



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 14 • № 1 • 2018 С. 1 – 14

<https://doi.org/10.18372/2411-6602.14.01>

Оглядова стаття

УДК 551.21

Особенности вулканов на разных телах Солнечной системы

А.П. Видьмаченко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03143, г. Киев, ул. Академика Заболотного, 27

В статье рассмотрены особенности действия вулканов на телах Солнечной системы. Поверхность практически всех тел изменяется под воздействием различных внешних и внутренних факторов. Извержения вулканов также создают разные структуры рельефа, новые типы пород и ландшафты. Они различаются по химическому составу, термическому состоянию и истории внутреннего строения. Различают три основных типа вулканов. Базальтовые вулканы появляются в местах, где на тектонических плитах образуется новый материал. В таких местах расплавленная порода по трещинам поднимается из мантии. Лава раздвигает тектонические плиты и медленно растекается по поверхности. До полного остывания лава преодолевает значительные расстояния. Андезитовые вулканы расположены там, где эти плиты разрушаются при погружении друг под друга. В результате таких процессов очень вязкая лава поднимается через разломы в плитах и со взрывом вырывается на поверхность. К третьему типу вулканов относят криовулканы, или ледяные вулканы. В них вместо расплавленной породы извергаются летучие вещества. К ним относят ледяные расплавы из воды, аммиака, метана, которые называют криомагма. Для проявления криовулканической деятельности эти вещества должны быть жидкостью или паром. После таких извержений под воздействием низкой окружающей температуры криомагма конденсируется до твердой фазы. Криовулканы могут образовываться на объектах Солнечной системы с обилием воды. Такими телами являются карликовые планеты, ледяные спутники, объекты пояса Койпера и т.п. К ним относятся Плутон, Церера, Титан, Энцелад, Европа, Тритон и т.п. Потенциальными источниками энергии для плавления льдов для криовулканов является радиоактивный распад в скальном ядре объекта и приливное трение, а также полупрозрачные отложения замороженных материалов, которые могут создавать подповерхностный парниковый эффект с возможностью накопления требуемого тепла и последующим взрывным извержением. Кометные ядра также можно считать телами Солнечной системы с наличием криовулканизма.

Ключевые слова: вулкан; планеты земного типа; карликовые планеты; спутники планет; ядра комет; типы вулканов.

1. ВВЕДЕНИЕ. ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ ВУЛКАНОВ

Кора многих космических тел находится в движении вследствие смещения крупномасштабных тектонических плит, или же участков коры небольшого размера. Участки коры дрейфуют по магматическим течениям, и их взаимодействие приводит к выливаю расплавленной магмы через трещины в коре, называемое извержением вулкана. Вулканизм — это один из способов высвобождения внутреннего тепла. Извержения вулканов создают разные формы рельефа, новые типы пород и ландшафты, которые различаются по химическому составу, термическому состоянию и истории внутреннего строения [19, 20, 30, 41]. Существует два основных типа вулканов [21]. Базальтовые появляются там, где образуется новый материал тектонических плит; андезитовые располагаются там, где эти плиты разрушаются. В местах, где образуется новая кора, расплавленная порода из мантии поднимается по трещинам и, раздвигая тектонические плиты, медленно растекается по поверхности. Расплавленная лава извергается из таких базальтовых вулканов и до полного остывания преодолевает значительные расстояния. Андезитовые вулканы действуют в местах, где тектонические плиты погружаются друг под друга и разрушаются. В результате таких процессов расплавленная текучая магма поднимается через разломы в плитах и вырывается на поверхность. Извержения таких вулканов с очень вязкой лавой обычно сопровождаются взрывом. К третьему типу вулканов относят криовулканы, или ледяные вулканы. Этот тип вулкана вместо расплавленной породы извергает летучие вещества. К ним относятся ледяно-вулканические расплавы из воды, аммиака, метана, называемые криомагма. Для проявления криовулканической деятельности эти вещества обычно должны быть жидкостями или паром, и могут образовывать выбросы (плюмы). После таких извержений под воздействием низкой окружающей температуры криомагма конденсируется до твердой фазы. Криовулканы могут образовываться на объектах Солнечной системы с обилием воды: на карликовых планетах, ледяных спутниках и т.п. К ним относятся Плутон, Церера, Титан, Энцелад, Европа, Тритон и т.п. Потенциальными источниками энергии для плавления льдов при производстве криовулканов является радиоактивный распад в скальном ядре объекта, приливное трение и полупрозрачные отложения замороженных материалов, которые могут создавать подповерхностный парниковый эффект с возможностью накопления требуемого тепла и последующим взрывным извержением [40].

Видьмаченко Анатолий Петрович; ✉ vida@mao.kiev.ua

2. ВУЛКАНЫ НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОГО ТИПА

Меркурий. Основные данные о планете получены космическими аппаратами (КА) «Маринер» и «Мессенджер». Они указали на наличие на поверхности Меркурия вулканической активности [5]. Перепад высот над средним уровнем поверхности составляет от +4,5 км до -5,4 км на дне бассейна Рахманинов. Он окружен двойным кольцом гор, которые могут быть одними из последних вулканических проявлений на планете [13, 15]. Самая заметная деталь поверхности Меркурия — равнина Жары вблизи «горячей» долготы планеты (рис. 1, слева). Эта лавовая равнина заполняет огромный ударный кратер с размером 1525×1315 км. Высота вала вокруг равнины местами превышает 2 км. Большинство проявлений вулканизма на Меркурии связано со спокойным вытеканием лавы и произошло на ранней стадии геологической истории 4,1–3,5 млрд. лет назад. Но есть и свидетельства взрывного вулканизма. Причем такой взрывной вулканизм имел место от 3,9 млрд. лет до менее 1 млрд. лет назад. То есть взрывной вулканизм был значительно долговечнее, чем крупномасштабное образование лавовых равнин [17]. На поверхности также обнаружено более пятидесяти пирокластических (со смесью высокотемпературных вулканических газов, пепла и камней) истечений из низкопрофильных щитовых вулканов. Преимущественное их количество найдено в ударных кратерах. Пирокластическая активность на Меркурии имела место на протяжении очень длительного периода времени. Северные широты Меркурия покрыты гладкими равнинами, которые являются результатом базальтовых извержений лавы. Считают, что этот тип вулканизма закончился на Меркурии тогда, когда толщина его коры увеличилась настолько, что лава уже не смогла выливаться на поверхность планеты. Вероятно, это могло произойти в первые 700–800 млн. лет его истории. А все последующие изменения рельефа — обусловлены ударами внешних космических тел о поверхность планеты [5]. Например, депрессия на юго-западном краю бассейна Жары состоит, по меньшей мере, из девяти перекрывающихся вулканических кальдер, каждая из которых имеет до 8 км в диаметре. Такой сложный вулкан может свидетельствовать о существенной миграции участка активного извержения из определенного локального источника под поверхностью на глубине не менее 50 км. А затем эта магма отводилась обратно вниз под поверхность. Возраст такого вулканического комплекса составляет ≈ 1 млрд лет. Миссия «Messenger» впервые показала убедительные доказательства еще и взрывного вулканизма на Меркурии.

Венера. Очень детальное картографирование поверхности Венеры с разрешением лучше 300 м с 1989 по 1994 г. выполнил КА «Магеллан». На планете было обнаружено более 1600 основных вулканов, много

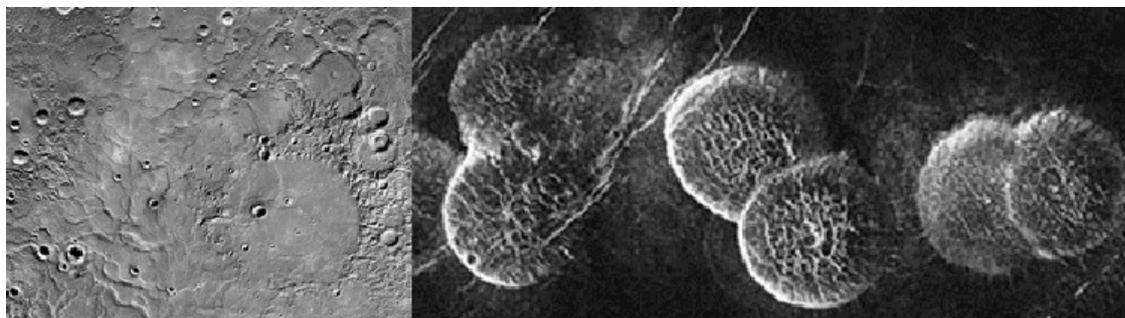


Рис. 1. Слева — Равнина Жары вблизи «горячей» долготы планеты; справа — цепочка блинных куполов к востоку от Альфы Регио

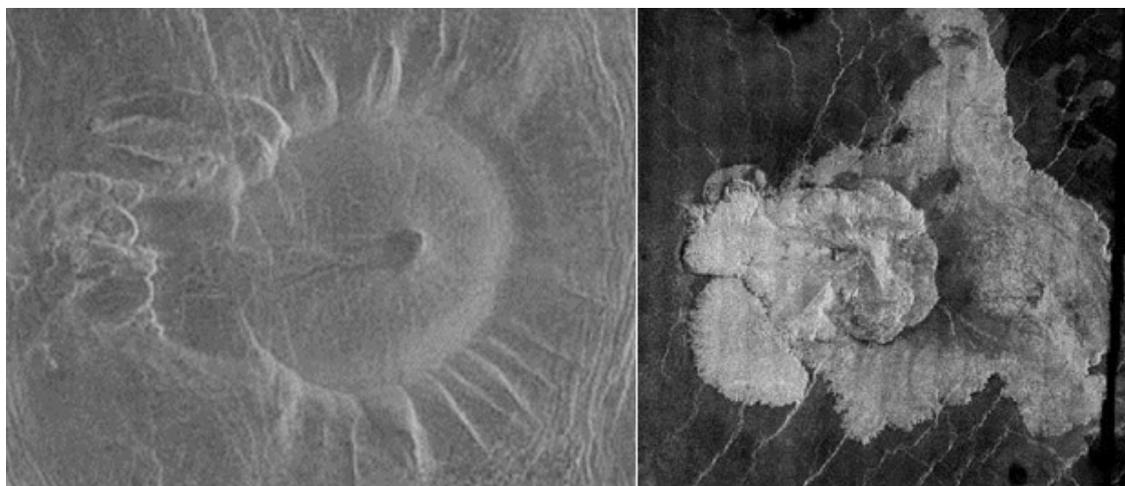


Рис. 2. Слева — «тик-подобные» структуры; справа — веерообразные и ленточные потоки

меньших и очень много мелких вулканических образований, а также около 250 большемерных структур — арахноидов, вероятно, вулканического происхождения. Поверхностный слой имеет сравнительно тонкую кору; она ослаблена высокой температурой и поэтому слабо препятствует прорыву лавы на поверхность [44]. Считают, что общее число вулканов в различных формах может быть больше 100 000. А вот ударные кратеры — это довольно редкий элемент венерианского пейзажа: их меньше 1000. Это указывает на то, что поверхность Венеры относительно молодая и ей вряд ли больше 500 млн. лет [40]. Почти весь вулканизм на Венере, кажется, связан с потоками жидкой лавы. И пока там не обнаружено даже признаков взрывных извержений. Это может отражать то, что водяного пара очень мало на Венере, тогда как на Земле он является основным газом, порождающим взрывы лавы.

Большинство вулканов на Венере — щитовые. Они образовались из очень вязкой лавы и делятся на три типа: большинство — это «блинные» купола (рис. 1, справа), «тик-подобные» структуры (рис. 2, слева) и несколько вулканов с веерообразными или ленточными потоками. Поскольку большинство базальтовых лав очень жидкие и довольно тонкие, то эти вулканы, похоже, не образованы базальтом; скорее всего, они могут быть богатыми кварцем или гранитными лавами. Каждый купол имеет ширину ≈ 25 км, высоту до 750 м; большинство куполов имеют небольшое центральное углубление и множество трещин. Некоторые из куполов перекрываются, указывая на серию извержений.

Тиковые структуры показывают узор, подобный блинным куполам. Как и блинные купола, большинство «клещей» находятся на низинных равнинах, близкими к одному или нескольким блинным куполам. Поэтому считают, что многие тики являются модифицированными куполами. Центральный круглый «корпус» составляет около 35 км в ширину и длину до 66 км; они в основном плоские, часто имеют центральный кратер и окружены массивом коротких радиальных гребней. Веерообразные и ленточные потоки встречаются довольно редко; большинство из них расположены в южных равнинах, не показывая каких-либо четких тенденций. На рис. 2 справа показан один из таких вулканов, который находится в области Aino Planitia. Его центральный купол имеет ≈ 100 км в поперечнике и высоту до 1 км. Вокруг купола наблюдается несколько веерообразных потоков очень вязких лав толщиной от 120 до 540 м.

На рис. 3 слева показан вулкан Сапас Монс, находящийся недалеко от экватора на краю широкой возвышенности Атла Регио протяженностью ≈ 1000 км и высотой до 3 км. Высота вулкана составляет 1,5 км и имеет около 120 км в поперечнике. Стороны необычного вулкана Венеры с двойной вершиной покрыты множеством перекрывающихся лавовых потоков. Большинство из них возникли на вулканических склонах раньше образования двойной вершины. В правом верхнем углу лавовые потоки охватывают два ударных кратера (показано стрелками). Самые молодые потоки лавы довольно яркие. Большая часть поверхности Венеры — молодая, и геологические процессы все еще продолжают создание планеты (рис. 3, справа). Так, данные с КА «Venus Express» показали три вулкана, извергавшиеся всего лишь около 250 тыс. лет назад. А в 2014 г. получены первые прямые доказательства продолжающегося вулканизма, поскольку удалось зарегистрировать инфракрасные вспышки по краям рифтовой зоны Ганис Часма, вблизи щитового вулкана Маат Монс. Эти вспышки регистрировались в течение нескольких дней в 2008 и 2009 гг. Полагают, что они были вызваны либо горячими газами, либо лавой, высвобождаемой при вулканических извержениях.

На **Марсе** пока не найдены признаки современной тектоники плит. Но особенности магнитного поля планеты, места расположения некоторых вулканов и форма долины Маринер подтверждают, что в прошлом на Марсе происходило движение литосферных плит [33, 34]. Возможно, что на планете и сейчас имеется слабая тектоническая активность. Более половины его поверхности покрыто ударными кратерами. Но именно на этой планете расположены самые высокие вулканы (рис. 4) в Солнечной системе [31, 36]. Там обнаружено около 20 вулканов, и только 5 из них являются гигантскими щитовыми. Также имеется ряд других вулканических особенностей: большие вулканические конусы, вулканические равнины, необычные структуры вулканов и т.д. Вулканизм присутствует, в основном, только в трех регионах. Основные скопления вулканов и лавы находятся в регионе Тарсис; в Элизиуме расположен кластер еще из трех вулканов и несколько образчиков находятся вблизи бассейна Эллада [27]. Тарсис — это обширная вулканическая равнина протяженностью 2000 км, достигающая высоты 10 км над средним уровнем. Именно на ней находятся три крупных щитовых вулкана — Арсия, Павлина и Аскрийский; на ее краю расположена высочайшая на Марсе гора Олимп с высотой 27 км и несколько менее крупных вулканов. Кальдера Олимпа имеет ширину 70 км и глубину до 3 км. Возвышенность Тарсис пересечена множеством тектонических разломов, часто очень сложных и протяженных. Крупнейший из них — долины Маринер — тянется в широтном направлении почти на 4000 км, достигая ширины 600 км и глубины 7–10 км. В регионах Тарсис, Элизиум и вокруг них встречаются вулканические равнины с обильными потоками лавы в виде «языков» на сотни километров. Второй тип вулканических ребристых равнин характеризуется обильными морщинами. Элизиум — возвышенность до 6 км над средним уровнем, с тремя вулканами — Геката, Элизий и Альбор. Изображения возможных конусов к востоку от региона Элизиум, полученные с высоким пространственным разрешением, показывают кольца, возможно вызванные

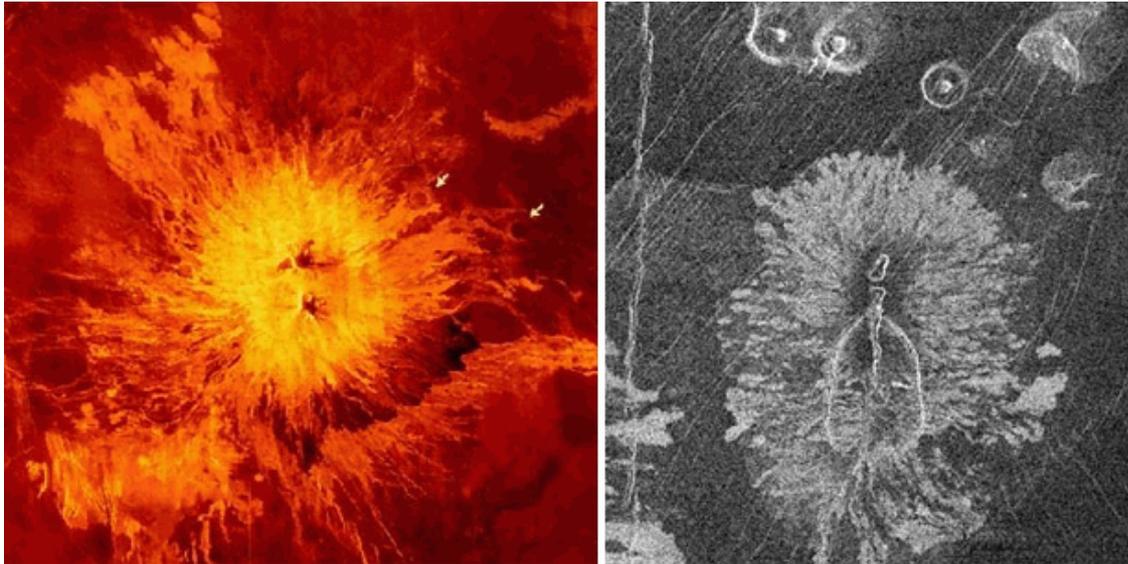


Рис. 3. Слева — вулкан Сапас Монс; справа — вулкан Анемоне

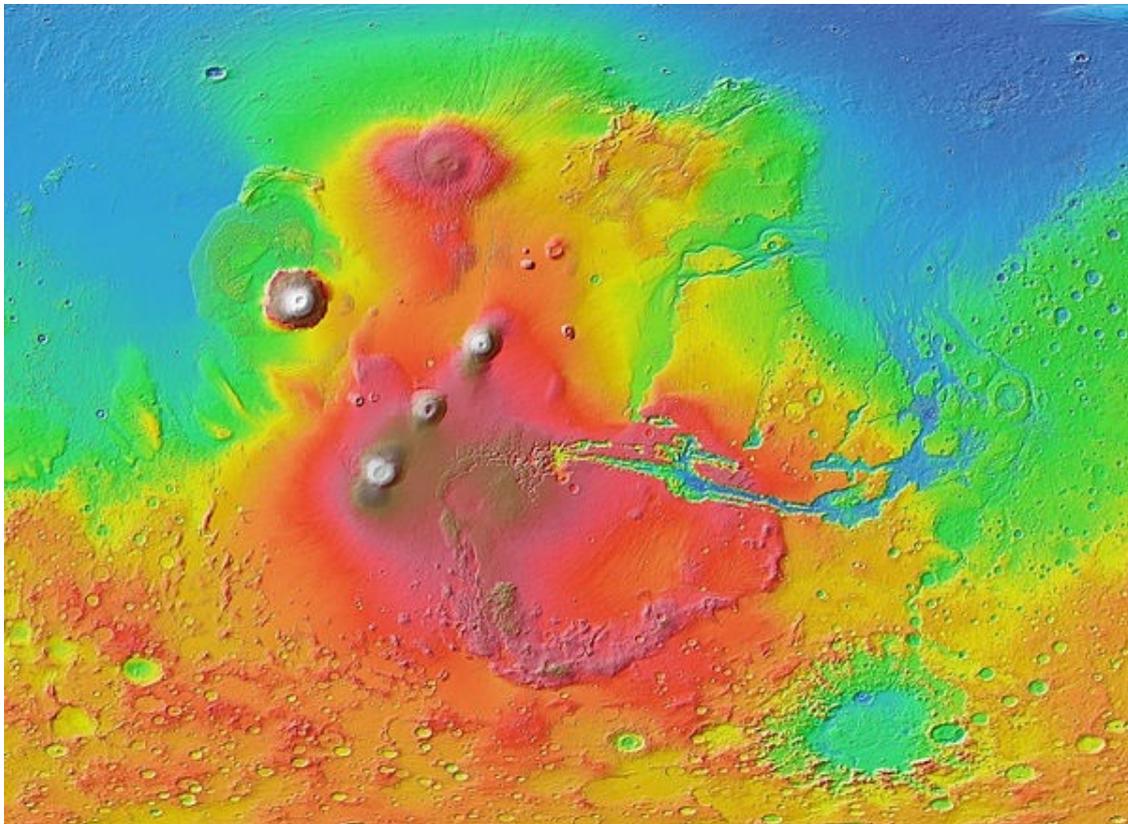


Рис. 4. Самые высокие вулканы в регионе Тарсис [46]

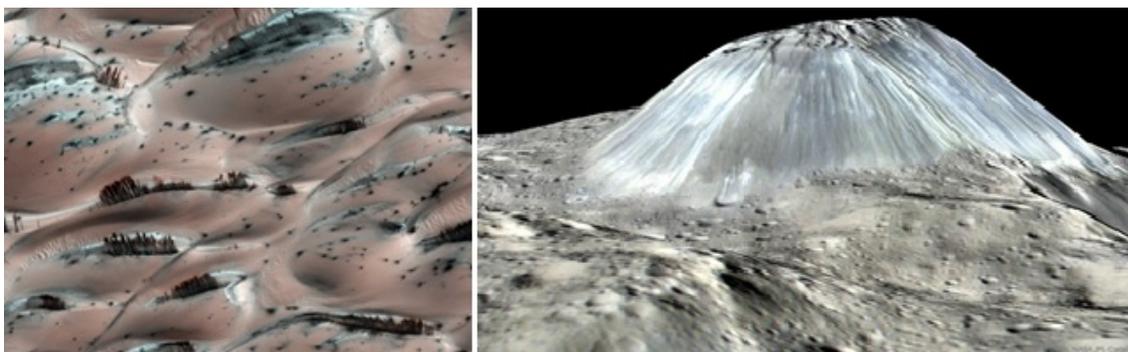


Рис. 5. Слева — гейзеры на Марсе; справа — криовулкан Ахуна Монс на Церере

извержением воды во время сильного взрыва пара, когда лава перемещалась по богатой водяным льдом поверхности. Возраст марсианских вулканических особенностей варьируются от менее 500 млн. до более 3,7 млрд. лет. На горных плато и равнинах вулканизм прекратился ≈ 3 млрд. лет назад, а некоторые из небольших щитовых и конусных вулканов имеют возраст около 2 млрд. лет. Гигантские вулканы — еще моложе: они действовали между 1 и 2 млрд. лет назад, а самые молодые потоки лавы на горе Олимп вообще имеют возраст от 20 до 200 млн. лет. Это указывает на то, что планета была вулканически активной на протяжении всей своей истории; полагают, что она, вероятно, активна и сегодня [20]. Ведь КА «Марс Экспресс» сфотографировал лавовые потоки, которые образовались в последние несколько десятков миллионов лет, что предполагает относительно недавнюю геологическую деятельность. Считают, что тройка главных марсианских вулканов не потухла навечно, а лишь «уснула» на время. Поскольку в ходе вулканических извержений в атмосферу выбрасываются значительные массы парниковых газов (в первую очередь CO_2), то если марсианские вулканы когда-нибудь проснутся и если их извержения будут достаточно интенсивными, планета сможет существенно потеплеть.

На переданных КА «Mars Odyssey» снимках были обнаружены мощные гейзеры, которые возле южной полярной шапки Марса бьют на высоту нескольких десятков метров каждую марсианскую весну (рис. 5, слева). К лету гейзеры исчезают. Выбрасываемая ими субстанция образует характерные следы длиной в десятки метров и причудливо изгибаются под действием ветра. Такие темные области — это результат постепенного таяния полярной шапки. Поскольку температура замерзания углекислого газа — около -127°C , то зимой из-за сильных ветров образовавшийся слой сухого льда может занести песком, а новый лед будет образовываться уже поверх песчаного слоя. Такое может повторяться несколько раз за зиму несколькими слоями толщиной до метра. Весной марсианский воздух прогревается и замерзший углекислый газ начинает сублимировать — прямо переходить из твердого состояния в газ, без перехода через фазу жидкости. Там, где растаял верхний слой сухого льда, обнажается более темный слой, и солнечный свет в этом месте ускоряет таяние более глубоких слоев. А там, где первым начал таять тонкий слой льда в глубине, может образоваться газопылевой гейзер, прорывающий верхние слои и выбрасывающий песок на поверхность [40]. Эти процессы очень активные и приводят к образованию трещин во льду, которые идут по гребням дюн. Выброшенный из них песок кажется темнее, чем окружающая поверхность, и под собственным весом или с помощью ветра он скатывается вниз по склону.

3. ВУЛКАНЫ НА КАРЛИКОВЫХ ПЛАНЕТАХ

В 2006 г. в номенклатуре тел Солнечной системы введено новое понятие: карликовые планеты [22]. Согласно определению XXVI Генеральной Ассамблеи Международного астрономического союза, карликовая планета — это небесное тело, которое само обращается по орбите вокруг Солнца, имеет достаточную массу для поддержания близкой к сферической формы под действием сил гравитации и не является спутником планеты. Так, Плутон был обнаружен Клайдом Томбо в 1930 г. и первоначально считался девятой планетой от Солнца [23, 32]. В 2005 г. в рассеянном диске Пояса Койпера была обнаружена Эрида, которая на 27% массивнее Плутона. Но с близкого расстояния с помощью космических аппаратов детальная информация была получена только для двух карликовых планет — Цереры и Плутона, и на поверхности обоих обнаружены криовулканические образования. Наблюдательные проявления прошедшего на объекте пояса Койпера (ОПК) Кваоар потепления заставили предположить, что в прошлом он также проявлял признаки криовулканизма. Криовулканы могут выделять смешанную с аммиаком воду, тающую только при 180 К, и поэтому образуют вытекающую из вулкана чрезвычайно холодную жидкость. Необходимую для такой активности энергию может обеспечить, например, радиоактивный распад в скальном ядре объекта. ОПК — одни из самых холодных объектов в Солнечной системе, они часто рассматриваются как геологически мертвые. Но многие из них, включая Харон, Кваоар и 2003 EL61, показывают четкие доказательства присутствия кристаллического водяного льда на своей поверхности, давая поглощения в линии при $\lambda 1,65$ мкм. На Хароне и Кваоаре также наблюдалась абсорбция при $\lambda 2,21$ мкм, вызванная гидратами аммиака. Космические лучи и солнечный ультрафиолет превращают кристаллический лед на поверхности далеких ОПК в аморфный в течение менее 10^5 лет, а гидраты аммиака будут уничтожены космическими лучами за время до 10^7 лет. Присутствие кристаллического водяного льда и гидратов аммиака на ОПК дают доказательства возможного присутствия криовулканизма [35]. Но поскольку выход жидкой воды на поверхность далеких объектов пояса Койпера возможен даже при температуре около 40–60 К, то возникает вопрос о внутренней тепловой эволюции этих объектов. Модельные расчеты для объектов размером с Харон и больше указывают на реальность выхода жидкой воды на поверхность с образованием там криовулкана [4]. Для этого требуется, чтобы в конкретном ОПК на некоторой глубине под воздействием радиоактивного распада некая водно-аммиачная консистенция поддерживалась в жидком состоянии. Некоторые модели предсказывают, что жидкая вода с указанными примесями может существовать даже на телах с размером > 550 км. Будучи первоначально сильно нагретой радиоактивным распадом, при температуре $T = 50$ К смесь в соотношении $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O} \approx 0,1$ будет очень медленно охлаждаться. И в результате получен вывод, что

до настоящего времени на Хароне и Кваоре может существовать подповерхностный жидкий резервуар водно-аммиачного океана (до 33% аммиака по массе) глубиной около 20 км. Именно эта жидкость может выходить на поверхность, обеспечивая объяснение существования на поверхностях этих тел кристаллического водяного льда и гидратированного аммиака.

Наблюдения с космическим кораблем «Рассвет» уточнили массу **Цереры** в $9,3 \cdot 10^{20}$ кг. Она достаточно массивна, чтобы придать ей почти сферическую равновесную форму. Изображения Цереры с близкого расстояния показали, что ее поверхность сильно кратерирована. Хотя, вероятно, из-за прошлых геологических процессов, кратеров большого размера оказалось не так много, как ожидалось. Неожиданно большое количество кратеров Цереры имеют центральные углубления или центральные пики, возможно, из-за бывших криовулканических процессов. Но на ее поверхности есть одна выделяющаяся гора Ахуна Монс (Ahuna Mons) высотой ≈ 4 км с основанием около 18 км [9]. Ахуна Монс, скорее всего, является криовулканом и имеет несколько кратеров (рис. 5, справа). Это предполагает максимальный возраст такого образования не более нескольких сотен миллионов лет. Компьютерное моделирование показало, что первоначально на Церере были и другие криовулканы, которые теперь «расползлись» из-за вязкой релаксации [24–26]. Есть свидетельства того, что ледяная мантия Цереры когда-то имела водный океан под поверхностью.

14.07.2015 космический аппарат «New Horizons» стал первым космическим аппаратом, который пролетел мимо **Плутона**. Он также оказался телом с геологически активной поверхностью, с органическими молекулами и горными хребтами. Для этого необходимо участие мощных эндогенных процессов. В 2017 г. изучение геологии Харона подтвердило, что ледяная тектоника плит работает также на самом большом спутнике Плутона. Равнины на поверхности Плутона на более чем 98% состоят из азотного льда со следами метана и окиси углерода [23]; азот и окись углерода наиболее распространены в Регионе Томбо и Равнине Спутника, а горы состоят из водяного льда. Для объяснения отсутствия кратеров старше 10 млн. лет предлагают несколько механизмов, включая наличие криовулканизма, конвекцию и вязкую релаксацию, то есть те процессы, которые могли бы стереть более древнюю топографию. Но поверхность Плутона весьма разнообразна, с большими различиями по яркости и цвету; цвет варьируется от черного угля до темно-оранжевого и даже белого. Равнина Спутник представляет собой бассейн, шириной до 1000 км, разделенный на многоугольные конвективные ячейки, имеющие очевидные признаки ледниковых потоков и отсутствие кратеров (рис. 6). Это указывает на то, что ее поверхность имеет возраст 140–270 тыс. лет.

Два возможных криовулкана, названные Райт Монс (рис. 7, слева) и Пикард Монс, были идентифицированы на снимках региона к югу от Равнины Спутника возле южного полюса. Оба имеют основание более 150 км и высоту не менее 4 км; это самые высокие пики, известные на Плуtone в настоящее время. Они мало кратерированы и, следовательно, геологически молодые; характеризуются большой депрессией на вершинах. Предполагают, что Плутон имеет толстую водно-ледяную литосферу. Это может говорить о наличии активной тектоники, хотя ее механизмы остаются неизвестными.

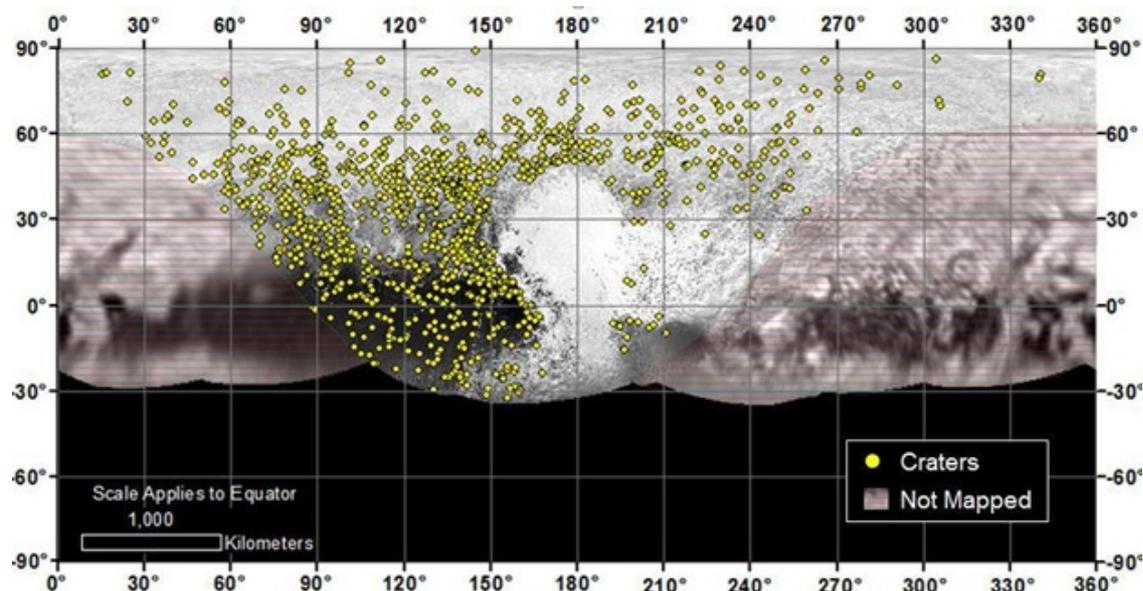


Рис. 6. Распределение более 1000 кратеров разного возраста на Плуtone и их отсутствие на равнине Спутник

4. ВУЛКАНЫ НА СПУТНИКАХ ПЛАНЕТ

Ио — внутренний спутник Юпитера, имеющий примерно размер и плотность Луны. Он является одним из самых вулканически активных тел в Солнечной системе (рис. 7, справа). Подсчеты показывают, что вся его поверхность покрывается шаром выброшенного материала в 100 м за каждый 1 млн. лет. По этой же причине на его поверхности практически отсутствуют ударные кратеры.

На спутнике Ио наблюдаются три основных типа вулканов: внутripатерные, потоковые и со взрывными извержениями. Они различаются по длительности, энергии, яркости в инфракрасных лучах, типу потока лавы в пределах вулканических кратеров. При наблюдениях с КА «Вояджер», «Галилео», «Кассини» и «Новые горизонты» на Ио обнаружено более 150 действующих вулканов [29, 42]. Его эксцентричная орбита приводит к небольшому различию в гравитационном влиянии Юпитера на спутник в перигелии и афелии. Вследствие изменения формы это вызывает внутренний приливный нагрев и образование подповерхностных лавовых линз. Такого типа вулканизм Ио привел к образованию свыше 400 вулканических центров. Лавовые потоки на его поверхности имеют десятки и даже сотни километров в длину. Они имеют преимущественно базальтовый состав, похожий на лаву на Земле в щитовых вулканах; температуру извержения в 1600 К можно объяснить извержением высокотемпературной силикатной лавы. В результате присутствия значительного количества сернистых материалов в коре Ио и на его поверхности, при некоторых извержениях в космос извергается сера, газообразный диоксид серы и пирокластический материал, также создавая крупные вулканические шлейфы. Этот материал окрашивает окружающий ландшафт в красный, черный и белый цвет, и обеспечивает материал для неоднородной атмосферы Ио и обширной магнитосферы Юпитера.

Извержения внутри патеры происходят в вулканических депрессиях, которые обычно имеют плоские основания, ограниченные крутыми стенами. Некоторые патеры демонстрируют множественные обрушения, похожие на кальдеры вулканов Земли и Марса. Но они отличаются тем, что эти углубления на Ио обычно не лежат на пике щитовых вулканов и они большие, со средним диаметром ≈ 40 км и глубиной патеры, как правило, превышающей 1 км. Самая большая вулканическая депрессия на Ио — Локи Патера — имеет 202 км в поперечнике. Этот тип извержения может иметь форму потоков лавы, распространяющихся по подложке патер, или лавовых озер. Такие лавовые озера на Ио представляют собой впадины, частично заполненные расплавленной лавой, покрытой тонкой затвердевшей корой; озера напрямую связаны с расположенной ниже линзой магмы. Со временем, поскольку затвердевшая лава плотнее, чем нижележащая магма, эта корка может нагреваться, увеличивая тепловое излучение вулкана.

Для некоторых лавовых озер, как у Пеле, это происходит непрерывно, делая его одним из самых ярких излучателей тепла в ближнем инфракрасном диапазоне на Ио. На других озерах, например в Локи Патера, это может происходить эпизодически; в Прометее и Амирани основные потоки производятся созданием небольших прорывов лавы поверх старых потоков. Такая лава извергается с устойчивой скоростью, и извержения с преобладанием потока могут длиться годами и даже десятилетиями. Но наиболее выраженными на Ио являются взрывные извержения; они характеризуются короткой продолжительностью.

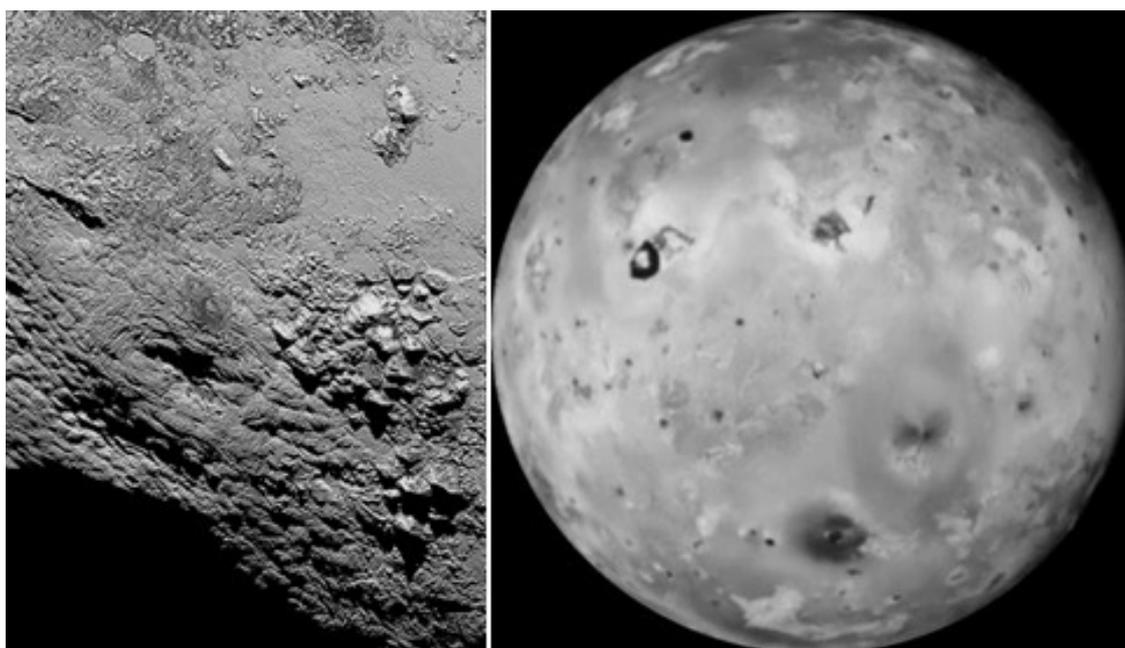


Рис. 7. Слева — криовулкан Райт Монс [47]. Справа — вулканы на Ио [48]

стью (от нескольких недель до месяцев), быстрым началом, большими объемными скоростями потока и высокой тепловой эмиссией. Извержения с преобладанием взрыва происходят тогда, когда магма из глубины частично расплавленной мантии Ио достигает поверхности через трещину и приводит к эффективным проявлениям лавовых фонтанов (например, Тваштар). Извержение из патыры Пиллана, диаметром около 70 км, показало, что температура лавы здесь превышает 2000 К. Отметим, что температура лавы самого жаркого вулкана на Земле составляет около 1500 К.

На южном полюсе спутника Юпитера **Европы** с помощью космического телескопа им. Хаббла в 2012–2014 гг. также были обнаружены гейзерные выбросы [11, 12, 37, 38]. Собранные данные показывают наличие сотен выбрасываемых из подледного океана гейзеров высотой до 200 км. Спектроскопия показала, что эти облака состоят преимущественно из воды [8, 10, 14]. Предварительные оценки показывают, что гейзеры Европы проявляют активность только афелии орбиты, то есть на максимальном удалении от планеты (рис. 8, слева).

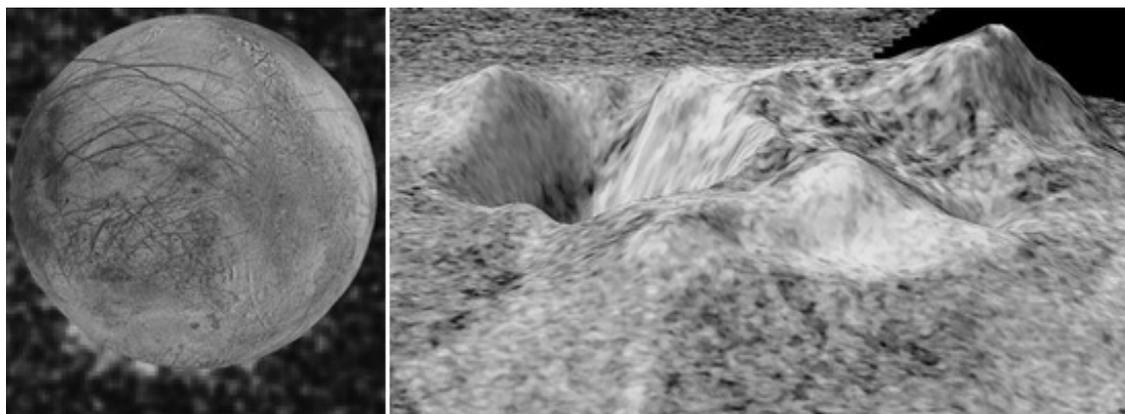


Рис. 8. Слева — изображения спутника Европы [49]; справа — гора Дум и патера Сотра — основные криовулканические образования на Титане; топография по вертикали увеличена в 10 раз [50]

Радиолокационные изображения поверхности **Титана** показали, что его поверхность является геологически очень сложной [39]. Там обнаружено несколько криовулканических образований [6]. Среди них гора Дум с высотой ≈ 1150 м над средним уровнем поверхности спутника и размером по горизонтали 60–70 км (рис. 8, справа). На радарных снимках эта область выглядит ярче окружающей местности. Возле горы расположена впадина (патера) Сотра; это вытянутое углубление длиной около 30 км и глубиной до 1700 м, а рядом — меньшая впадина глубиной около 500 м. Эти объекты окружены равнинами, уровень которых почти на 300 м ниже среднего уровня поверхности Титана. От горы Дум и патыры Сотра отходит покрытый дюнами «поток» Мохини, длиной около 180 км и шириной от 15 км в начале, до 60 км в конце. Состав криомагмы на Титане до сих пор неизвестен, но ограничения на реологические свойства одного из мощных потоков оцениваются как несовместимые с аммиаком и водой суспензии; считают, что, возможно, такие наблюдательные данные лучше всего объясняются наличием аммиако-водно-метанольной суспензии. Полагают, что криовулканизм, возможно, был доминирующим процессом «шлифовки» поверхности Титана. Радарные изображения показали несколько ударных кратеров на поверхности Титана с размерами от 30 до 440 км. Эти кратеры кажутся относительно молодыми. Но многие из них демонстрируют обширную эрозию, показывая некоторые признаки изменения, разрушения, не имеют центральных пиков и обладают гладкой поверхностью между ободами, возможно, из-за повторяющегося извержения криовулканической лавы. Полагают, что воздействие различных геологических процессов является одной из причин относительного дефицита кратеров Титана; определенную роль также играет атмосферная эрозия. Самая высокая гора на Титане расположена в районе Митрим Монтеc с высотой 3337 м. Большинство высоких вершин Титана найдено вблизи его экватора. Считается, что они образованы столкновением тектонических плит, где криолава от нисходящей плиты поднимается до поверхности. Одним из возможных механизмов их формирования являются приливные силы от Сатурна, или же энергия, выделяющаяся при распаде радиоактивных элементов в мантии.

Энцелад — шестой по величине спутник Сатурна с диаметром около 500 км. Его поверхность в основном покрыта свежим, чистым льдом. Несмотря на небольшие размеры, Энцелад обладает широким набором особенностей на его поверхности. Там есть старые, сильно кратерированные регионы, и молодые, тектонически деформированные участки, которые образовались ≈ 100 млн лет назад. В 2005 г. КА «Кассини» обнаружил богатые водой плюмы, выброшенные из южной полярной области [39]. Эти криовулканы выбрасывают в окружающее пространство около 200 кг в секунду струи водяного пара, других летучих веществ и твердого материала, включая кристаллы хлорида натрия и частицы льда. Во время пролета 12.03.2008 КА «Кассини» через плюмы были выявлены дополнительные химические вещества в шлейфе, включая следовые количества простых углеводородов, таких как метан, пропан, ацетилен и

формальдегид. А пролет через шлейф вблизи южного полюса Энцелада в 2015 г. на расстоянии 48,3 км от поверхности позволил обнаружить еще и молекулярный водород. Было выявлено более 100 гейзеров. Часть водяного пара падает на поверхность в виде «снега», а остальное вещество ускользает и составляет большую часть материала в Е кольцо Сатурна. Наблюдения гейзеров и малое количество ударных кратеров в южной полярной области показывают, что Энцелад в настоящее время является геологически активным. Такая активность вызвана тем, что Энцелад находится в орбитальном резонансе с Дионой, и это возбуждает его приливные силы. В южной полярной области обнаружено несколько параллельных Y- и V-образных выступов и долин. Форма, ориентация и расположение этих признаков показывают, что они вызваны изменениями формы Энцелада. Плюмы примерно в четыре раза ярче в момент, когда Энцелад находится в точке его орбиты при наибольшем удалении от Сатурна, по сравнению с наименьшим расстоянием.

Тритон — самый большой естественный спутник планеты Нептун. Это единственный большой спутник в Солнечной системе, вращающийся в противоположном направлении от вращения его планеты. Из-за его ретроградной орбиты и подобного Плутону состава Тритон можно считать захваченной из пояса Койпера карликовой планетой. Покрытая прозрачным слоем замороженного азота поверхность спутника — относительно молодая с несколькими очевидными ударными кратерами, а геологическая история проявляется в сложных кривовулканических и тектонических породах. Тритон имеет среднюю плотность 2,061 г/см³, поэтому почти на треть может состоять из находящегося в его коре и мантии водяного льда [39], а также из значительного ядра из горной породы и металла. В интерьере Тритона вследствие радиоактивного распада может вырабатываться достаточное количество, тепла необходимого для существования глобального подповерхностного океана и конвекции в нем. Как и у Плутона, кора Тритона состоит на 55% из азотного льда с другими добавками: водного льда 15–35%, замороженного углекислого газа (сухого льда) 10–20%, 0,1% метана, 0,05% окиси углерода, замечены следы аммиачного льда. Тритон имеет необычно высокое альbedo, отражая 60–95% солнечного света. Красноватый цвет Тритона, по-видимому, является результатом наличия метанового льда, который под воздействием ультрафиолетового излучения превращается в толины. Вся поверхность Тритона изрезана сложными долинами и хребтами, вероятно, вследствие тектоники коры и ледяного вулканизма. Подавляющее большинство поверхностных объектов на Тритоне являются результатом внутренних геологических процессов. Большинство из них являются вулканическими и экстремивными по своей природе.

В 1989 г. КА «Вояджер-2» обнаружил несколько гейзероподобных извержений сублимированного газообразного азота и захваченной пыли из-под поверхности Тритона на высоту до 8 км. Все наблюдаемые гейзеры находились в близкой к приполярной части поверхности Тритона между 50° и 57° ю.ш. (рис. 9, слева). Это указывает на то, что солнечное нагревание, хотя и очень слабое на расстоянии Тритона от Солнца, играет решающую роль. Считается, что полупрозрачный слой замерзшего азота над более темным субстратом создает своего рода «твердый парниковый эффект», медленно нагревая и испаряя подземный азот до тех пор, пока достаточное давление газа не приводит к прорыву сквозь кору. Повышение температуры всего на 4 К выше температуры окружающей поверхности в 37 К может приводить к извержениям наблюдаемой высоты. Подсчитано, что каждое извержение гейзера на Тритоне может длиться до года, приводя к сублимации около 100 млн. м³ азотного льда в течение этого времени; захваченная пыль может осаждаться до более 150 км по ветру. На поверхности Тритона обнаружены обширные хребты и долины со сложными узорами, созданными, вероятно, в результате циклов замораживания-оттаивания. Многие, по-видимому, являются тектоническими по своей природе и могут возникнуть в результате разломов.

На **Луне** практически отсутствуют крупные и не обнаружены активные вулканы. Но обширные равнины из базальтовых лав покрывают большую часть ее поверхности. Это связано с тем, что магма слишком плотная и достаточно богатая железом для того, чтобы вызывать тектоническую активность на поверхности спутника. Лунная гравитация составляет только 1/6 земного значения. Это означает, что движущие силы лавового потока на Луне слабее. Очень плоские и гладкие поверхности морей означают, что лунная лава была очень жидкая, и ее поток легко разливался по большой территории. Кроме того, низкая гравитация означает, что взрывное извержение может выбросить лаву дальше, чем на Земле. Поэтому такие извержения на Луне должны распространять лаву далеко в плоском слое, а не выливать конусообразно, как на Земле. Вода практически не воздействует на Луну. Но водяной пар является одним из наиболее распространенных газов в земной лаве, и играет важную роль в развитии извержений на Земле. В частности, без воды взрывные извержения имеют гораздо меньше шансов произойти на Луне. Вместо этого лава плавно выходит на поверхность. Лунные извержения, как правило, происходили на дне очень больших и очень старых кратеров. Поэтому большинство лунных морей имеют почти круглую форму с горными цепями на краях этих бассейнов [28].

Недавно на обратной стороне Луны обнаружили вулканы возрастом в 800 млн. лет. Конусообразные образования расположены между кратерами Комптона и Бельковича (рис. 9, справа). Ширина вулканов

у основания составляет от 800 до 5000 м, а высота — до 6000 м. На склонах вулканов обнаружили наличие радиоактивного тория. На поверхность спутника он, скорее всего, попал во время извержения, когда магма вышла по трещинам из недр Луны и застыла на склонах. Большая часть тория погребена под грудой метеоритной крошки. Тщательный анализ особенностей распределения позволил указать на масштабы и отдельные детали из истории формирования вулкана. Так, выяснилось, что это извержение покрыло площадь около 70 тыс. км², что в пять раз больше, чем уничтожившее Помпеи извержение Везувия. Спектральный анализ почвы на склонах потухших вулканов показал там наличие еще и кремния, наличие которого не характерно для структур поверхности Луны. Да и расположение этих вулканов также необычно. Они располагаются обособленной группой, вдали от остальных лунных вулканов. Кроме того, лава из вулканов должна иметь базальтовую основу, а не кремниевую, как в аномалии Комптона–Бельковича.

Не существует доказательств современной тектоники плит на Луне. Лунные моря в основном находятся на видимой стороне Луны, и менее 2% — на невидимой. Обратная сторона намного выше и кора, как правило, там намного толще. Считается, что движение литосферных плит завершилось там где-то 3,6 млрд. лет назад. Постепенное остывание Луны подогрело оставшиеся геологические процессы еще почти 2,6 млрд. лет, и вулканизм с небольшими потоками мог прекратиться около 1 млрд. лет назад. Сама же активность завершилась еще позже, чем предполагали ранее. Так, собранные лунным орбитальным зондом (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) данные позволили обнаружить образования из магмы с возрастом 100 млн., некоторым 50 млн. и даже 33 млн. лет. На изображениях, полученных с помощью LRO, были найдены небольшие участки, которые являются недавними отложениями базальтовой лавы. Эти топографические аномалии, названные «irregular mare patches» (IMP), содержат и шероховатые, и гладкие поверхности с несколькими кратерами размером не более 20 м, что указывает на их молодость.

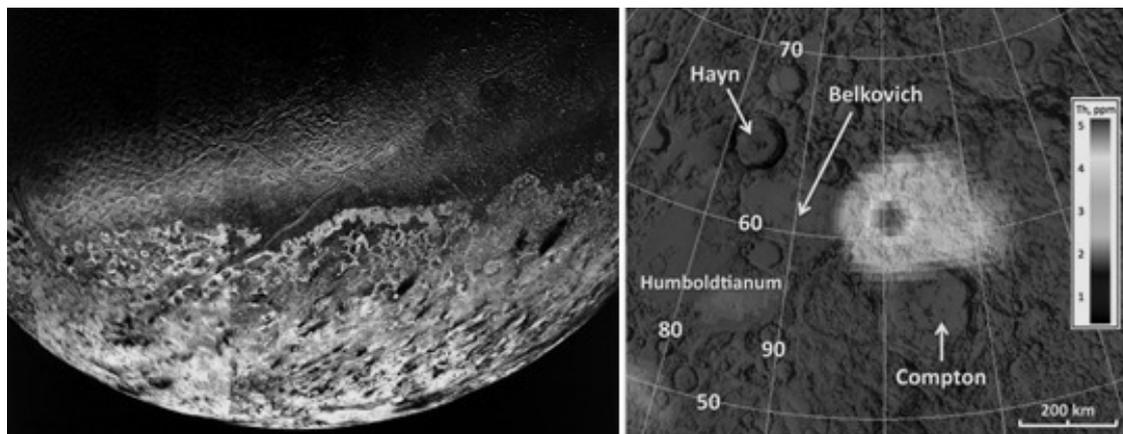


Рис. 9. Слева — изображение Тритона с темными полосами в южной полярной области, которые являются пылевыми отложениями при извержениях азотных гейзеров [51]; справа — точка на поверхности Луны, называется ториевой аномалией Комптона–Бельковича.

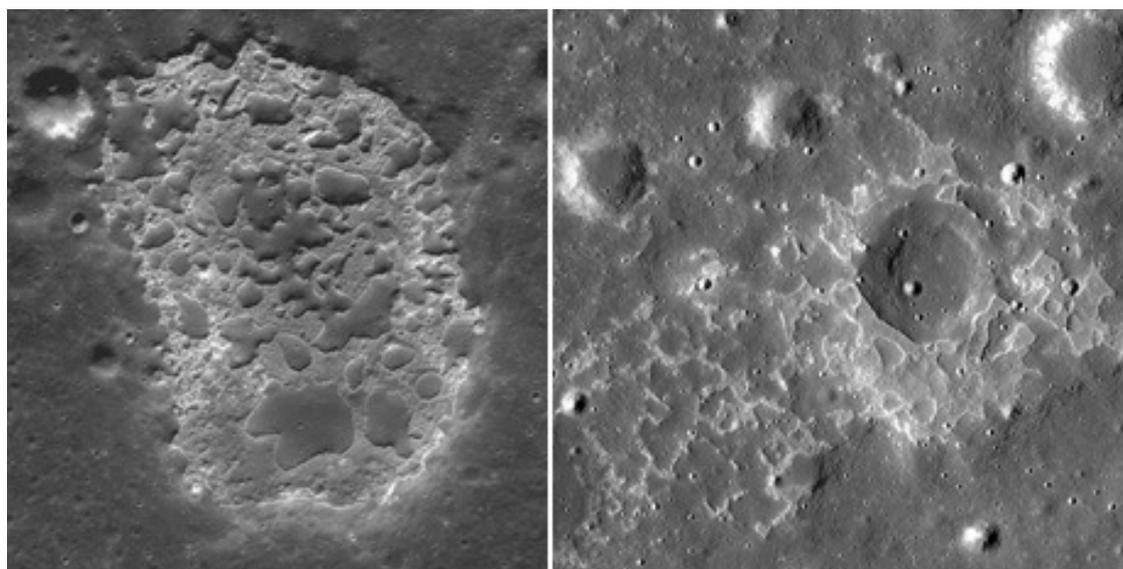


Рис. 10. Слева — кальдера Ина; справа — местность Maskelyne, одна из новых находок, свидетельствующих о «недавней» вулканической активности (фото NASA)

На видимой стороне Луны идентифицировано 70 IMP, самой известной из которых (и первой из обнаруженных) является аномалия «Ипа» (рис. 10, слева), обнаруженная еще «Аполлоном-15». Она имеет 2 км в поперечнике и изначально считается разрушенным вулканическим кратером.

Такое количество аномалий указывает на гораздо более длительный промежуток лунного вулканизма и, возможно, на более высокую температуру лунных недр и сейчас, чем предполагалось ранее. Из-за малого размера (до 500 м в диаметре) их не было видно с Земли. Большое количество и широкое распространение этих участков предполагает, что вулканическая активность была широко распространена не так давно по геологическим меркам. Так, возраст Ипа может быть даже меньше, чем 50 млн. лет. То есть еще 100 млн. лет назад вся поверхность Луны была покрыта активными вулканами, которые постепенно остывали.

5. ВЫБРОСЫ НА ЯДРАХ КОМЕТ — ЭТО ТАКЖЕ СВОЕОБРАЗНЫЕ ВУЛКАНЫ

Распадаясь, отдельные фрагменты кометных ядер и астероидов образуют метеороиды [43, 45], которые, пересекая орбиту Земли, образуют более десятка классических метеорных потоков [1–3, 16, 18]. Ядро кометы 103P/Хартли-2 выбрасывает струи водяного пара, других газов, пыль, снежинки и льдинки, которые образуют хвост кометы. Ось вращения направлена примерно перпендикулярно изображению (рис. 11) и проходит сквозь верхнюю часть, немного ниже ее центра. Вращение создает центробежные силы, которые сформировали удлинненную шейку и стремятся разорвать ядро. Центробежным силам противостоят силы трения и гравитационные силы (взаимное притяжение крупных частей ядра).

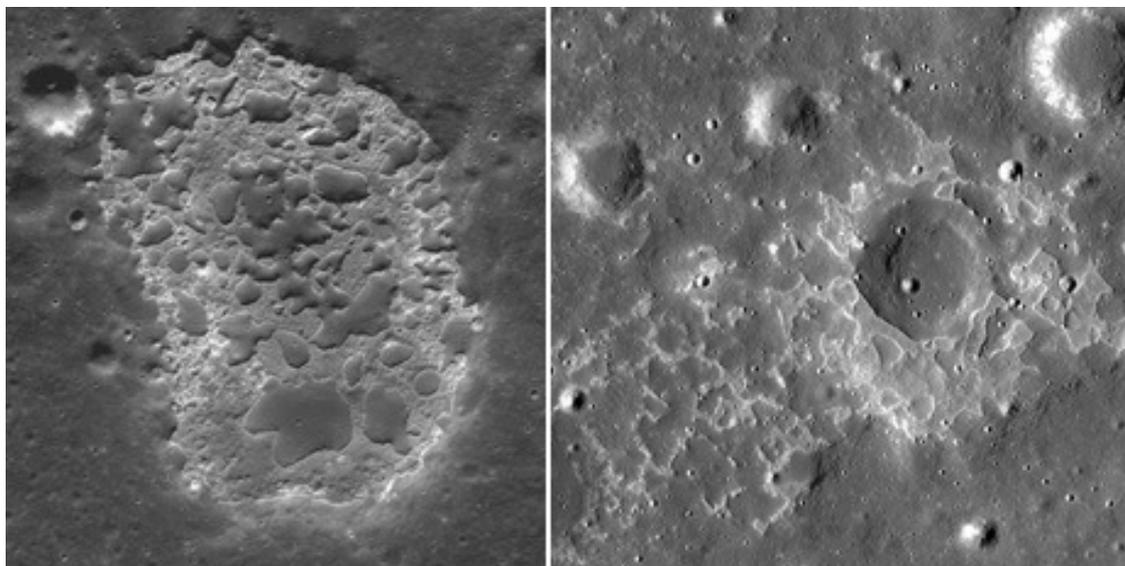


Рис. 11. Слева — ядро кометы 103P/Хартли-2 (4.11.2010); справа — ядро кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (7.07.2015)

Доказательства для долгоживущих источников криовулканизма на ядре кометы 29P/Schwassmann-Wachmann были найдены из изучения времени вспышки и морфологического развития внутренних структур комы. За период 2002–2014 гг. наблюдения дали 64 момента вспышки. Подсчитано, что источники активности обычно сохраняются, по меньшей мере, 10–20 лет, а некоторые из них кажутся дискретными по своей природе, способными к повторному всплеску после одного цикла день–ночь. Выбрасываются некоторые кометные льды, в основном твердые частички CH_4 , находящиеся под давлением > 12 кПа [7].

1. Churyumov K.I., Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Dashkiev G.N. Several twilight bolides over Kiev in 2013–2015 — fragments of comets nuclei // International conference Meteoroids 2016, at the European Space Research and Technology Centre (ESTEC) in Noordwijk, the Netherlands from 6–10 June 2016. Poster 63.
2. Churyumov K.I., Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Steklov E.A. Some results of regular observations of the twilight bolides // In: Book of selected papers and abstracts. Ed. by K.I. Churyumov. — Vinnytsia: FOP “Kostiyk N.P.”, 2014. — P.98–108.
3. Dashkiev G.N., Vidmachenko A.P., Steklov A.F., Steklov E.A., Nevodovskyi P.V. Registration of Traces of Electrophonic Fireballs in the “Unified Churyumov Network” // 49th Lunar and Planetary Science Conference 19–23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.1107.
4. Desch S.J., Neveu M. Differentiation and cryovolcanism on Charon: A view before and after New Horizons // Icarus. — 2017. — Vol. 287. — P.175–186. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.11.037>
5. Jozwiak L.M., Head J.W., Wilson L. Explosive volcanism on Mercury: Analysis of vent and deposit morphology and modes of eruption // Icarus. — 2018. — Vol. 302. — P.191–212. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.11.011>

6. *Lopes R.M.C., Kirk R.L., Mitchell K.L., et al.* Cryovolcanism on Titan: New results from Cassini RADAR and VIMS // *Journal of Geophysical Research: Planets.* — 2013. — Vol. 118, Issue 3. — P.416–435. <https://doi.org/10.1002/jgre.20062>
7. *Miles R.* Discrete sources of cryovolcanism on the nucleus of Comet 29P/Schwassmann–Wachmann and their origin // *Icarus.* — 2016. — Vol. 272. — P.387–413. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.11.011>
8. *Quick L.C., Glaze L.S., Baloga S.M.* Cryovolcanic emplacement of domes on Europa // *Icarus.* — 2017. — Vol. 284. — P.477–488. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.06.029>
9. *Ruesch O., Platz T., Schenk P., et al.* Cryovolcanism on Ceres // *Science.* — 2016. — Vol. 353, Issue 6303. — id.aaf4286. <https://doi.org/10.1126/science.aaf4286>
10. *Shavlovskiy V.I., Vidmachenko A.P.* Spectrophotometry and surface geology of the Galilean satellites of Jupiter Europe // In: Book “Near-Earth Astronomy 2015”. Abstracts of IX International conference Near-Earth Astronomy, Terskol, August 31 — September 5, 2015. — Nalchik: Publishing KBSC RAS, 2015. — P.25–26.
11. *Sparks W.B., McGrath M., Schmidt B., Bergeron E., Hand K., Spencer J., Cracraft M., Deustua S.* Evidence of Plumes on Europa from far-ultraviolet observations with HST // *American Astronomical Society.* — 2018. — AAS Meeting #231, id.#106.03.
12. *Sparks W.B., Schmidt B.E., McGrath M.A., Hand K.P., Spencer J.R., Cracraft M., Deustua S.* Active Cryovolcanism on Europa? // *The Astrophysical Journal Letters.* — 2017. — Vol. 839, Issue 2. — id.L18. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa67f8>
13. *Steklov A.F., Vidmachenko A.P.* Areas for Comfortable Human Habitation on the Mercury // *Mercury: Current and Future Science of the Innermost Planet, Proceedings of the conference held May 1–3, 2018.* — Columbia, Maryland. LPI Contribution No. 2047, id.6015.
14. *Steklov A.F., Vidmachenko A.P.* Possibility of accommodation in a satellite Europe // XX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Uman, Ukraine, May 23–24, 2018). The program and abstracts. — P.61–63.
15. *Steklov A.F., Vidmachenko A.P.* Zones of comfortable living of habitants on Mercury // XX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Uman, Ukraine, May 23–24, 2018). The program and abstracts. — P.58–60.
16. *Steklov E.A., Steklov A.F., Vidmachenko A.P., Dashkiev G.N.* Observations of Twilight Bolide with Using of “Churyumov Fireball Network” // 48th Lunar and Planetary Science Conference (20–24 March 2017, The Woodlands, Texas). LPI Contribution No. 1964, id.1327.
17. *Thomas R.J., Rothery D.A., Conway S.J., Anand M.* Long-lived explosive volcanism on Mercury // *Geophysical Research Letters.* — 2014. — Vol. 41, No. 17. — P.6084–6092. <https://doi.org/10.1002/2014gl061224>
18. *Vid'machenko A.P., Vashchenko E.P., Ivchenko V.N., Sandakova E.V.* Television Observations of Meteors // *Solar System Research.* — 1977. — Vol. 10, No. 4. — P.194–197.
19. *Vidmachenko A.P.* Activity of processes on the visible surface of planets of Solar system // XVIII International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May 26–27, 2016). The program and abstracts. — P.23–27.
20. *Vidmachenko A.P.* Activity of processes on the visible surfaces of Solar System bodies // *Astronomical School's Report.* — 2016. — Vol. 12, No. 2. — P.14–26. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.12.1014>
21. *Vidmachenko A.P.* Comparative features of volcanoes on Solar system bodies // XX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Uman, Ukraine, May 23–24, 2018). The program and abstracts. — P.9–12.
22. *Vidmachenko A.P.* Dwarf planets (to the 10th anniversary of the introduction of the new class of planets) // *Astronomical almanac.* — 2015. — Vol. 62. — P.228–249.
23. *Vidmachenko A.P.* Features of surface topography and the geological activity of Pluto // XVIII International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May 26–27, 2016). The program and abstracts. — P.12–14.
24. *Vidmachenko A.P.* Features of the structure of Ceres surface // *Astronomical School's Report.* — 2017. — Vol. 13, No. 1. — P.11–21. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.13.03>
25. *Vidmachenko A.P.* Features of the structure of the Ceres surface // XIX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Bila Tserkva, Ukraine, May 24–25, 2017). The program and abstracts. — P.13–15.
26. *Vidmachenko A.P.* Features of the surface of Ceres // *Astronomical almanac.* — 2017. — Vol. 64. — P.231–248.
27. *Vidmachenko A.P.* Is there life on Mars and where necessary to search for its traces // *Astronomy and present: materials of 5 Interregional Scientific Conference (April 12, 2016, Vinnytsia, Ukraine) / Science editor A.V. Mozhovyi.* — Vinnytsia: FOP “NP Kostiuk”, 2016. — P. 43-48.
28. *Vidmachenko A.P.* Modern volcanic activity on the Moon // XX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Uman, Ukraine, May 23–24, 2018). The program and abstracts. — P.5–7.
29. *Vidmachenko A.P.* On possible life on Jupiter's satellite Io // XX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Uman, Ukraine, May 23–24, 2018). The program and abstracts. — P.17–18.
30. *Vidmachenko A.P.* Processes on the “young” Mars: possible developments of events // XVIII International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May 26–27, 2016). The program and abstracts. — P.16–17.

31. *Vidmachenko A.P.* Research of the Mars by space vehicles // Astronomical School's Report. — 2009. — Vol. 6, No. 1–2. — P.131–137. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.06.2131>
32. *Vidmachenko A.P.* The floating ices on the surface of Pluto // XVIII International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May 26–27, 2016). The program and abstracts. — P.10–12.
33. *Vidmachenko A.P.* The magnetic field of planets, satellites and asteroids // Astronomical School's Report. — 2012. — Vol. 8, No. 1. — P.136–148. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.08.2136>
34. *Vidmachenko A.P.* Traces of life on Mars must be sought around the valley Hellas in areas where the water coming out from under the planet's surface // XVIII International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (National Aviation University, Kyiv, Ukraine, May 26–27, 2016). The program and abstracts. — P.14–16.
35. *Vidmachenko A.P.* Water in Solar system // XX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Uman, Ukraine, May 23–24, 2018). The program and abstracts. — P.91–93.
36. *Vidmachenko A.P.* Where is Necessary to Search Traces of Life on Mars? // Biosignature Preservation and Detection in Mars Analog Environments conference (May 16–18, 2016, Hyatt Regency Lake Tahoe). — Abstract #2002.
37. *Vidmachenko A.P., Morozhenko A.F., Klyanchin A.* Features of morphology and geology of surface of Jupiter satellite Europa // Astronomical School's Report. — 2011. — Vol. 7, No. 1. — P.117–132. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.07.1117>
38. *Vidmachenko A.P., Morozhenko A.V., Klyanchin A., Shavlovskiy V.I., Ivanov Yu.S., Kostogryz N.M.* Asymmetry of reflective properties of the hemispheres of Jupiter satellite Europa // Astronomical School's Report. — 2011. — Vol. 7, No. 1. — P.133–144. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.07.1133>
39. *Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V.* The Physical characteristics of the surface of satellites and rings of giant planets // Kyiv: Editorial and publishing department of NUBiP of Ukraine, 2017. — 412 p.
40. *Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V.* The physical characteristics of surface Earth-like planets, dwarf and small (asteroids) planets, and their companions, according to distance studies // Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, Publishing House “Profi”, 2014. — 388 p.
41. *Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V.* The study Earth-like planets using spacecraft // Astronomical School's Report. — 2014. — Vol. 10, Issue 1. — P.6–19. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.10.1006>
42. *Vidmachenko A.P., Morozhenko O.V.* The study of the satellites surfaces and the rings of the giant planets. — Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine Press. Kyiv, Ltd. Dia. 2012. — 255 p.
43. *Vidmachenko A.P., Steklov A.F.* The study of cometary material on the surface of the Earth // Astronomical School's Report. — 2013. — Vol. 9, No. 2. — P.146–148. <https://doi.org/10.18372/2411-6602.09.2146>
44. *Vidmachenko A.P., Steklov A.F.* Ways of Colonization of Venus // XX International scientific conference “Astronomical School of Young Scientists” (Uman, Ukraine, May 23–24, 2018). The program and abstracts. — P.18–21.
45. *Vidmachenko A.P., Vidmachenko H.A.* Is it dangerous asteroids? // Astronomical almanac. — 2007. — Vol. 53. — P.195–207.
46. <http://my.science.ua/gory-ta-kanjony-marsu/>
47. http://podrobnosti.ua/media/ckeditor_uploads/2016/01/15/oluton-v-tekst.jpg
48. https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/images/largesize/PIA01223_hires.jpg
49. https://www.nasa.gov/sites/default/files/styles/full_width/public/thumbnails/image/europa02-photoa-plumes1042x1042-160919.jpg
50. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sotra_Facula.jpg
51. <http://voyager.jpl.nasa.gov/gallery/images/neptune/14bg.jpg>

Особливості вулканів на різних тілах Сонячної системи

Відьмаченко А.П.

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27

У статті розглянуто особливості дії вулканів на тілах Сонячної системи. Поверхня практично всіх тіл змінюється під впливом різних зовнішніх і внутрішніх факторів. Виверження вулканів також створюють різні структури рельєфу, нові типи порід і ландшафти. Вони розрізняються за хімічним складом, термічним станом та історією внутрішньої будови. Розрізняють три основні типи вулканів. Базальтові вулкани з'являються в місцях, де на тектонічних плитах утворюється новий матеріал. У таких місцях розплавлена порода по тріщинах піднімається з мантії. Лава розсовує тектонічні плити і повільно розтікається по поверхні. До повного остигання лава долає значні відстані. Андезитові вулкани розташовані там, де ці плити руйнуються при зануренні однієї під іншу. В результаті таких процесів дуже в'язка лава піднімається через розломи в плитах і з вибухом виривається на поверхню. До третього типу вулканів відносять кріовулкани, або крижані вулкани. У них замість розплавленої породи вивергаються летючі речовини. До них відносять крижані розплави з води, аміаку, метану, які називають кріомагмою. Для прояву кріовулканічної діяльності ці речовини повинні бути рідиною або паром. Після таких вивержень під впливом низької навколишньої температури кріомагма конденсується до твердої фази. Кріовулкани можуть утворюватися на об'єктах Сонячної системи, де є велика кількість води. Такими тілами є карликові планети, крижані супутники, об'єкти поясу Койпера і т.п. До них відносяться Плутон, Церера, Титан, Енцелад, Європа, Тритон і т.п. Потенційними джерелами енергії

для плавлення льодів для кріовулканів, є радіоактивний розпад в скельному ядрі об'єкта і припливне тертя. А також напівпрозорі відкладення заморожених матеріалів, які можуть створювати підповерхневий парниковий ефект, з можливістю накопичення необхідного тепла і подальшим вибуховим виверженням. Кометні ядра також можна вважати тілами Сонячної системи з наявністю кріовулканізму.

Ключові слова: вулкан; планети земного типу; карликові планети; супутники планет; ядра комет; типи вулканів.

Features of volcanoes on different Solar system bodies

Vidmachenko A.P.

The Main astronomical observatory of the NAS of Ukraine, 03143, Academician Zabolotny str., 27, Kyiv, Ukraine

In the article features of the action of volcanoes on the bodies of the Solar system are considered. The surface of almost all bodies varies under the influence of various external and internal factors. Volcanic eruptions also create different relief structures, new types of rocks and landscapes. They differ in chemical composition, thermal state and history of the internal structure. There are three main types of volcanoes. Basalt volcanoes appear in places where new material is formed on tectonic plates. In such places, the molten rock rises from the mantle along the cracks. In this case, the lava pushes tectonic plates in different directions, and slowly flows along the surface. Before the complete cooling, the lava overcomes considerable distances. Andesite volcanoes are located where these plates are destroyed when immersed under each other. As a result of such processes, a very viscous lava rises through the faults in the plates, and bursts out onto the surface with an explosion. The third type of volcano includes cryovolcanoes or ice volcanoes. In them instead of molten rock volatile substances are erupting. These include glacial melts from water, ammonia, methane, which are called cryomagma. For the manifestation of cryovolcanic activity, these substances must be in the form of liquid or vapor. After such eruptions, under the influence of low ambient temperature, the cryomagma condenses to a solid phase. Cryovolcanoes can be formed on those objects of the solar system, where there is a lot of water. Such bodies are: dwarf planets, ice satellites, Kuiper belt objects, and the like. These include Pluto, Ceres, Titan, Enceladus, Europe, Triton, etc. Potential sources of energy for melting ice for cryovolcanoes are radioactive decay in the rock core of the object, and tidal friction. As well as translucent deposits of frozen materials that can create a subsurface greenhouse effect, with the possibility of accumulating the required heat, and the subsequent explosive eruption. Cometary nuclei can also be considered bodies of the Solar system with the presence of cryovolcanism.

Keywords: volcano; earth-type planets; dwarf planets; satellites of planets; comet nuclei; types of volcanoes.

Надійшла до редакції / Received 16.07.2018
Прийнята до друку / Accepted 15.08.2018