Активность газовых гейзеров вызывается солнечным нагревом, расплавляющим азотный лед на некоторой глубине, в местах, где присутствуют водный лед и метановые соединения, имеющие темный цвет. Небольшого избыточного давления газовой смеси, возникающей в глубинном слое при его нагреве, оказывается вполне достаточно, чтобы выбросить газовый фонтан высоко в разреженную атмосферу Тритона (давление там в 60 000 раз меньше, чем на поверхности Земли). Слабый ветер, дующий в верхних слоях атмосферы, уносит выброшенный материал, окрашенный в темный цвет примесью метановых соединений, на сотни километров в сторону. Постепенно этот материал осаждается на почти белоснежную поверхность Тритона, образуя на ней темную полосу с «размытыми» краями. Такими полосами покрыта вся южная часть Тритона, сфотографированная Voyager-2, что указывает на многочисленность азотных гейзеров.

## ПРИМАНКА ДЛЯ ФЛАМИНГО

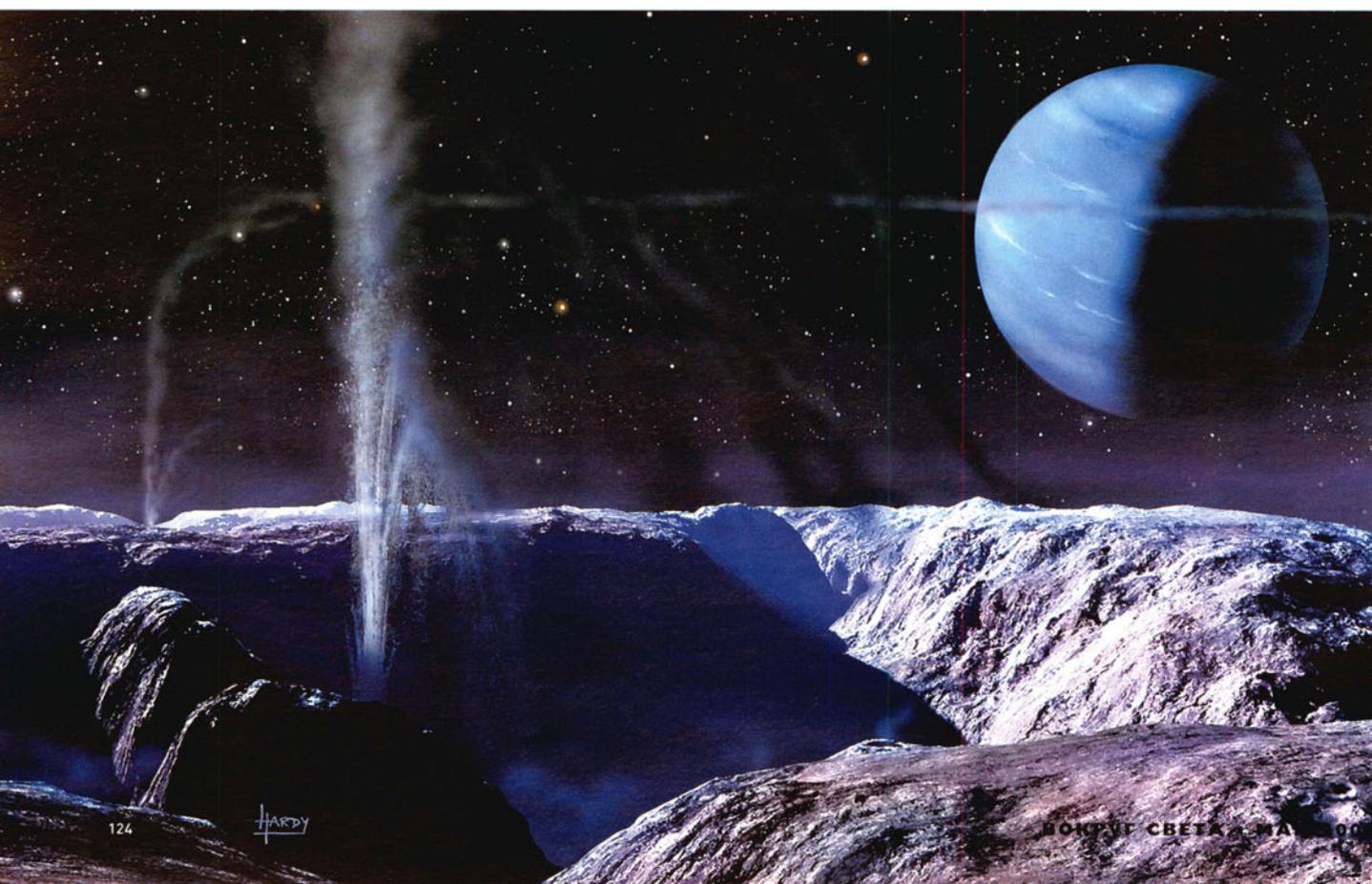
На Земле вулканизм и магматические процессы играли большую роль в течение всей геологической истории. Они не затихли и до сих пор. В настоящее время на земном шаре имеется около 600 действующих вулканов и примерно 10% населения живет в опасной близости от них.

Большинство вулканов Земли расположено вокруг Тихого океана, образуя так называемое «огненное кольцо». Единственный материк, на котором нет действующих вулканов, — Австралия.

Один из самых необычных земных вулканов — Ол-Дойнью-Ленгаи — находится в Африке. Его белая шапка возвышается над равниной Серенгети в северной Танзании. Вулкан расположен чуть южнее экватора в зоне Великих Африканских рифтов — крупных разломов земной коры. Однако белое вещество на Ол-Дойнью-Ленгаи не снег, а кальцинированная сода. Откуда же сода появилась на макушке вулкана? Как ни странно, она изверглась из недр в виде лавы. Это единственный на Земле действующий вулкан, лава которого содержит много соединений ▶

Газовые гейзеры на Тритоне, спутнике Нептуна, выбрасывают струи азота на высоту до 8 км. Темные углеводородные соединения, захваченные ими из под слоя азотного льда, оседают на поверхность Тритона в виде удлиненных пятен

## Источником вулканической активности может быть даже солнечное тепло





ЕГОР ШАРОВ

## После извержения может появиться не только гора и впадина, но и озеро

Около 7 тысяч лет назад вершина вулкана Мазама после сильного извержения просела на 1 км, образовав огромный кратер — кальдеру. Сейчас в этом кратере озеро Кратер-Лейк и маленький вулкан (штат Орегон, США)

Единственный в мире карбонатитный вулкан Ол-Дойню-Ленгаи в Танзании. Большой кратер заполнен белой содовой лавой и маленькими вулканическими конусами

натрия, кальция и калия, но очень мало кремниевых минералов, преобладающих в обычной вулканической лаве. Из-за уникального химического состава температура этой лавы при извержении составляет чуть более +500°C, что вдвое ниже, чем у «обычной» базальтовой лавы. Поэтому лавя Ол-Дойню-Ленгаи считается «холодной» и в светлое время суток выглядит черной, и только ночью становится заметно, что она раскалена и имеет темно-вишневый цвет. Охладившись и затвердев, она становится черной, но ненадолго. Атмосферная влага вступает с ней в химическую реакцию, в результате которой свежая лавя вскоре приобретает серый, а затем и белый цвет. Кратер диаметром 400 метров до краев заполнен этим белым веществом, которое местами переливается на склоны горы, а оттуда смывается дождями в реку, текущую в обширное мелководное озеро Натрон, расположенное на дне рифтовой долины. Постоянное пополнение этого озера вулканической содой привело к тому, что вода в нем превратилась в концентриро-

ванный содовый раствор. Несмотря на то что подобная водная среда весьма неблагоприятна для живых существ, это озеро постоянно покрыто розовым ковром, состоящим из сотен тысяч малых фламинго. Они поглощают за день десятки тонн спирулины — крохотной синезеленой водоросли, содержащей бета-каротин, который и придает птицам характерную ярко-розовую окраску.

### ГНИЛЫЕ ГОРЫ

Грязевые вулканы представляют собой невысокие конусы с отверстием на вершине, из которого периодически извергается черно-синяя или серая жидкая грязь и выделяются различные газы, главным образом горючий метан. На земном шаре немало районов, где действуют такие небольшие вулканчики. Кашеобразная серая грязь поднимается на поверхность пузырьками нефтяных газов. За это грязевые вулканы прозвали гнилыми горами, горелыми могилами, «плеваками». Обычно эти вулканы невелики и имеют в поперечнике несколько десятков метров. Нередко в результате очередного извержения на месте грязевулканической сопки образуется озеро, а затем вместо озера вновь возникает горка из грязи.

Более распространены грязевые вулканы холодного типа, расположенные в нефтегазоносных районах. Их движущей силой является горючий газ метан, углекислый газ, сероводород, иногда окись углерода и азот. Вулканические грязи содержат бром, йод, бор, что позволяет использовать их в лечебных целях. Их температура летом составляет +12 — +20°C.

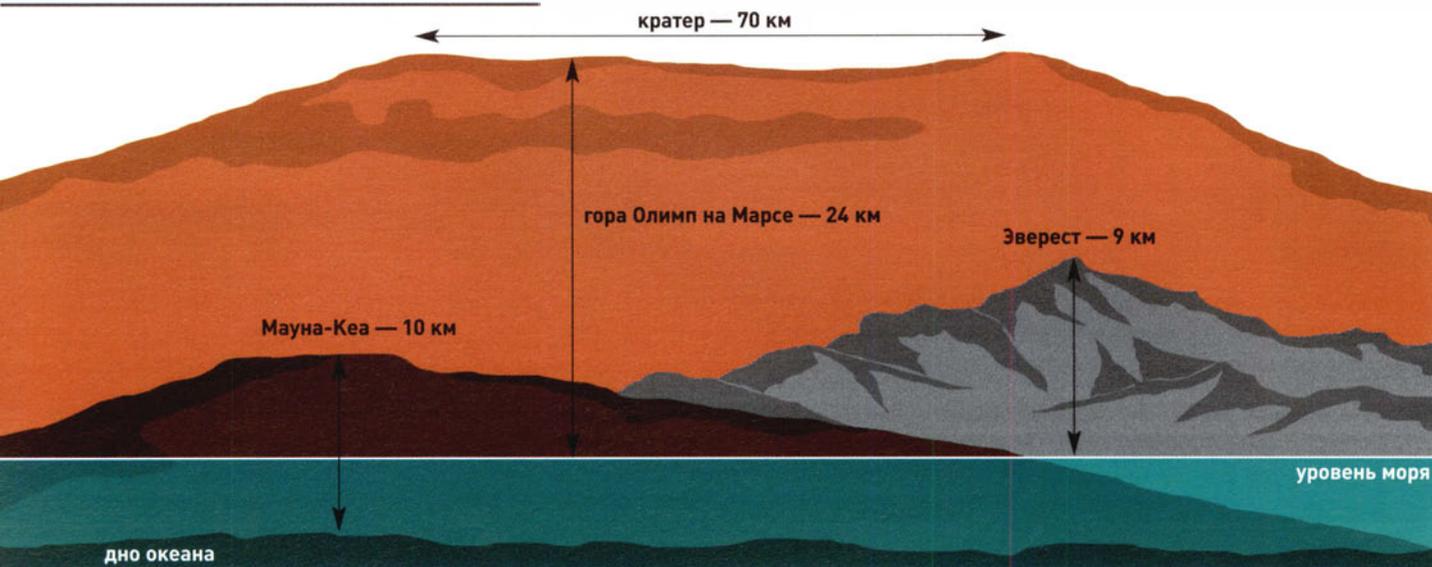
Иногда в таких районах наблюдается выделение газов, поднимающихся по трещинам в земной коре без образования вулканического холмика, причем нередко происходит самовозгорание газа.

### ГИДРОВУЛКАНЫ — ОАЗИСЫ СРЕДИ ПУСТЫНИ

Странные песчаные холмы с родниками на вершинах, обнаруженные академиком Владимиром Афанасьевичем Обручевым еще в начале XX века во время геологической экспедиции по пустыням Средней Азии, до сих пор остаются малоизвестными. Эти совершенно удивительные образования называют гидровулканами или песчаными вулканами. Чуть ли не единственное место на Земле, где имеются действующие гидровулканы, — это пустынные районы Казахстана севернее Аральского моря и реки Сырдарья. Особенно много их на восточном краю Приаральских Каракумов во впадине Мынбулак («Тысяча родников»). Здесь конусовидные холмы из водонасыщенных песков-пльвунов достигают в диаметре 1 км и имеют до 30 метров в высоту.

Активное вещество гидровулканов (своего рода «лава») — это артезианская вода с температурой не выше +17°C. «Работа» таких вулканов вызвана напором грунтовых вод, в то время как обычные вулканы существуют за счет происходящих в глубине земли геологических процессов, сопровождающихся выделением тепла и локальным повышением давления магмы. Поэтому вода в гейзерах — горячая, а в гидровулканах она всегда холодная. Гидровулканизм не сопровождается никакими термальными процессами или выбросами газов, характерными для грязевых вулканов. ►

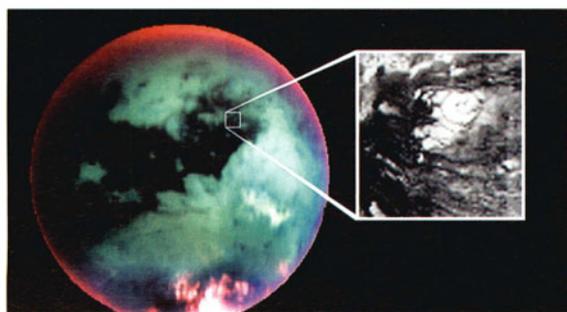




## Вполне возможно, что на Венере еще живы многочисленные вулканы



NASA IX31



SFU/EAST NEWS 1661

Гора Олимп на Марсе — крупнейший вулкан в Солнечной системе. Его высота от подножия до кратера более 24 км, а поперечник составляет 600 км. Марсианские облака обычно располагаются на 8 км ниже вершины этого гиганта

Вулкан Тортола на Титане, спутнике Сатурна. Предполагается, что вытекающая из него лава — это водно-аммиачный лед

В Ирландии известны песчаные вулканы, сформированные песками-плывунами, выдавленными на поверхность под тяжестью вышележащих слоев глинистых пород. Многочисленные, но небольшие, поперечником до 10 метров, песчаные вулканы неоднократно возникали при землетрясениях к югу от Сан-Франциско в Калифорнии, и песчаная «лава» заливала клубничные плантации. Несколько лет назад множество песчаных вулканов диаметром 100 м и высотой 5 м, названные холмами Давида, обнаружили даже на дне Атлантического океана западнее Британских островов на глубине 1 км.

### ГДЕ ВУЛКАНЫ СПЯТ

Базальтовый вулканизм характерен для всех планетных тел земной группы — Земли, Венеры, Марса, Меркурия и Луны, но проявлялся он на каждом по-разному. В настоящее время активная вулканическая деятельность ни на одной из этих планет, кроме Земли, не обнаружена. Весьма вероятно ее наличие лишь на Венере.

Венера, которая по размеру почти такая же большая, как наша Земля, является рекорсменом по количеству вулканов — их там более 1 600. Это больше, чем на какой-либо из планет. Кроме того, на Венере несколько сот тысяч мелких вулканических холмов. Более 75% ее поверхности — равнины, покрытые базальтовыми лавами, сходными с теми, что образуют дно океанов на Земле. Их химический состав был неоднократно определен при посадках советских автоматических станций «Венера» и «Вега». Достоверных следов современной геологической активности на Венере не обнаружено. Считается, что за последние 500 миллионов лет там не произошло сколько-нибудь существенных изменений. В возможной активности «подозревается» только один из крупнейших вулканов планеты — гора Маат, поперечник которой 400 км, а высота — 11 км.

На Марсе расположен крупнейший известный вулкан Солнечной системы — гора

Олимп. Диаметр его основания — 600 км, а высота — 24 км. На Красной планете имеется с десяток довольно крупных вулканов, намного превышающих по размерам своих земных собратьев. Образованию этих вулканов-гигантов способствовали пониженная сила тяжести на Марсе и высокая газонасыщенность базальтовой лавы. Вулканическая активность на Марсе закончилась примерно 10 миллионов лет назад. Несмотря на то что сейчас эта планета весьма интенсивно исследуется с помощью автоматических станций, свежих следов вулканической активности на Марсе не обнаружено.

Титан, крупнейший из спутников Сатурна (его диаметр в 1,5 раза больше, чем у Луны), изучен пока недостаточно подробно, тем не менее на нем обнаружены довольно крупные куполовидные возвышенности диаметром от 10 до 30 км, окруженные потоками, напоминающими застывшую лаву. Это, безусловно, вулканы, но вот лава, окружающая их, должна быть весьма своеобразной. В холодных условиях Титана при температуре поверхности  $-180^{\circ}\text{C}$  роль лавы могли играть, скорее всего, вода либо смесь воды с аммиаком, которая замерзает при весьма низкой температуре — около  $-100^{\circ}\text{C}$ . Исследования Титана, продолжающиеся сейчас с европейско-американской автоматической станции Cassini, должны пролить свет на то, насколько активной была вулканическая деятельность в этом мире холода и продолжится ли она до сих пор. ●