



А. Н. Макаренко

КОСМИЧЕСКИЙ ФАКТОР "ИЗБЫТОЧНОГО" ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ В НЕДРАХ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ

Статья 3. Общие для планет космические причины "избыточного" выделения тепла

(Рекомендовано акад. НАН Украины В. М. Шестопаловым)

Крім радіогенної енергії надра Землі та планет мають "додаткове" джерело енергії космічного походження, яке модулюється положенням та напрямком руху Сонячної системи в Галактиці. Залежність його від напрямку руху призводить до того, що максимальне виділення енергії відбувається, коли проекція вектора швидкості Землі в Галактиці знаходиться на земному екваторі, наслідком чого є існування екваторіального гарячого поясу в надрах Землі. Такі ж само екваторіальні пояси внутрішньої активності спостерігаються також і на багатьох інших планетах Сонячної системи. Також існує спільна для планет залежність "надлишкового" тепловивільнення від їх маси. Це є ознакою того, що "надлишкове" вивільнення тепла у надрах планет має єдину космічну природу. Можливо, що чутливість планетних надр до зовнішнього впливу залежить від їх хімічного складу, – водень та залізо можуть бути більш чутливими.

Besides radiogenic energy, the "supplementary" energy source occurs in the Earth interior. This source is of cosmic origin and modulated by position and direction of the solar system motion in the Galaxy. Therefore, the maximal heat generation occurs when projection of the Earth motion in the Galaxy achieves the Earth equator. This results in existence of hot equatorial belt in the Earth interior. Similar equatorial belts of endogenous activity are also observed on many other planets of the solar system. Moreover, common for the planets is dependence of "excess" heat generation on planet mass. This suggests that "excess" heat in the interior of planets is of common cosmic nature. It is possible that sensitivity of planetary interior to external influence also depends on its chemical composition – hydrogen and iron may have higher sensitivity.

В статьях 1 и 2 данной работы [1, 2] было высказано предположение, что галактическое окружение влияет на земные оболочки посредством действующего в недрах и подчиняющегося космическим ритмам источника энергии неизвестной природы – "космической печки".

Было установлено также, что степень воздействия на Землю со стороны окружающей галактической среды зависит от направления движения Земли в Галактике. В частности, максимальным нагрев земных недр становится в те эпохи, когда проекция вектора скорости Земли в Галактике попадает на экватор. Вследствие этого зоны избыточного (не радиогенного) тепловыделения приурочены к низким широтам, формируя в земных недрах "экваториальный горячий пояс" разогретого вещества.

Внешняя (галактическая) природа избыточного нагрева земных недр предполагает наличие аналогичных источников также и в недрах других космических тел, от которых наша планета мало чем отличается.

Избыточное тепловыделение было обнаружено в недрах планет-гигантов. Тепловое излучение планет-гигантов существенно превышает поток энергии, получаемый этими планетами от Солнца, а предполагаемых внутренних источни-

ков недостаточно для его объяснения. Помимо собственно планет-гигантов аналогичная проблема выявлена также у некоторых из их спутников, а также в ряде других случаев.

Настоящая статья посвящена сопоставлению избыточного тепловыделения в недрах Земли с аналогичными процессами в недрах других космических тел. Задача – определить степень общности в происходящем избыточном тепловыделении, а также распространенность этого процесса в природе.

Избыточное тепловыделение в недрах планет, сравнение с земным

Единая зависимость избыточного тепловыделения от массы планеты – следствие общих причин. Как известно, наиболее значительное избыточное тепловыделение было обнаружено в недрах планет группы Юпитера [4, 22], что позволяет предполагать зависимость его от массы планеты. Исследование этого вопроса показало, что для пяти крупнейших планет Солнечной системы (Юпитер, Сатурн, Нептун, Уран, Земля) существует следующая зависимость суммарного потока избыточного тепла, испускаемого планетой, от массы планеты [30]: $L/L_{\text{Земли}} = (M/M_{\text{Земли}})^{1,7}$. Венера лежит близко к этой зависимости, но ее тепловой поток известен с малой точностью. Менее

массивные Марс, Меркурий и Луна, согласно [30], данной зависимости не подчиняются. Вполне очевидно, что *поскольку избыточное тепловыделение подчиняется общему закону, то оно имеет единую для по крайней мере пяти крупнейших планет природу.* Также ясно, что выделяемая в недрах этих планет теплота имеет не радиогенную природу, поскольку показатель степени выше единицы, а относительное содержание радиоактивных элементов в недрах планет-гигантов заведомо меньше земного. Таким образом, *если у Земли "дополнительный" источник энергии связан с внешним по отношению к Солнечной системе фактором, то и у планет-гигантов тоже.* Причем существует некоторая критическая масса (значение ее несколько меньше земной), ниже которой становятся существенными какие-то другие факторы. Отмеченная для наиболее крупных планет зависимость энерговыделения от массы планеты может свидетельствовать о том, что более крупными из них тепловыделяющий фактор поглощается более полно.

Экваториальные горячие пояса планет как признак наличия космического избыточного тепловыделения в их недрах. Попробуем ответить теперь на вопрос: происходит ли аналогичное земному избыточное (не радиогенное, космической природы) выделение тепла в недрах других, менее массивных планет, которые из общей для наиболее крупных планет зависимости выпадают?

Воспользуемся такими хорошо определимыми поверхностными индикаторами выделения тепла в недрах планет, как проявления вулканизма. В статье 2 данной работы [2] было установлено, что избыточная космическая энергия земных недр выделяется преимущественно в низких широтах, формируя экваториальный горячий пояс активности, в том числе вулканической. Важнейшей особенностью экваториального горячего пояса является наличие в нем двух антиподальных восходящих конвективных потоков (суперплюмов), возникающих вследствие нарушения равновесия при перераспределении масс в ходе мантийной конвекции и вызванных этим смещений мантии относительно ядра. Наличие подобного широтно-долготного распределения эндогенной активности на других планетах будет являться признаком того, что избыточная космическая энергия выделяется и в их недрах.

Приуроченность внутренней активности к низким широтам действительно прослеживается не только на Земле, но и для других планет также [11]. Рассмотрим примеры географического распределения внутренней активности на некоторых из планет.

Венера. Проявления вулканизма на Венере чрезвычайно развиты – на ее поверхности обна-

ружено более 1600 крупных вулканов и несколько сот тысяч мелких вулканических холмов. На рис. 1, а показана обобщенная карта расположения крупнейших венерианских вулканов, а на рис. 1, б – определенной их разновидности (совмещение корон и нов). Вероятно, что такие структуры образуются в условиях особой перегретости мантии и в связи с этим показывают наибольшую концентрацию к экватору. На рис. 2, а показаны широтные распределения различных видов вулканической активности. Видна четкая приуроченность проявлений вулканизма к экваториальным широтам, почти все центры активности сосредоточены в пределах пояса, ограниченного 60–65° широты по обе стороны экватора. А в пределах ± 350 широты плотность их распределения на единицу площади в 1,81 раза больше, чем на остальной поверхности Венеры, то же соотношение наблюдается и на Земле [11].

На рис. 2, б показано долготное распределение проявлений венерианского вулканизма. Отчетливо видно, что, как и в случае с Землей [2], в пределах экваториального горячего пояса Венеры наблюдаются две антиподально расположенные зоны повышенного вулканизма, образованные, очевидно, двумя же суперплюмами (глобальными восходящими конвективными потоками мантии). Аналогия с Землей – предельно четкая.

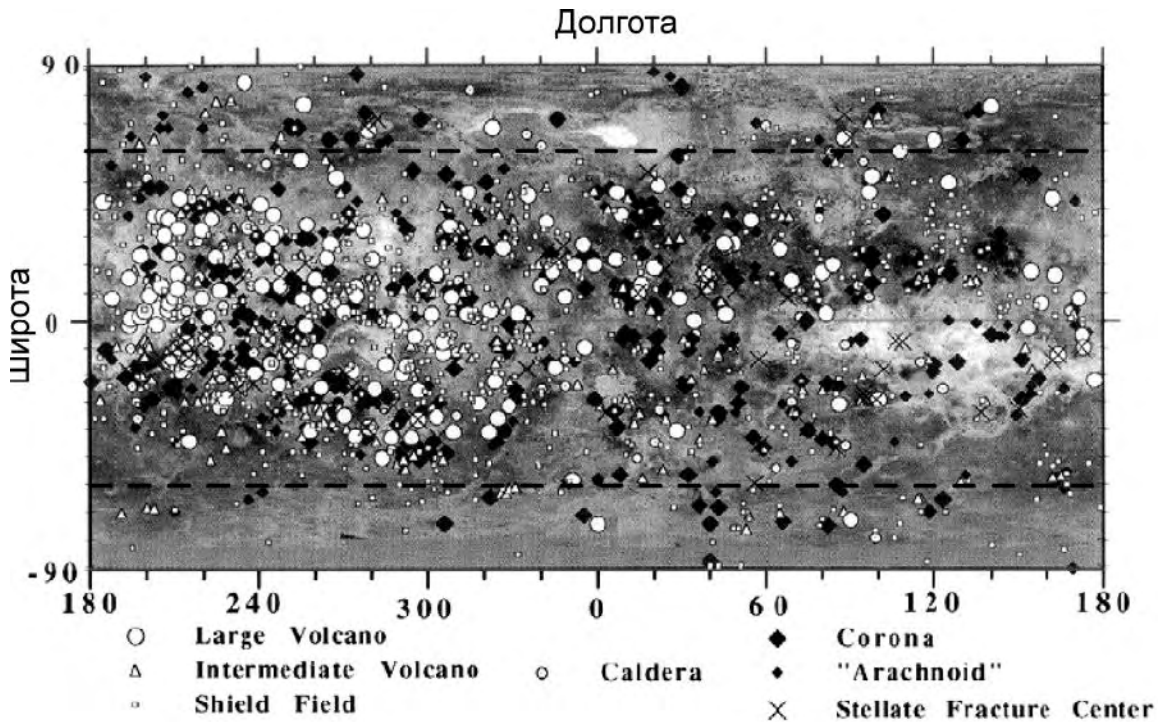
Марс. На рис. 3 показаны проявления вулканизма на Марсе. Видны две глобальные области. Обе они антиподально расположены на экваторе. Особенно выделяется поднятие Фарсида (Тарсис, Tharsis) – огромное вулканическое нагорье, являющееся местом сосредоточения крупнейших вулканов в Солнечной системе. Распространенная точка зрения: эти области отображают восходящие конвективные потоки мантии, что подтверждается и наличием в зоне поднятия Фарсида крупнейшей рифтовой системы – долин Маринера (Valles Marineris), которая является индикатором обстановки растяжения, господствовавшей как в районе поднятия, так и в экваториальной зоне вообще. Помимо долин Маринера, которые пересекают купол Тарсис в восточной его части, протянувшись вдоль экватора на четверть окружности планеты, Тарсис иссечено системой гигантских разломов, вдоль некоторых из них развилась вулканическая активность, и которые также указывают на общую обстановку растяжения на этом поднятии.

Как и в случае Земли и Венеры, конвекция в марсианской мантии тоже двухъячеистая и оба восходящих потока расположены на экваторе. Один поток более сконцентрирован, другой выглядит слабее, но занимает более обширную территорию. Поскольку вулканические явления в

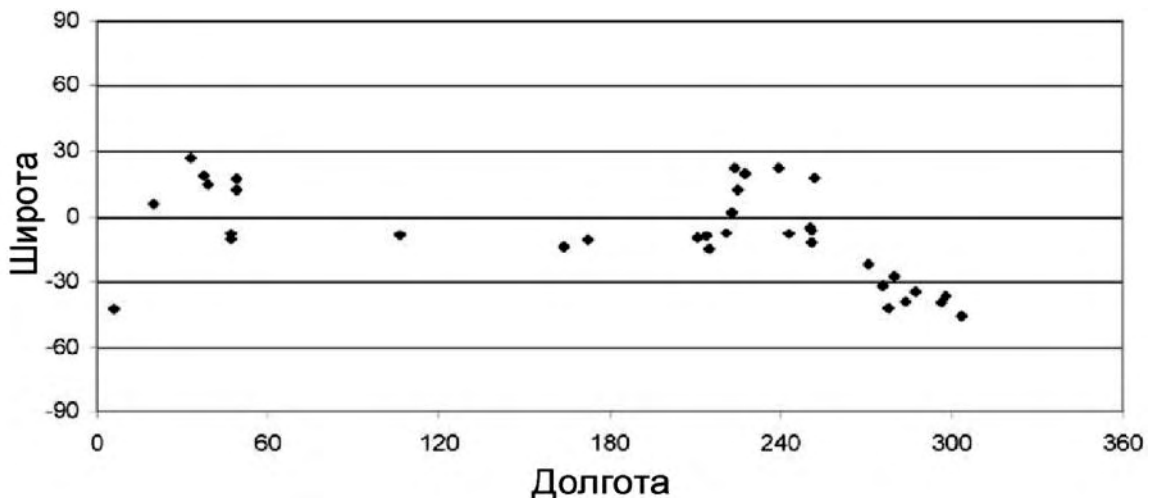
этих областях происходили в той или иной мере на протяжении всей или большей части истории Марса, например для той же вулканической провинции Фарсида известны проявления вулканической активности в возрастном промежутке от 3,5 млрд лет до миллионов лет назад [14], можно утверждать с определенной долей уверенности, что географическое расположение восходящих

конвективных потоков марсианской мантии оставалось все это время практически неизменным.

На рис. 4, а и 4, б показаны распределения марсианских вулканов по широтам и долготам. Очевидна приуроченность марсианских вулканов к низким широтам. Также в долготном распределении наблюдаются, в целом, две антиподально расположенные зоны повышенного



а) Основные типы вулканических структур (белое – с преобладанием экструзивного магматизма, черное – с преобладанием интрузивного) [8]



б) Частный случай поверхностного распределения определенной разновидности вулканических структур, совмещающих так называемые короны и новы [8]

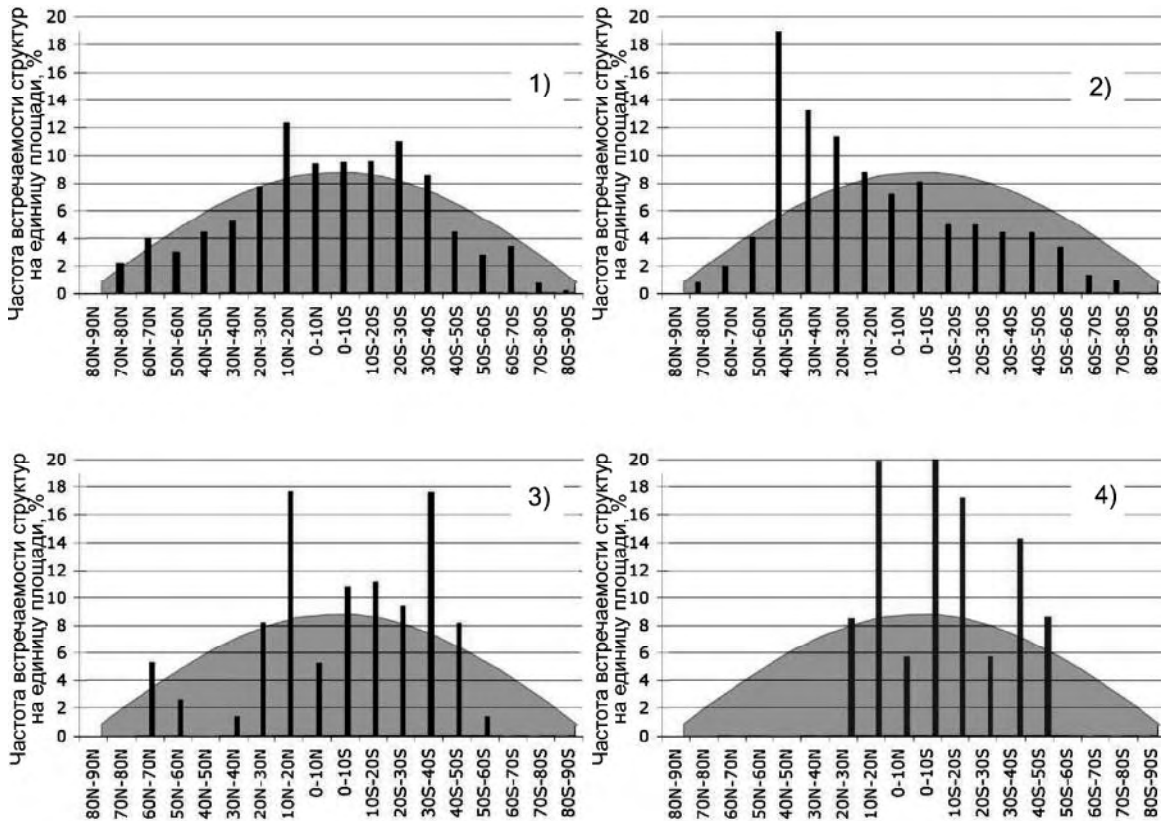
Рис. 1. Распространенность очагов вулканизма на поверхности Венеры

вулканизма, образованные, очевидно, двумя же суперплюмами (глобальными восходящими конвективными потоками мантии).

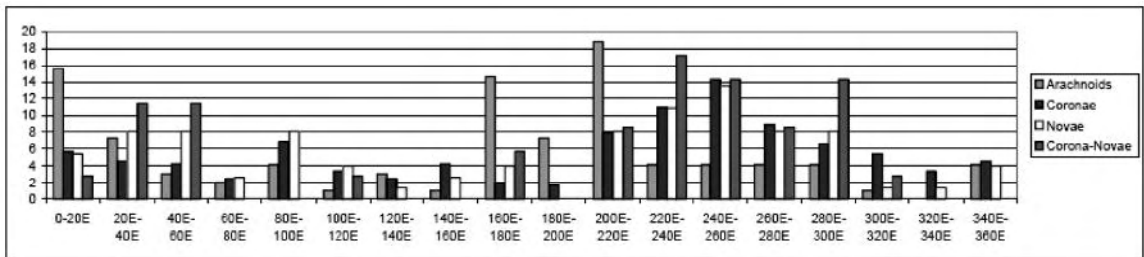
На рис. 3 показаны также предполагаемые направления истинных блужданий полюсов Марса. Коридор смещения марсианских полюсов находится в области нисходящих конвективных течений между двумя гигантскими экваториальными суперплюмами. Было высказано предположение, что это явление вызвано смещениями марсианской каменной оболочки относительно оси вращения планеты в ходе перераспреде-

ния масс при образовании крупнейших вулканических провинций [17]. Очевидно, что такие повороты оболочки относительно оси вращения приводили к "размыванию" экваториального горячего пояса в коридорах смещения марсианских полюсов. В тех же местах, где оболочка постоянно пребывала на экваторе, в горячем поясе, нагрев был особенно велик и там развились восходящие конвективные потоки. Тот же процесс происходил на Земле и Венере.

Недавние исследования космическими аппаратами спектральных свойств горных пород по-



а) Широтное распределение: 1) корон, 2) арахноидов, 3) нов и 4) структур, совмещающих короны и новы [8]. Для сравнения заливкой показан процент площади, занимаемый определенным широтным диапазоном



б) Долготное распределение различных типов вулкано-тектонических структур на Венере (в % к суммарному значению) [19]

Рис. 2. Распределение вулканизма на Венере по широтам и долготам

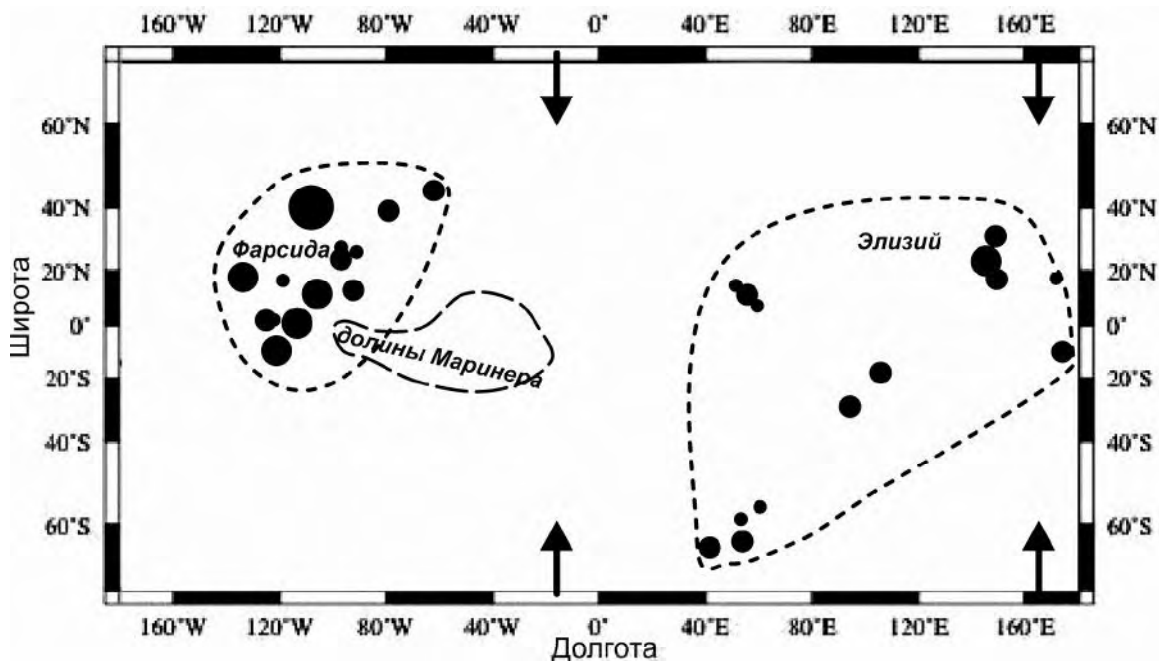


Рис. 3. Области развития вулканизма на Марсе. Точки – крупнейшие вулканы. Стрелками показаны предполагаемые направления дрейфа оси вращения по [17]

казали значительную широтную неоднородность состава коры Марса, что может быть связано с его термальной эволюцией. Если на экваторе кора в целом базальтовая или базальтово-андезитовая, то в высокоширотных областях обоих полушарий она преимущественно андезитовая [33]. В приэкваториальных вулканических провинциях андезитовый состав изверженные породы приобретают лишь на заключительных стадиях вулканизма. По-видимому, уже на самых ранних стадиях формирования коры Марса марсианская мантия в экваториальных широтах находилась в более высокой степени частичного плавления, что и обусловило мафический и ультрамафический базальтовый состав выплавляемой из нее коры, который по мере остывания мантии эволюционировал в сторону более фельзического андезитового. Изначально же более холодная мантия полярных широт поставляла лишь андезитовые выплавки. Таким образом, горячий экваториальный пояс существовал на протяжении всей марсианской истории.

По имеющимся данным [7], последние крупные эпохи вулканической активности на Марсе датируются возрастными около 200 млн лет и примерно 400 млн лет. В ходе недавних исследований Марса с помощью КА Mars Global Surveyor и Mars Odyssey неожиданно также были получены многочисленные свидетельства современной (около 40–0 млн лет назад) вулканической активности [5, 13, 14, 21] на этой планете. Эти вспышки вулканизма близки по времени аналогичным

земным. Таким образом, и на Марсе, как и на Земле, внутренняя активность, по-видимому, имеет 200-миллионнолетнюю периодичность [1]. А в работе [32] признана наиболее вероятной 100-миллионнолетняя периодичность магматизма марсианских вулканов. Соответствующий ритм является важнейшим и в проявлениях магматизма на нашей планете [1], что также является свидетельством общности причин происходящего избыточного тепловыделения на Земле и Марсе и его внешней, космической природы.

Меркурий. Одна из самых больших особенностей поверхности Меркурия – бассейн Калорис (море Жары) – равнинная депрессия ударного происхождения диаметром 1300 км. Это практически единственное лавовое море Меркурия. Оно расположено в 30° к северу от его экватора. На противоположной стороне планеты находится обширная область, покрытая тысячами глыбообразных холмов диаметром до 2 км и пересеченная несколькими крупными прямолинейными долинами, образованными по линиям разломов коры планеты. По-видимому, они являются структурами растяжения, образованными вследствие подъема горячего вещества мантии.

Одним из последних выдающихся достижений в исследованиях этой планеты явилось открытие древних вулканов. Эти меркурианские вулканы сконцентрированы главным образом в приэкваториальном районе на южном окаймлении бассейна Калорис.

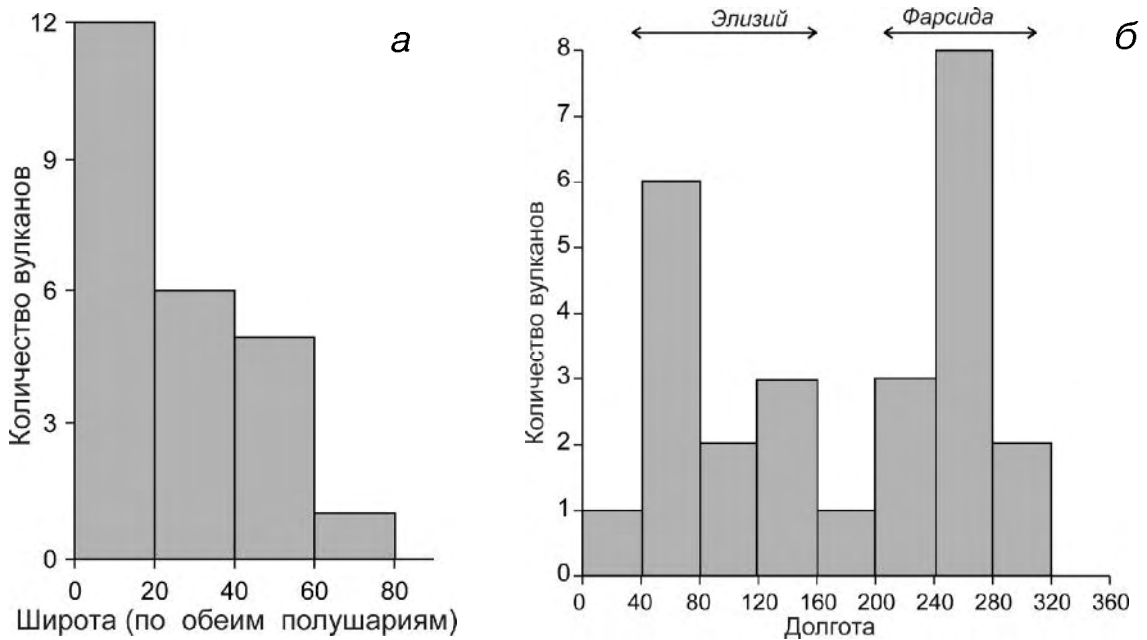


Рис. 4. Распределение вулканизма на Марсе по широтам и долготам:

а) Широтное распределение вулканической активности на Марсе; б) Долготное распределение вулканической активности на Марсе

В ходе недавнего пролета КА "Мессенджер" вблизи Меркурия были обнаружены гравитационные аномалии, позволяющие предполагать наличие масконов (положительных гравитационных аномалий) под его поверхностью в районах ударной котловины Калорис и соседних с ней ударных бассейнов Толстой (16° к югу) и Матисс (45° к северу от экватора). Считается, что эти аномалии были образованы подъемом нижележащих тяжелых мантийных масс.

Таким образом, и в случае Меркурия, по-видимому, прослеживаются характерные для планет земной группы закономерности – приуроченность внутренней активности к низким широтам и наличие двух антиподально расположенных на экваторе восходящих конвективных потоков разогретого вещества мантии.

Луна. На рис. 5 показаны некоторые проявления лунного магматизма. На Луне в целом выделяют два типа рельефа поверхности: материки – возвышенные неровные густо кратерированные светлые участки; моря – более молодые и относительно ровные залитые застывшей лавой темные участки поверхности, лежащие значительно ниже уровня материковой части коры (на 1–3 км). Морские области распределены по поверхности весьма неравномерно, образуя пояс неправильной формы. Моря, расположенные на обратной стороне Луны, имеют гораздо меньшие размеры, чем на видимой с Земли, кроме того, их очень мало. На видимом полушарии Луны они занимают около

31–40%, а на обратной – 3–10% всей территории. Пояс морей на обратной стороне продолжается так называемыми талассоидами (мореподобными структурами) – светлыми низменными районами, которые не были залиты лавой. Несколько небольших морей, найденных на обратной стороне, расположены в центрах талассоидов.

Лунные моря заполняют крупнейшие ударные бассейны, сформировавшиеся в эпоху гигантской метеоритной бомбардировки или лунного катаклизма, и по своему строению и интенсивному базальтовому магматизму более всего напоминают земные трапповые провинции. Заполнение морей базальтовой лавой происходило 3,9–3,0 млрд лет назад и напрямую не связано собственно с импактными событиями, ведь эти процессы разделены временным интервалом около 0,5 млрд лет. Принято считать, что ударные депрессии оказались лишь наиболее удобным (утонченная, разбитая сетью разломов кора) местом для того, чтобы некоторая часть вещества мантии прорвалась в виде лавы на поверхность и заполнила часть этой депрессии. Далеко не все крупные ударные депрессии заполнены лавовыми морями. Так, в расположенном в полярных широтах крупнейшем из известных в Солнечной системе ударных бассейнов – Южном полюсе-Айткен – не сформировалось никакого лавового моря.

Еще в ходе самых первых пролетов космических аппаратов вблизи поверхности Луны обнаружилось значительные неоднородности ее

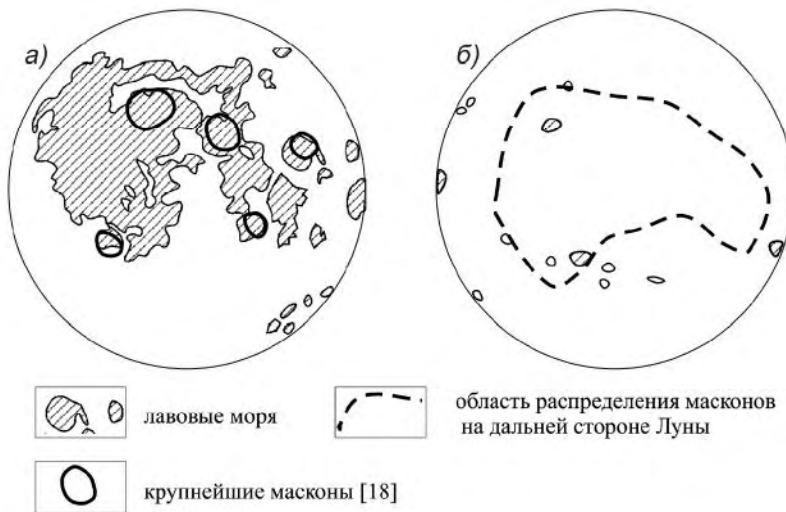


Рис. 5. Распределение проявлений внутренней активности на Луне: а) ближняя сторона; б) дальняя сторона

гравитационного поля, которые серьезным образом сказывались на траекториях полета этих аппаратов (вплоть до падения их на лунную поверхность). Аномалии вызваны особыми массивными образованиями в недрах планеты (от 10^{-6} до 10^{-4} массы Луны), которые получили название масконов (от mass concentration – концентрация масс). Их происхождение связывают с ударами крупных космических тел, образовавшими гигантские депрессии в рельефе. Образование этих депрессий было в последующем частично компенсировано изостатическим подъемом нижележащих более плотных мантийных масс. Таким образом линзы более плотного вещества под ударными бассейнами привели к гравитационным аномалиям. Однако это выпучивание нижележащих масс произошло далеко не под всеми депрессиями, а лишь там, где реологические свойства мантии и коры делали возможным этот процесс. Масконы расположены под большими круговыми морями – Дождей, Облаков, Ясности, Кризисов, Нектара, Влажности, Восточным. Также масконы обнаружены в центральной части обратной стороны Луны (занимая область диаметром около 1 тыс. км) и в районе моря Краевого. Только здесь мантийное вещество оказалось достаточно подвижным. Причем, что характерно, на ближней стороне Луны масконов несколько, они крупны и четко выражены, на дальней же стороне масконы мелки, но их много и занимают они достаточно обширную область.

Из всего сказанного можно заключить, что области нагрева лунных недр сосредоточены большей частью в низких широтах и формируют экваториальный горячий пояс нагрева с двумя антиподально расположенными суперплюмами (восходящими конвективными потоками), анало-

гичный тем, которые присутствуют в недрах других планет земной группы. В наше время можно говорить о конвекции только в самых глубинных слоях мантии, не превышающих половины радиуса Луны, поэтому наблюдаемое представляет собой, скорее, следы того плана конвекции, который был присущ Луне на заре ее истории.

Европа. Еще одна интересная в смысле структуры конвективных потоков планета. Европа расположена достаточно близко к Юпитеру и подвергается значительному приливному воздействию с его стороны. Тем не менее,

согласно имеющимся оценкам [24], тепловой поток из недр Европы много выше предсказываемого моделями приливного нагрева.

Среди загадочных особенностей этого спутника Юпитера – дугообразные узкие желобовидные углубления (throughs), формирующие своими дугами две огромные неполные окружности диаметром около 2500 км на противоположных сторонах планеты с центрами, лежащими на ее экваторе (рис. 6). Были высказаны предположения о связи их образования с дрейфом полюсов или, точнее, со смещением многокилометровой ледяной оболочки планеты относительно ее жидкой водяной мантии в ходе конвективного перераспределения масс [26]. Планета покрыта системой глобальных трещин или "борозд", вызванных изменением фигуры ее внешней ледяной оболочки при ее колебаниях относительно оси вращения. Эти борозды образуют симметричный узор, располагаясь пучками вдоль двух окружностей, которые пересекаются в центрах дугообразных желобов (рис. 6).

Европа – слабо кратерированная планета с часто обновлявшейся молодой (около нескольких десятков миллионов лет) поверхностью. По фотографиям, полученным КА "Вояджер" и "Галилео", была создана геологическая карта Европы [9] с выделением основных возрастных подразделений. По данным из этой карты на рис. 6, б показаны местоположения территорий с наиболее молодой поверхностью. Также указаны предполагаемые очаги криовулканизма по [10] и [16]. Очевидна приуроченность этих молодых недавно обновленных участков к центрам дугообразных желобов, сюда же сходятся и многочисленные борозды, в изобилии встречающиеся на поверхности планеты, что может быть интерпретировано как

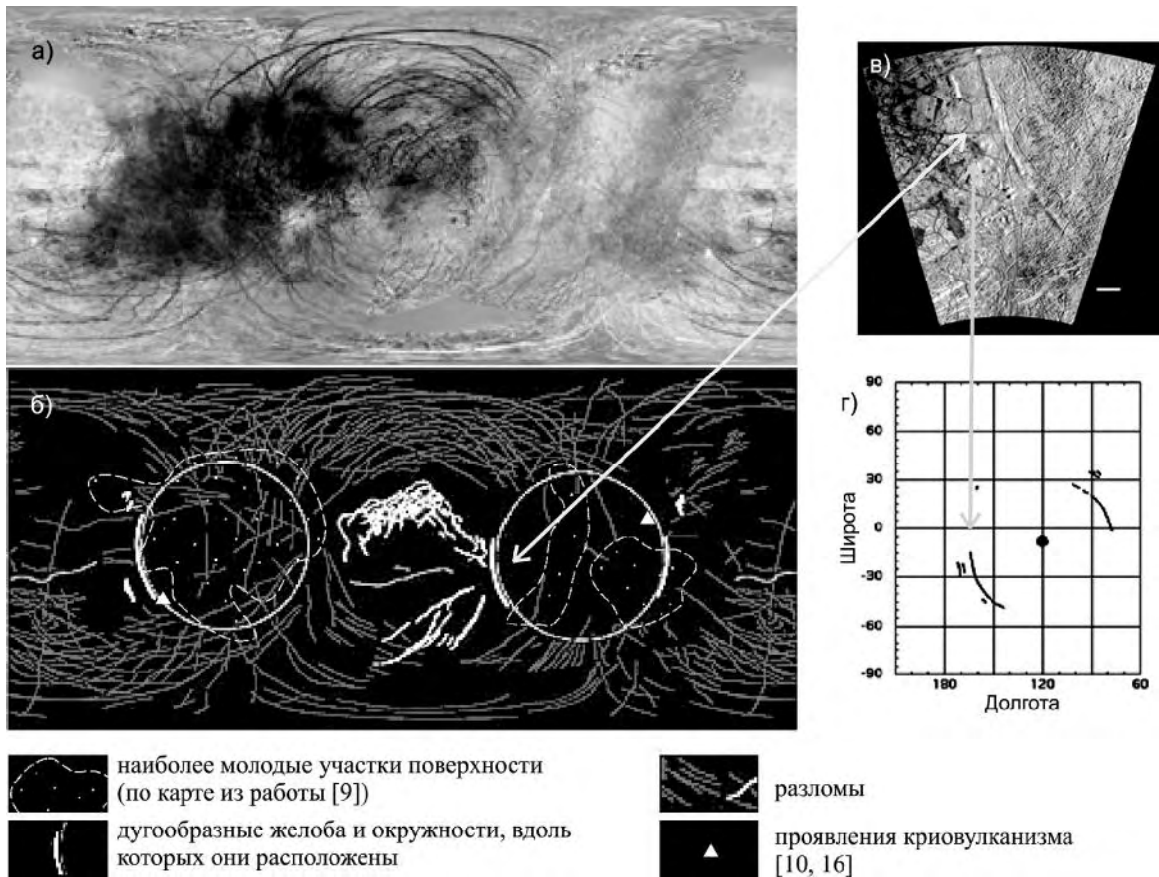


Рис. 6. Поверхность Европы как индикатор структуры конвективных потоков ее недр: а) глобальная мозаика фотографий; б) карта разломов; в) фотографическое изображение дугообразного желоба; г) его расположение относительно экватора (рисунки взяты из работы [25])

наличие в этих местах восходящих конвективных потоков водяной мантии Европы и, может быть, аналогичных процессов в ее ледяной коре. Возрастные подразделения промежуточного возраста, в целом, концентрируются в окрестностях экватора. Картина весьма похожа на то, что мы видели на других планетах – два гигантских суперплюма на экваторе образуют вздутия, относительно которых происходят колебания внешней оболочки, связанные с перераспределением масс в ней. И здесь тоже суперплюмы являются составляющими горячего экваториального пояса планеты.

Другие малые планеты Солнечной системы. Явные следы современного криовулканизма имеют спутники Сатурна – Титан и относительно небольшой 500-километровый Энцелад. Так, из разломов на поверхности Энцелада исходят потоки паров воды, а на самой поверхности замечены аномально нагретые участки; кроме того, на ней видны гладкие участки с отсутствием следов какой бы то ни было метеоритной бомбардировки, что считается свидетельством недавнего (не более 100 млн лет назад) подтаивания льдов,

слагающих эти участки. Тепловой поток из недр Энцелада, возможно, на порядок выше ожидаемого от традиционных тепловых источников [28]. Оценки теплового потока из недр Реи, второго по размерам спутника Сатурна, также показали, что он намного выше ожидаемого от известных тепловых источников [23].

Ледяной вулканизм в той или иной мере присущ спутникам Урана – Оберону, Титании, Ариэлю и Миранде.

Проявления современного криовулканизма обнаружены на спутнике Нептуна Тритоне.

Некоторые признаки внутренней активности наблюдаются на объектах пояса Койпера: Плутоне, Эриде, Квараре [29].

Источник внутренней энергии этих планет не ясен. Ни распад радиоактивных элементов, ни теория приливного взаимодействия не предсказывают всего того тепла, которое выделяется и выделялось в их недрах.

Общность структуры конвективных потоков планетных недр предполагает и общие причины конвекции (нагрева). Налицо поразительное

сходство в структуре конвективных течений мантии и дрейфе полюсов между Землей и другими, весьма различными по своим размерам, массе, расположению, химическому составу, строению планетами. Даже на таких разных планетах, как Земля и Луна или Европа, восходящих конвективных потоков именно два.

В то же время, согласно термодинамическим законам, так быть не должно. Возможность конвекции, ее тип определяются, как известно, числом Релея, которое прямо пропорционально разности температур у основания и верхней границы конвектирующего слоя, кубу толщины этого слоя, плотности, коэффициенту теплового расширения вещества, ускорению силы тяжести и обратно пропорционально вязкости и теплопроводности. Все эти величины у каждой планеты свои и очень сильно отличаются.

С ростом числа Релея выше некоторой критической его величины, означающей, что конвекция уже началась, типы конвекции сменяют друг друга в зависимости от того, во сколько раз превышено критическое значение. В частности, результаты численного моделирования для мантии Земли [20] показывают: при тех числах Релея, которые могут реально характеризовать земную мантию, тип конвекции – полигональный. В близких к гексагональным ячейках вещество поднимается в центре и опускается на периферии. Этот тип конвективных течений характеризуется очень высокой стабильностью в широком диапазоне возможных значений числа Релея. Численное моделирование для мантии Земли показывает шесть конвективных ячеек. Другие исследователи – для мантии Марса – получили пять ячеек. Но никак не две. Если бы конвекция вызывалась равномерным выделением тепла по всему объему, то так бы и было, но оно неравномерно. И эта неравномерность, на всех планетах одинаковая, определяет единый для всех двухъячейный тип конвективных течений. *Приэкваториальное расположение нагретых восходящих потоков, их количество, антиподальность являются свидетельством космической обусловленности плана конвекции вещества планетных недр.*

Наличие широтной зависимости тепловыделения на малых планетах может говорить также о том, что слой вещества толщиной в несколько сотен километров также поглощает значительную долю проникающего сквозь него космического тепловыделяющего фактора, вызывающего выделение энергии, так как в противном случае тепловыделение было бы равномерным по всему объему планеты. То есть даже такой слой вещества обладает значительными экранирующими способностями.

Зависимость избыточного тепловыделения от состава планеты. Поскольку планеты Солнечной системы значительно различаются по эле-

ментному и химическому составам, интересно провести сравнение интенсивности тепловыделения в недрах планет в зависимости от их состава. На рис. 7 удельное тепловыделение планет на единицу массы сопоставлено с их плотностью, которая принята здесь как обобщенный показатель химического состава. При расчете удельного тепловыделения были использованы следующие оценки тепловых потоков планет: для планет-гигантов – по работе [34] (предполагается, что их тепловые потоки многократно превышают тепловые потоки, производимые распадом радиоактивных элементов и других "традиционных" источников энергии). Для Земли избыточное, внешней природы, тепловыделение принято равным 20 ТВт (т. е. половине суммарного теплового потока). Для Марса использованы данные из публикации [15]. Суммарный тепловой поток из этой планеты близок к ожидаемому для теплового потока от радиоактивного распада. Для Луны использованы данные работы [12], для Меркурия – из [35]. В случае ледяных спутников были использованы данные [24] – для Европы, [27] – для Ганимеда, [23] – для Реи, [28] – для Энцелада. Для всех планет земной группы была сделана поправка на радиогенное тепловыделение (значения удельного тепловыделения от распада радиоактивных изотопов составляют порядка $(3,6...5,0) \cdot 10^{-12}$ Вт/кг для вещества каменных оболочек). В случае Меркурия была сделана также поправка на воздействие приливов со стороны Солнца, что составляет примерно 1/6 от суммарного теплового потока для этой планеты [6]. Для ледяных спутников поправок на радиогенное тепловыделение не делалось, поскольку содержание радиоактивных элементов в их недрах меньше земного, а удельное тепловыделение значительно превышает земное. В случае Европы может быть велик вклад приливной энергии, однако его значение точно неизвестно. Также для всех планет земной группы были использованы значения их ненагруженных плотностей (т. е. модельные плотности, приведенные к нормальному давлению при отсутствии гравитационного сжатия планет).

На рис. 7 видно, что интенсивность выделения тепла равной массой вещества сильно различается от планеты к планете. Для планет-гигантов удельное тепловыделение быстро падает по линейному закону – при увеличении плотности в 1,5–2 раза выделение энергии уменьшается примерно на порядок. Планеты земной группы выпадают из этой зависимости, имея значительно более низкое удельное энерговыделение, которое, по-видимому, к тому же несколько возрастает с увеличением плотности. Малые планеты, состоящие в значительной мере из водного льда, показывают большой разброс значений, что может быть вызвано невысокой точностью определения их тепловых потоков. Тем

не менее прослеживаются некоторые закономерности. Удельное энерговыделение на единицу массы в них в среднем определено выше, чем у железо-каменных планет группы Земли и даже у планет-гигантов. В целом же наблюдается аналогичное планетам-гигантам падение удельного энерговыделения с ростом плотности по линейному закону.

Создается впечатление, что выделение энергии в недрах газовых планет связано с наличием элементов начала периодической системы – прежде всего водорода, так как Юпитер и Сатурн имеют состав, близкий к солнечному, и содержат водорода около 70–75% по массе, тогда как Уран и Нептун содержат почти на порядок меньшее количество этого элемента (10–15%), а планеты земной группы состоят главным образом из атомов железа, кислорода, кремния, магния и алюминия, и содержание водорода в них пренебрежимо мало.

Высокая интенсивность выделения энергии в недрах ледяных планет в сравнении с планетами группы Земли может служить подтверждением повышенной чувствительности водорода к воздействию галактического теплопроизводящего фактора, ведь содержание водорода в них также довольно велико и составляет около 1–6%.

Можно отметить также, что при несколько более высоком содержании водорода в недрах Урана и Нептуна они уступают ледяным спутникам в интенсивности избыточного выделения энергии. Это могло бы быть вызвано как присутствием в ряде случаев дополнительных традиционных источников тепла (распад радиоактивных изотопов, диссипация приливной энергии в недрах спутников, в частности Европы), так и зависимостью избыточного (галактического происхождения) тепловыделения от размеров планеты. Наличие широтных зависимостей в разогреве недр планет свидетельствует об экранирующем влиянии внешних их слоев на степень воздействия галактического тепловыделяющего фактора. В самые глубокие недра более крупных планет тепловыделяющий фактор поступает в ослабленном состоянии, и, следовательно, планеты меньших размеров, но с однотипным химическим составом, будут подвергаться большему воздействию.

Поскольку речь идет о некоем фундаментальном процессе, помимо разницы в элементном составе, следует отметить еще одно, может быть важное, различие на уровне элементарных частиц. Если такие планеты, как Сатурн и Юпитер, состоят главным образом из свободных протонов, то планеты группы Земли состоят из протонов лишь наполовину, причем они находятся в ядрах в связанном состоянии.

Как можно видеть на рис. 7, в недрах железо-каменных планет земной группы избыточное

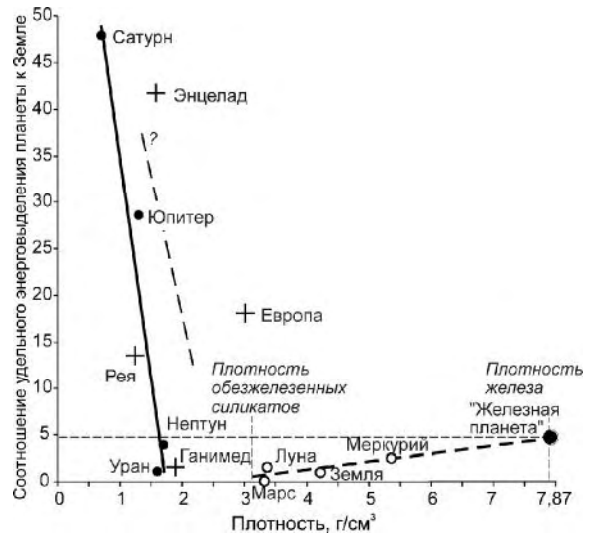


Рис. 7. Соотношение выделения энергии на единицу массы в недрах планет по отношению к Земле в зависимости от их плотности

удельное энерговыделение на единицу массы, в целом, возрастает с плотностью. Плотность этих планет определяется главным образом процентным содержанием железной фракции, которое различно от планеты к планете. Поэтому естественно будет предположить большую чувствительность данного химического элемента к воздействию со стороны галактического теплопроизводящего фактора. Обратим внимание, что линия зависимости удельного избыточного тепловыделения в недрах планет земной группы приближается к нулевым значениям избыточного тепловыделения вовсе не при нулевых значениях плотности, а при плотностях 3,1–3,3 г/см³. Эти плотности близки (но все же несколько ниже) плотностям обезжелезненных конечных членов изоморфных рядов оливина и пироксена, т. е. плотности силикатных оболочек планет при условии полного отсутствия в их составе железа. Следовательно, чувствительность к воздействию галактического тепловыделяющего фактора остальных элементов силикатных оболочек (O, Si, Mg, Al) в разы ниже чувствительности железа. Приходим к важному выводу: не только ядра планет, но и их мантии подвергаются избыточному, внешней природы, разогреву преимущественно по причине присутствия там атомов железа. Очевидно также, что в недрах планеты, целиком состоящей из железа, избыточное удельное выделение тепла примерно в пять раз превосходило бы земное, составляя примерно $1,8 \cdot 10^{-11}$ Вт/кг. Эта оценка может быть важной при постановке будущих физических экспериментов.

Можно отметить, что Меркурий, являясь наиболее железной из планет земной группы, обладает довольно значительным магнитным полем,

наличие которого трудно объяснимо, поскольку имеющиеся модели внутреннего строения этой весьма малой по своим размерам планеты и ее теплового режима не предполагают возможности существования там жидкого ядра и механизма магнитного динамо без введения ряда экзотических условий. Этот вопрос достаточно активно дискутируется [3, 31].

При том, что в химически однородной среде интенсивность воздействия галактического тепловыделяющего фактора на недра планет падает по мере прохождения через вещество, в статье [2] было установлено, что удельное избыточное тепловыделение на единицу массы в земном ядре примерно в два раза превышает таковое в каменной оболочке Земли. Этот факт также явственно и однозначно свидетельствует в пользу более высокой чувствительности железа. Можно заметить также, что содержание железа в земном ядре в 6–7 раз больше его содержания в мантии, а не в два раза. То есть мантия Земли подвергается более интенсивному воздействию со стороны галактического тепловыделяющего фактора, чем ее ядро, до которого галактический тепловыделяющий фактор доходит в ослабленном состоянии.

Солнце

Длительное время непонятными оставались источники солнечной энергии. Однако в 2001 г. с помощью экспериментов по регистрации солнечных нейтрино было окончательно доказано, что энергия Солнца практически полностью производится с помощью термоядерных реакций, как это долгое время и предполагалось. Таким образом, в недрах Солнца остается мало места каким-либо дополнительным источникам энергии. Можно оценить роль космического источника энергии в недрах Солнца, аналогичного тому, который предлагается нами для планетных недр. Если приведенная выше зависимость избыточного энерговыделения больших планет от массы космического тела справедлива и для диапазона солнечных масс (который на 3 порядка выше), зная параметры Солнца, можно вычислить мощность космической печи солнечных недр. Она составляет примерно $1 \cdot 10^{-4}$ суммарной мощности его внутренних источников энергии, т. е. вклад "космической печи" в недрах Солнца невелик, что подтверждается и данными по потоку нейтрино.

Выводы

Подытоживая изложенное, можно заключить следующее.

1. Проявления "избыточного" тепловыделения в недрах космических тел – явление, характерное для Солнечной системы.

2. Мощность "космических печек" больших

планет (Земля и планеты-гиганты) связана степенной зависимостью с массой планеты (показатель степени равен 1,7).

3. Интенсивность, с которой космический теплопроизводящий фактор взаимодействует с веществом планетных недр, по-видимому, зависит от химического состава (предположительно – содержания водорода и железа).

4. В недрах планет Солнечной системы существует единая структура конвективных потоков, формируемая внешним влиянием космического тепловыделяющего фактора, главной особенностью которой являются экваториальные горячие пояса с двумя входящими в них и антиподально расположенными восходящими конвективными потоками (суперплюмами).

5. Наличие широтной зависимости тепловыделения на малых планетах может говорить о том, что даже слой вещества толщиной в несколько сотен километров поглощает значительную долю проникающего сквозь него космического фактора, вызывающего выделение энергии.

Автор выражает свою признательность акад. НАН Украины В. М. Шестопалову и канд. геол.-минерал. наук С. П. Ольштынскому (Институт геологических наук НАН Украины) за полезные замечания и детальный анализ рукописи этой статьи.

1. *Макаренко А. Н.* Космический фактор "избыточного" тепловыделения в недрах Земли и планет. Ст. 1. Космические ритмы в геологической летописи // Геол. журн. – 2011. – № 3. – С. 116–130.
2. *Макаренко А. Н.* Космический фактор "избыточного" тепловыделения в недрах Земли и планет. Ст. 2. Пространственно-временные закономерности распределения тепловыделяющих зон в недрах Земли // Геол. журн. – 2011. – № 4. – С. 83–96.
3. *Anderson B. J., Acuna M. H., Korh H. et al.* The Magnetic Field of Mercury // Space Science Reviews. – 2010. – Vol. 152. – P. 307–339.
4. *Aumann H. H., Gillespie C. M., Low F. J.* The internal powers and effective temperatures of Jupiter and Saturn // Astrophys. J. – 1969. – Vol. 157. – L69–L72.
5. *Basilevsky A. T., Werner S. C., Neukum G. et al.* Geologically recent tectonic, volcanic and fluvial activity on the eastern flank of the Olympus Mons volcano, Mars // Geophys. Res. Lett. – 2006. – Vol. 33. – P. 13201.
6. *Bills B. G.* Tidal Dissipation in Mercury // Abstracts of the 33rd Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 11-15, 2002. – Houston, Texas, – 2002. – Abstract № 1599.
7. *Carr M. H.* The Volcanoes of Mars // Scientific American. – 1976. – Vol. 234, № 1. – P. 32–43.
8. *Crumpler C. S., Aubele J. C., Senske D. A. et al.* Volcanoes and Centers of Volcanism on Venus // Venus II, University of Arizona Press. – Tucson, AZ, – 1997. – P. 1245–1289.

9. *Doggett T., Figueredo P., Greeley R. et al.* Global geologic map of Europa // Abstracts of the 38th Lunar and Planetary Science Conference, held March 12-16, 2007 in League City, Texas. – 2007. – LPI Contribution № 1338. – P. 2296.
10. *Figueredo P. H., Chuang F. C., Kirk R.L. et al.* Evidence for a cryovolcanic origin of Europa's "mitten" feature // Abstracts of the 31st Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 13-17, 2000. – Houston, Texas, 2000. – Abstract № 1026.
11. *Glukhovskiy M. Z., Moralev V. M.* Hot Belts of Venus and the Early Earth // Abstracts of the 25th Lunar and Planetary Science Conference, held in Houston, TX, 14-18 March 1994. – 1994. – P. 431–432.
12. *Hagermann A.* Planetary heat flow measurements // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2005. – Vol. 363. – P. 2777–2791.
13. *Hartmann W. K.* Martian cratering VI: Crater count isochrons and evidence for recent volcanism from Mars Global Surveyor // Meteoritics and Planetary Science. – 1999. – Vol. 34. – P. 167–177.
14. *Hartmann W. K., Neukum G.* Cratering chronology and the evolution of Mars // Space Sci. Rev. – 2001. – Vol. 96. – P. 165–194.
15. *Hauck S. A., Phillips R. J.* Thermal and crustal evolution of Mars // J. Geophys. Res. – 2002. – Vol. 107(E7). – № 5052. – 19 p.
16. *Helfenstein P., Cook A. F.* Active venting of Europa? Analysis of a transient bright feature // Abstracts of the 15th Lunar and Planetary Science Conference, held in Houston, TX, March 12-16, 1984. – 1984. – P. 354–355.
17. *Kite E.S., Matsuyama I., Manga M. et al.* True polar wander driven by late-stage volcanism and the distribution of paleopolar deposits on Mars // Earth and Planetary Science Letters. – 2009. – Vol. 280. – P. 254–267; <http://www-eaps.mit.edu/faculty/peron/files/Kite09.pdf>.
18. *Konopliv A.S., Asmar S.W., Carranza E. et al.* Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector Mission // Icarus. – 2001. – Vol. 150. – Issue 1. – P. 1–18.
19. *Kostama V.-P.* The crowns, spiders and stars of Venus: Characterization and assessment of the geological settings of volcano-tectonic structures on Venus // Report series in physical sciences. – University of Oulu, Linnanmaa, Finland, 2006. – Report № 42. – P. 122; <http://herkules.oulu.fi/isbn9514283171/isbn9514283171.pdf>.
20. *Machetel Ph., Rabinowicz M., Bernardet P.* Three-dimensional convection in spherical shells // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. – 1986. – Vol. 37. – Issue 1. – P. 57–84.
21. *Mitchell K.L., Wilson L.* Mars: a geologically active planet // Astronomy and Geophysics. – 2003. – Vol. 44, №4. – P. 4.16–4.20.
22. *Morrison D., Cruikshank D.P.* Temperatures of Uranus and Neptune at 24 Microns // Astrophys. J. – 1973. – Vol. 179. – P. 329–331.
23. *Nimmo F., Bills B. G., Thomas P. C., Asmar S. W.* Geophysical implications of the long-wavelength topography of Rhea // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – E10008. – 11 p.
24. *Ruiz J., Tejero R.* Heat flows through the ice lithosphere of Europa // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. – Issue E12. – P. 29283–29290.
25. *Schrenk P. (2008)* Scars from Europa's polar wandering betray ocean beneath // <http://www.lpi.usra.edu/science/schrenk/europaCropCircles/>.
26. *Schrenk P., Matsuyama I., Nimmo F.* True polar wander on Europa from global-scale small-circle depressions // Nature. – 2008. – Vol. 453. – Issue 7193. – P. 368–371.
27. *Schubert G., Zhang K., Kivelson M. G., Anderson J. D.* The magnetic field and internal structure of Ganymede // Nature. – 1996. – Vol. 384. – P. 544–545.
28. *Spencer J., Howett C., Pearl J., Segura M.* Cassini Circs Team. High-Resolution Observations of Enceladus' Endogenic Thermal Radiation in 2008 // American Geophysical Union, Spring Meeting, Toronto, Ontario, May 2009. – 2009. – Abstract № P33A-04.
29. *Stevenson D. J.* Planetary science: Volcanoes on Quaoar? // Nature. – 2004. – Vol. 432. – Issue 7018. – P. 681–682.
30. *Wang Hong-zhang.* On the internal energy source of the large planets // Chin. Astronom. Astrophys. – 1990. – Vol. 14, № 4. – P. 361–370.
31. *Williams J.-P., Aharonson O., Nimmo F.* Powering Mercury's dynamo // Geophys. Res. Lett. – 2007. – Vol. 34. – Issue 21. – L21201.
32. *Wilson L.* Evidence for episodicity in the magma supply to the large Tharsis volcanoes // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106. – Issue E1. – P. 1423–1434.
33. *Xiao L., Greeley R., Williams D.* Volcanism on Mars: integrated constraints and implications for martian thermal history // Abstracts of the 39th Lunar and Planetary Science Conference, held in League City, TX, March 10–14, 2008. – 2008. – Abstract 1038. – P. 1038.
34. *Zeilik M., Gregory S.* Introductory Astronomy and Astrophysics, 4th ed. Saunders College Publishing, Fort Worth, TX. – 1998. – 346 p.
35. *Zieth R., Benkhoff J.* Mercury's Thermal Evolution, Dynamical Topography and Geoid // 41st Lunar and Planetary Science Conference, held March 1-5, 2010 in The Woodlands, Texas. – 2010. – № 1533. – P. 1728–1729.

Науч.-инж. центр
радиогидрогеоэкол. полигон. исслед.
НАН Украины,
Киев
E-mail: poshuk@mail.ru

Статья поступила
12.01.12