

Вулканизм на планетах и спутниках Солнечной системы

Автор:	Дигас Екатерина Максимовна 8 «А» кл. СОШ №27 г. Ангарска
Научный руководитель:	Климушкин Дмитрий Юрьевич, КФМН, Зав. лаб. ИСЗФ
Руководители:	Пашковская А. В. Учитель физики СОШ №27 г. Ангарска. Голубцова Т.В. доцент кафедры АТП АГТУ

г.Иркутск, 2016 г.

Оглавление

Введение	3
Часть 1. Вулканизм на планетах земной группы.....	4
Меркурий	6
Венера.....	7
Марс.....	8
Часть 2. Криовулканизм на спутниках планет-гигантов и объектах внешней Солнечной системы.....	10
Спутники Юпитера.....	11
Ио	12
Расчет движения спутников по орбитам вокруг Юпитера.....	14
Расчет приливных сил на Ио.....	15
Электрическая модель криовулканизма на Ио	16
Спутники Сатурна.....	17
Энцелад	18
Радиолитическая модель криовулканизма [7]	20
Вулканизм на Титане.....	21
Вулканизм на Тритоне.....	21
Вулканизм на спутниках Урана.....	22
Вулканизм на Плутоне	23
Вулканизм на Хароне	24
Заключение	26
Литература	27
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	32
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	34

Введение

Явление земного вулканизма известно очень давно, с тех пор, когда человек только начал осознавать себя, как часть природы. Это грозное, неуправляемое явление, которое меняет облик земной поверхности и может служить причиной катастрофических разрушений. Исследования планет Солнечной системы показали, что это явление характерно в той или иной степени и для наших космических соседей.

В состав Солнечной системы входит 8 планет, около 150 их спутников, несколько десятков тысяч астероидов и комет, а также бесчисленные обломки и пыль в межпланетном пространстве. Современные технические средства позволяют получать фотографии поверхности других планет, а также химический состав поверхности или атмосферы.

В своей работе я рассматриваю и анализирую внеземную вулканическую деятельность на основании данных, полученных исследовательскими космическими аппаратами Cassini, Voyager и New Horizons.

В первой части представлен обобщенный обзор планет солнечной системы, чтобы проанализировать их сходство, отличия и проявления вулканизма. Обнаружение реликтового вулканизма на поверхности Меркурия и Марса и даже некоторые признаки современного венерианского вулканизма представляются закономерным аналогом активности земных процессов.





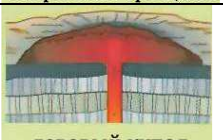


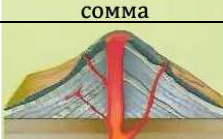

Наиболее интересны и неожиданные открытия были сделаны при помощи космических аппаратов, исследовавших отдаленные, внешние по отношению к Земной орбите, объекты нашей Солнечной системы. Эти данные, фотоснимки и измерения показали наличие активной вулканической деятельности на спутниках планет-гигантов и удаленных объектах Солнечной системы, таких как Плутон и Харон. Это явление получило название криовулканизма.

Во второй части своей работы я провожу анализ деятельности криовулканов, чтобы рассчитать скорости извержений вулканов на Ио и приливные силы для нескольких положений спутников Юпитера, используя данные о периоде обращения Ио и других галилеевых спутников и данные о высоте выброса вулканического материала.

Часть 1. Вулканизм на планетах земной группы.

Вулканизм на Земле – явление грандиозное и заметное. Его начали изучать несколько веков назад, и сейчас ученые располагают огромной базой знаний по этому вопросу. С точки зрения структуры, внешнего вида и механизма образования вулканы можно разделить на типы. Различные типы вулканов [1] приведены в табл. 1

Таблица 1. Типы вулканов

 кальдера	Кальдер – значительный провал у вершины вулкана, который образован обрушением верхней части магматического очага. Обычно круглый или в форме подковы, если смотреть сверху
 шлаковый конус	Шлаковый конус – образуется в результате накопления частиц магмы (шлак), которые выпадают вокруг жерла или кратера вулкана после извержения во время умеренной вулканической деятельности
 сложный вулкан	Сложный вулкан – вулканическая структура, имеющая два или более жерла, лавовых куполов или стратовулкана, которые часто формируются в разное время
 жерловая трещина	Жерловая трещина – это вулканическая структура, которая состоит из накопленного вулканического материала по бокам трещин (как правило, возникают в местах разломов земной коры).
 лавовый купол	Лавовый вулкан образуется путем накопления лавы в куполе с крутыми склонами над эруптивным отверстием.
 щитовой вулкан	Щитовой вулкан – это большая вулканическая структура с длинными пологими склонами, образованными большей частью из лавовых потоков.
 сомма	Сомма – это тип вулкана, состоящий из двух вулканических конусов, один из которых сформировался внутри другого
 стратовулкан	Стратовулкан состоит из различных слоев, материалом которых является лава и пирокластические потоки.
 туфовый конус	Туфовый вулкан – это конус с довольно крутыми склонами – состоит из мелкозернистых вулканических осколков, образовавшихся во время взрыва вулкана в результате взаимодействия лавы и воды.

Важной характеристикой вулканической деятельности является тип извержения. Типы вулканических извержений зависят от обилия летучих компонентов в магме, ее температуры и скорости

подъема к поверхности. Разные сочетания этих характеристик приводят к нескольким основным типам извержений. [14]

По типу извержения вулканы делятся на группы, [1] представленные в табл. 2:

Таблица 2. Типы извержений

Тип извержения	Характеристика извержения	Примеры	Вид вулкана
1. Гавайский	Выбросы очень жидкой высокоподвижной базальтовой лавы, формирующей огромные, плоские щитовые вулканы	Вулкан Муана Лоа, Гавайские острова	
2. Стромболианский	Вязкая основная лава, выбрасывается сильными выбросами из жерла, образуя короткие и более мощные потоки. При взрывах формируются шлаковые конусы и шлейфы в виде скрученных вулканических болей.	Вулкан Строумбели, Липарские о-ва	
3. Плинианский	Мощные, внезапные взрывы, выбросы огромного кол-ва тefры – образование кальдеры.	Вулкан Кракатау Везувий, ост. Сицилия	
4. Пелейский	Образование грандиозных, раскаленных лавин или палящих туч. (вязкая лава).	Вулкан Мон Пеле, Безымянный, Камчатка (1956)	
5. Газовый	В воздух выбрасываются лишь обломки уже древних, более твердых парод.	Вулкан Таал на Филиппинах (1965)	

Расположение вулканов на поверхности земного шара не случайное. В основном, вулканические пояса располагаются вдоль разломов тектонических плит, т. е. тесно связаны с литосферой Земли. На рис. 1 активные вулканы Земли показаны красными точками. Отчетливо просматривается пояса их расположения.



Рис.1 Тектонические плиты и вулканическая активность на Земле.

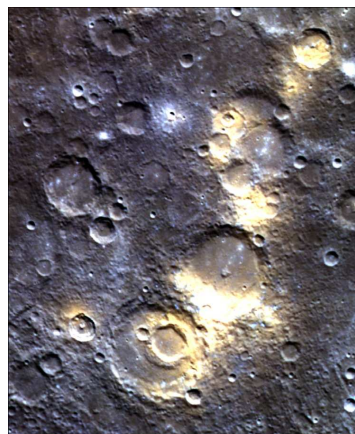
Меркурий

Самая близкая к Солнцу планета – Меркурий (удалена от Солнца всего на 58 тыс. км). Меркурий хорошо виден на небосклоне сразу после захода Солнца (на западе) или перед его восходом (на востоке), по яркости он слегка уступает Венере. Серьезные исследования Меркурия начались в 1974 году с помощью американского космического зонда МАРИНЕР-10.



Вся поверхность планеты покрыта сплошной сеткой кратеров и на вид неотличима от хорошо известной поверхности Луны. Возраст поверхности Меркурия очень велик и относится в основном к событиям, происходившим $3,9 \cdot 10^9$ лет назад. Рельеф планеты сформировался в основном при ударах крупных и мелких метеоритов о поверхность. При этом выделялась огромная мощность, и взрывные процессы разогревали поверхность и способствовали появлению глубоких трещин, по которым поднималась расплавленная лава.

Исследования Меркурия продолжились в 2008 году, когда к орбите Меркурия в рамках проекта НАСА был направлен космический аппарат Messenger. На свежих снимках ближайшей к Солнцу планеты исследователи обнаружили кратер, получивший предварительное имя Twin.



В центре этого образования диаметром 260 километров исследователи нашли область поверхности, покрытую небольшим (по сравнению с остальной поверхностью планеты) количеством мелких кратеров. Используя среднее значение количества метеоритных "осадков" на Меркурии, астрофизики оценили возраст грунта примерно в миллиард лет.

Это открытие является подтверждением тектонической активности на Меркурии в относительно недалеком прошлом. Ранее предполагалось, что все вулканические процессы на этой планете прекратились примерно 3 миллиарда лет назад.

В свете новых результатов, меркурианские шрамы - хребты, встречающиеся на всей территории планеты, можно рассматривать как результат тектонической активности. Ранее предполагалось, что эти хребты образовались в результате уменьшения объема Меркурия из-за остывания его внутренней части.

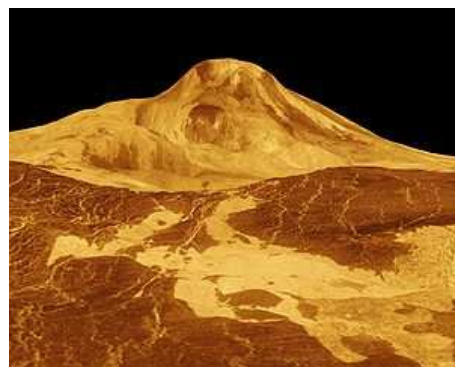
Венера

Вторая по порядку от Солнца планета - Венера, находящаяся от него на расстоянии $108,2 \cdot 10^6$ км. Орбита почти круговая, радиус планеты 6050 км, средняя плотность $5,24 \text{ г/см}^3$. В противоположность Меркурию найти ее очень легко. По силе блеска Венера - третье светило неба, если первым считать Солнце, а вторым - Луну.

Верхние слои облачного покрова Венеры практически непроницаемы для инфракрасного теплового излучения планеты. Излучение самих облаков в космос почти полностью определяет тепловой баланс.

Венера - планета земной группы, поверхность которой почти полностью состоит из застывшей лавы. Это свидетельствует о бурной вулканической деятельности в относительно недавний период времени по геологическим меркам. Целенаправленные исследования геологии поверхности Венеры начались с появлением космических аппаратов, эпохи практического изучения космических объектов (см. Приложение 1, Табл. 2).

Поверхность Венеры содержит признаки прежнего активного базальтового вулканизма с щитовидными и композитными вулканами, которые схожи с земными (см. табл.1), но на формирование которых оказали влияние плотная массивная атмосфера и приповерхностная температура около 475 °С. По сравнению с Луной, Марсом или Меркурием, на поверхности Венеры практически нет небольших ударных кратеров, что объясняется защитным действием плотной толстой атмосферы. Средних и больших кратеров тоже меньше, чем на Луне и Меркурии, что объясняется молодостью поверхности. На поверхности Венеры очень много вулканов, но почти все они давно потухшие. Косвенные признаки относительно недавней активности были замечены только у горы Маат, самый высокий вулкан Венеры, высота его над уровнем планеты – 11 км, а диаметр основания этого вулкана – 600 км. Наиболее типичными для Венеры являются щитовые вулканы гавайского типа [см. табл. 1].



Главной движущей силой вулканических процессов на Венере по результатам анализа «Венеры 15,16» являются вертикальные восходящие и нисходящие движения вещества недр планеты за счет тепловых неоднородностей – так называемых «горячих пятен».



Вулканизм на Венере имеет свои особенности. Такие структуры не встречаются больше нигде в Солнечной системе, - это «новы», «арахноиды» и «венцы» [13]. Один из уникальных и наиболее интересных – венцы. Так называются круглые возвышенности диаметром от 100 до 600 км, состоящие из кольца горных гряд с плато в центре. Вокруг многих венцов обнаружены застывшие лавовые потоки, расходящиеся в разные стороны в виде широких «языков». Венцы могут служить основными источниками, через которые на поверхность планеты поступало расплавленное вещество из недр. Застывая, эти лавы сформировали равнинные участки, занимающие теперь почти всю территорию Венеры. .

По данным автоматической станции Venus Express на Венере имеется по крайней мере 9 «горячих точек» (hot shots), которые возникают в местах выхода восходящих потоков из недр планеты. Аналогичные «горячие точки» есть и на Земле, например, в районе Гавайских островов.

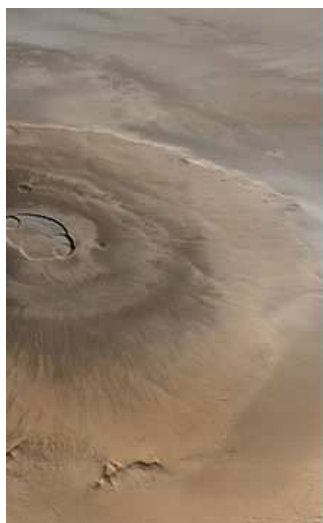
Кратер Зея – типичный кратер на Венере диаметром 22 км. Валы таких кратеров и выбросы из них – светлые, из-за сильного рассеивания радарного сигнала, обусловленного шероховатостью поверхности, покрытой обломками каменного материала, выброшенного при взрыве во время формирования кратера.

Марс

Марс — четвёртая по удалённости от Солнца и седьмая по размерам Планета Солнечной системы, масса планеты составляет 10,7% массы Земли. По линейному размеру Марс почти вдвое меньше Земли — его экваториальный радиус равен 3396,9 км (53,2 % земного). Площадь поверхности Марса примерно равна площади суши на Земле. Полярный радиус Марса примерно на 20 км меньше экваториального, хотя период вращения у планеты больший, чем у Земли, что даёт повод предположить изменение скорости вращения Марса со временем.

Марс имеет самые большие вулканы в Солнечной системе. Он также имеет целый ряд других вулканических особенностей. К ним относятся большие вулканические конусы, необычные структуры вулканов, «моря» (вулканические равнины). Тем не менее, вулканические структуры не являются общими. Обнаружено не менее 20 вулканов на Марсе, и только 5 из них являются гигантскими щитами (см. табл. 1). Кроме того, вулканизм происходит в основном в трех регионах.

Основной вулканизм на Марсе представлен базальтовыми равнинами, сходными с «лунными морями», сформировавшимися 2 – 3,5 млрд. лет назад. Отдельные гигантские



вулканы, расположенные в приэкваториальной зоне Марса сформировались позже, примерно 1-2 млрд. лет назад. Постепенно этот процесс прекращался, в настоящее время на Марсе не наблюдается какой-либо вулканической и тектонической деятельности. Скорее всего, это вызвано постепенным остыванием недр и поверхности. Единственное, что надеются обнаружить исследователи – это признаки гидротермальной активности. Основным способом изучения вулканизма является анализ характерных форм и типов рельефа поверхности. Обычно это крупные трещины, разломы, ущелья с ветвящимися каньонами огромной протяженности (до сотен километров в длину, десятки в ширину), крупные куполообразные поднятия. Крупнейшая система разломов Долины Маринер, тянется вблизи экватора на 4000 км при ширине в 4-5 км.

Для Марса характерны крупные вулканические сооружения типа щитовых вулканов, вулканических куполов и провальных кальдер [1], что отличает его от других планет. В то же время на Марсе широко развит площадной вулканизм (как на Земле и Луне).

Но самый высокий из четырех вулканов — гора Олимп. На рис. 1 в сравнимом вертикальном масштабе показаны высочайшая вершина земного шара: Джомолунгма (Эверест), 8848 м, и гора Олимп на Марсе, 27 км 400 м от подножья. Гора Олимп — вулкан, который специалисты относят к типу щитовых. Лава таких вулканов отличается жидкой консистенцией [2] и при извержениях растекается на большие расстояния.

Олимп — потухший вулкан. Он простирается на 540 км в ширину и имеет крутые склоны по краям высотой до 7 км. Длина вулканической кальдеры Олимпа — 85 км, ширина — 60 км. Глубина кальдеры достигает 3 км. Для сравнения — у крупнейшего вулкана Земли Мауна Лоа на Гавайских островах диаметр кратера составляет 6.5 км. Из-за огромной высоты атмосферное давление на вершине Олимпа составляет всего 2% от давления, характерного для среднего уровня марсианской поверхности.

Анализ снимков аппарата «Марс-Экспресс» [см. табл. 2 Приложения 1] показал, что самая свежая лава на склонах Олимпа имеет возраст около 2 млн. лет, то есть совсем недавно по геологическим меркам.

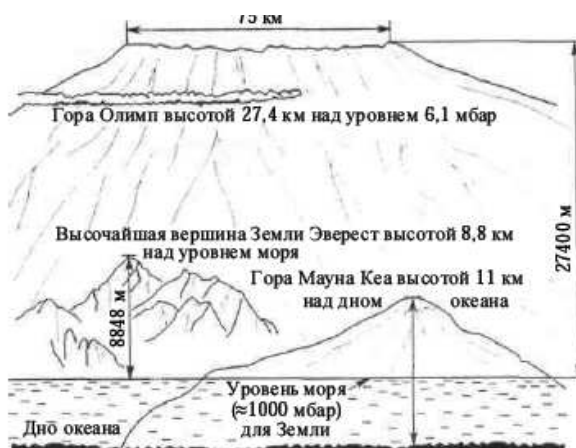
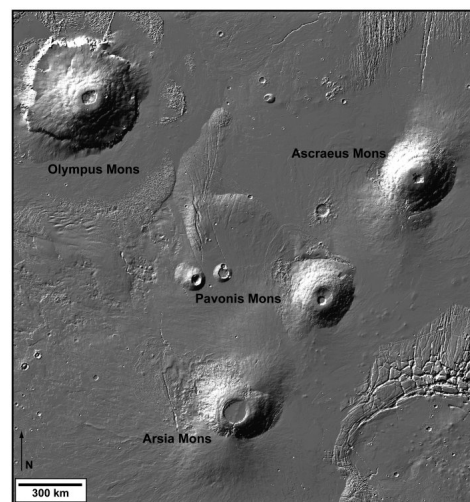


Рис. 1

Четыре гигантские вулканические вершины — гора Олимп и три вулканических конуса в области Фарсида. Они образуют почти правильный треугольник. Практически, все вулканические образования на Марсе интерпретируются как проявление базальтового (основного) вулканизма. По оценкам Марсианские лавовые потоки идентичны потокам базальтовых лав на Земле со сравнительно низкой вязкостью. Когда в поднимающейся магме мало летучих компонентов, извержения имеют спокойный характер без лавовых фонтанов и приводят к образованию низких вулканических построек, если извержения локализуются на одном месте на протяжении длительного времени, или к образованию лавовых потоков (лавовых равнин), если источники лав многочисленны и распределены по большой площади.

Крупнейшие вулканические районы Марса: Фарсида и Эллизий. Здесь находятся самые большие вулканы на планете: гора Олимп, гора Павлина, гора Арсия и гора Аскрийская. Они достигают 500 – 600 км в основании и более 20 км по высоте.



Часть 2. Криовулканизм на спутниках планет-гигантов и объектах внешней Солнечной системы

Криовулканизм — вид вулканизма на некоторых планетах и других небесных телах в условиях крайне низких температур окружающей среды. Вместо расплавленных скальных пород криовулканы извергают воду, аммиак, соединения метана — как в жидком, так и в газообразном состоянии.

Понятие «криовулканизм» появилось в связи с открытием активной вулканической деятельности на спутниках планет-гигантов и планет, настолько удаленных от Солнца, что Солнце выглядит с поверхности этих планет просто как яркая звезда и, естественно, не может изменить их поверхностную температуру ни на градус, т. е. предполагалось, что там царит вечный холод и мрак.

Впервые явление криовулканизма было обнаружено на спутнике Юпитера Ио.

Наблюдение и изучение криовулканизма началось тогда, когда космические исследовательские аппараты смогли достичь области планет-гигантов и их спутников и передать на Землю снимки поверхности и химический состав их атмосфер.

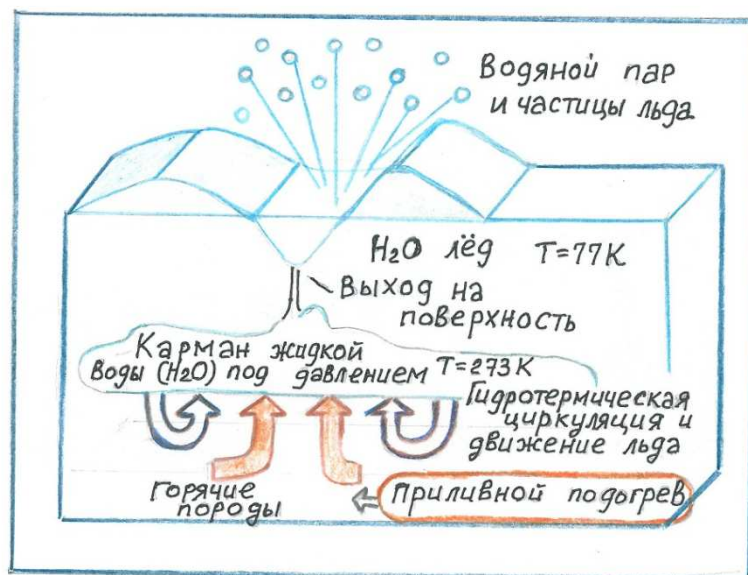


Рис. 2

На рисунке 2 показан механизм работы криовулкана. Эта модель использует гипотезу расплавленного ядра планеты, состоящего из скальных пород, воды в жидкой фазе поверхностного льда.

В группу планет гигантов входят: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Планеты-гиганты отличаются большим числом спутников. В настоящее время (поданным 2005 г.) известно; у Юпитера - 63 спутника, у Сатурна – 60, Урана - 27 и только у Нептуна - 13.

Спутники Юпитера

Из всех спутников Юпитера выделяются 4 галилеевых спутника: это Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Они отличаются большими размерами (от размера Луны до размеров Меркурия) и близостью к планете. В таблице 3 представлены галилеевы спутники.

Таблица 3. Основные физические характеристики спутников Юпитера

Имя	Расстояние до Юпитера (тыс. км)	Радиус (км)	Масса (кг)	Плотность г/см ³	Период обращения (час)	Орбит. Скорость (км/час)	Температура, К
Ио	422	1815	$8,94 * 10^{22}$	3,57	42	17, 334	90-110-130
Европа	617	1569	$4,8 * 10^{22}$	73,01	85	49,476	50-110
Ганимед	1070	2631	$1,48 * 10^{23}$	1,93	172	10,880	70-110-152
Каллисто	1883	2400	$1,08 * 10^{23}$	1,83	408	29520	

Используя данные таблицы 3, я разработала в программной среде ЛогоМиры модель системы «Юпитер – галелеевы спутники». (я не включила в модель спутник Каллисто, поскольку он оказывает наименьшее влияние на Ио». Моя программа позволяет запустить движение спутников, остановит их в любой момент и рассчитать для любой позиции расстояние между Ио, Ганимедом и Европой. При нажатии на кнопку «Tidal Heating» программа может рассчитать приливные силы на Ио со стороны Ганимеда и Европы. Экран с моделью спутников показан на рисунке 3

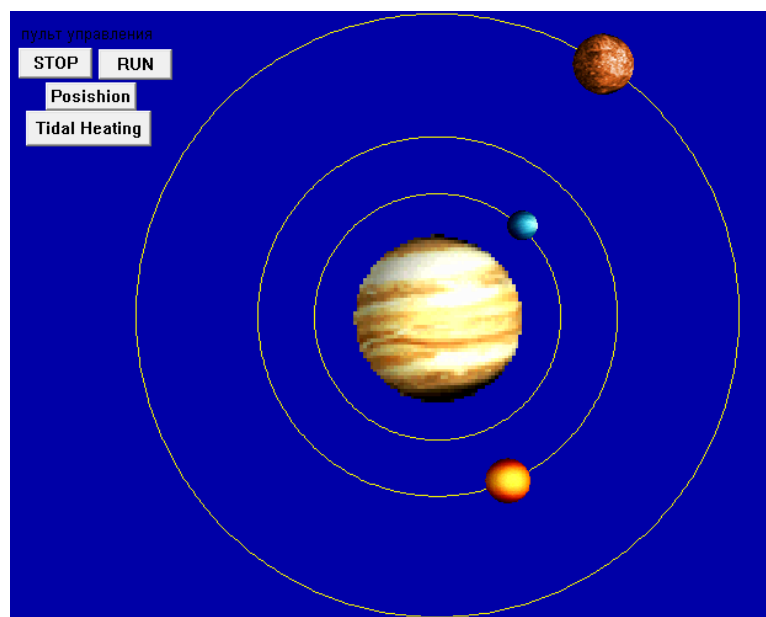


Рис. 3. Модель системы «Юпитер – галелеевы спутники» в программной среде Лого Миры. В верхнем левом углу – «пульт управления»

Ио

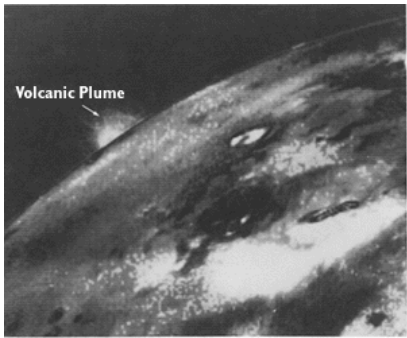

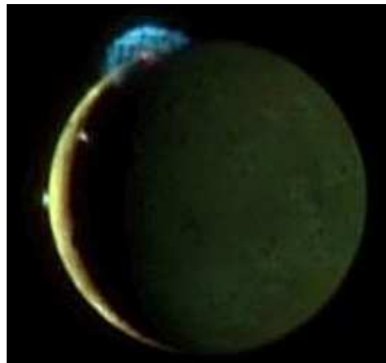
Ио – самый вулканически активный объект Солнечной системы. На ее желто-оранжевой поверхности обнаружено около 12 действующих вулканов, извергающих струи лавы и газа высотой до 500 км. Основной выбрасываемый газ – диоксид серы, замерзающий потом на поверхности в виде твердого белого вещества. Доминирующим желтым и оранжевым цветам этот спутник обязан соединениям серы. Поверхность вулканически активных областей Ио нагрета до 300° С.



Фото с сайта: <http://galspace.spb.ru/foto-3.file/3.html>

В отличие от земных вулканов, у которых мощные извержения эпизодичны, вулканы на Ио «работают» практически не переставая, хотя активность их может меняться. Вулканы и гейзеры выбрасывают часть вещества даже в космос. Ударные кратеры на Ио отсутствуют из-за интенсивной переработки поверхности. На ней зафиксированы каменные массивы высотой до 9 км.

Вулканическая активность Ио обусловлена гравитационным влиянием на нее других тел системы Юпитера. Сама гигантская планета своим мощным тяготением создала два приливных горба на поверхности спутника, которые затормозили вращение Ио так, что она всегда обращена к Юпитеру одной стороной – как Луна к Земле. Поскольку орбита Ио – не точный круг, горбы слегка перемещаются по ее поверхности, что приводит к разогреву недр. В еще большей степени деформация Ио вызывается приливным воздействием других массивных спутников Юпитера, Европы и Ганимеда. Гипотеза приливного разогрева Ио в настоящее время является доминирующей. Анализ снимков Ио, полученных с помощью космических зондов, позволяет сделать некоторые расчеты, чтобы оценить величины скорости извержения, а также величины приливных сил со стороны спутников Европа и Ганимед, оказывающих влияние на деформацию Ио.

		
Voyager 2, NASA, июль, , 1979 год	Voyager 2, NASA, 1981 год	New Horizons, 2 марта 2007 год

Графический анализ снимков, сделанных New Horizons с некоторыми временными интервалами позволяет определить высоту выброса криовулкана по соотношению концентрированного выброса и радиуса спутника (см. Приложение 3). Ускорение свободного падения для Ио можно рассчитать по формуле Ньютона $g = G \cdot M_{\text{Io}} / R_{\text{Io}}^2$,

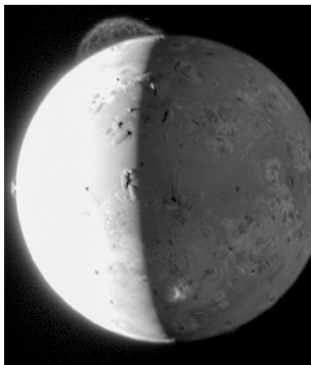

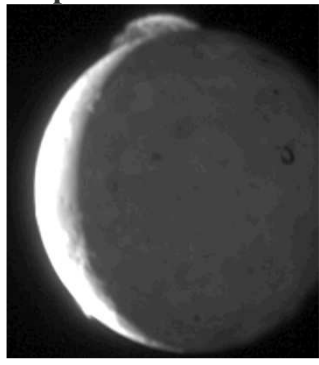
где $G = 6,6738 \cdot 10^{-11}$ – гравитационная постоянная,

M_{Io} – масса Ио, R_{Io} – радиус Ио

$$g = 6,6738 \cdot 10^{-11} \cdot 8,93 \cdot 10^{22} / (1,875 \cdot 10^3)^2 = 1,797 \text{ м/с}^2$$

Расчеты высоты выбросов криовулканов по снимкам, сделанным космическим аппаратом «Новые Горизонты» приведены в табл. 4

Таблица 4. Расчет скорости извержения

		Март 2007 
$h_1 = 295,47 \text{ км}$	$h_2 = 234,88 \text{ км}$	$h_3 = 206,25 \text{ км}$
$V = \sqrt{2gh}$		
$mV^2 / 2 = mgh$ $V_1 =$	$mV^2 / 2 = mgh$ $V_2 =$	$mV^2 / 2 = mgh$ $V_3 =$
$\sqrt{2 \cdot 1,796 \text{ м/с}^2 \cdot 295,47 \text{ км}}$ $= 1,03 \text{ км/с}$	$\sqrt{2 \cdot 1,796 \text{ м/с}^2 \cdot 234,88 \text{ км}}$ $= 0,918 \text{ км/с}$	$\sqrt{2 \cdot 1,796 \text{ м/с}^2 \cdot 206,25 \text{ км}}$ $= 0,86 \text{ км/с}$
Для сравнения скорость извержения на Земле около 500-600 м/с		

Расчет движения спутников по орбитам вокруг Юпитера.

Для расчета я использую упрощенную модель, т. е. принимаю условно, что орбиты спутников – круговые .

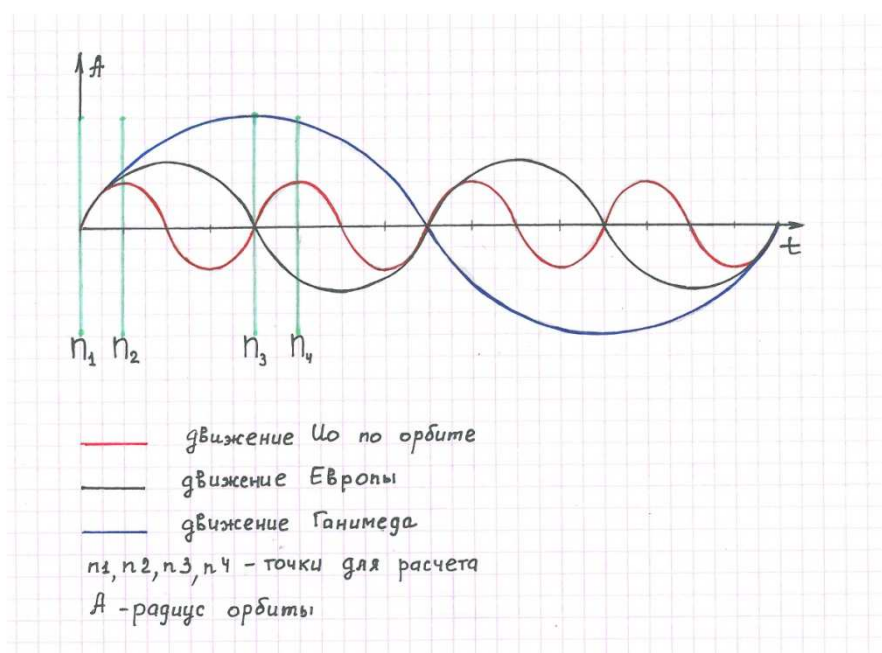
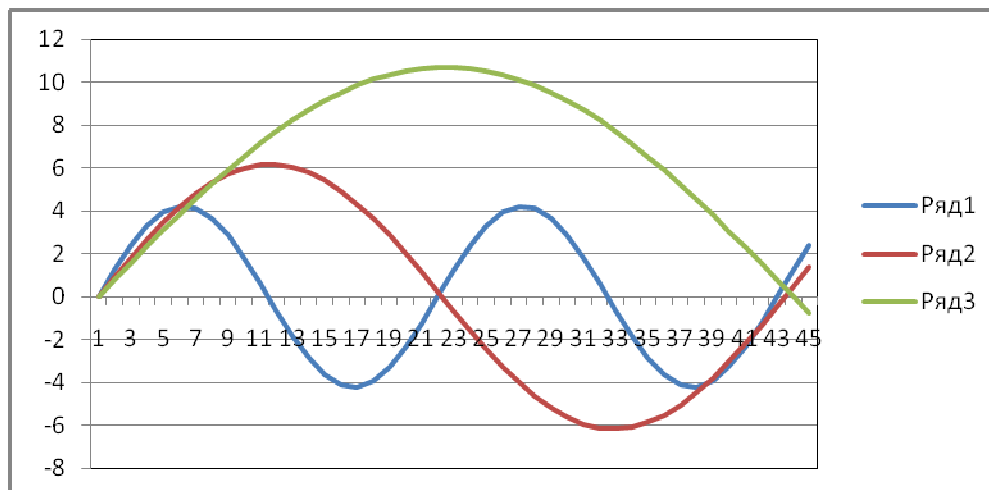


Рис. 4. График движения вокруг Юпитера спутников Ио, Европы и Ганимеда

Периоды обращения спутников Юпитера (Ио, Европа, Ганимед) относятся друг к другу приблизительно, как 1 – 2 – 4. Графики построены в соответствии с формулой:

$y = A \sin(\omega t)$, где $\omega = 2\pi f$, A – радиус орбиты спутника, $f = 1/T_{\text{обр}}$

Приливные силы на объект,двигающийся по орбите вокруг другого объекта, (луна вокруг планеты) – результат действия силы на ближнюю сторону от планеты и дальнюю сторону от планеты. Используя Ньютонский закон гравитации, можно посчитать приливные силы на спутник с учетом массы и радиуса планеты и расстояния от спутника до планеты. [8]

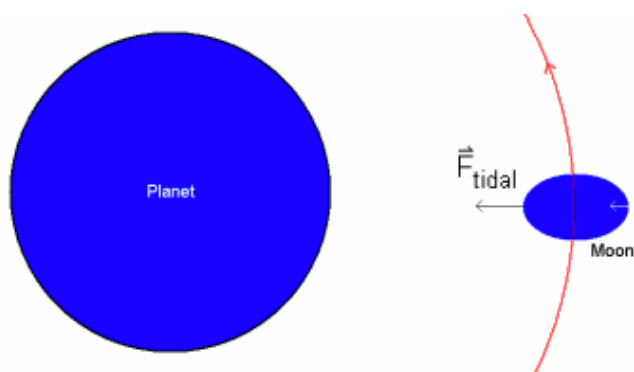


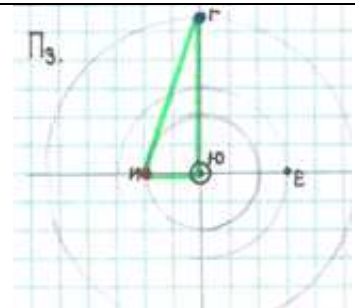
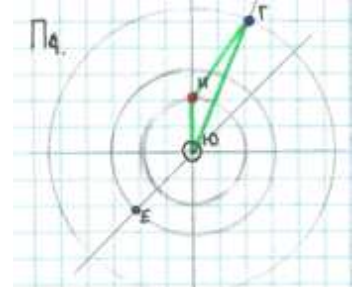
Рис. 5

Для разных позиций (n1,n2,n3,n4) в соответствии с графиком (рис. 4) можно рассчитать приливные силы, действующие на Ио со стороны Юпитера и ближайших спутников Европы и Ганимеда и сделать вывод, что приливные силы также меняются в соответствии с позициями спутников. Очевидно, это должно проявляться в интенсивности извержения. Приливная сила, действующая на Ио со стороны Юпитера – постоянна, если считать орбиту Ио круговой. В табл. 5_ приведены расчеты Приливных сил со стороны спутников Европы и Ганимеда.

Расчет приливных сил на Ио

Таблица 5. Расчет приливных сил

Для точ ки, п	Положение спутников во- круг Юпитера	Расстояние между спутниками $r = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos(\alpha)}$, где r – расстояние между Ио и Ганимедом; R_1 – радиус орбиты Ио; R_2 – радиус орбиты Ганимеда; α – угол между направлениями на Ио и Ганимед от центра вращения.	Приливные силы $F = G \frac{Mm}{(R_{Io} + R_G + r)^2}$, где F – приливные силы; G – гравитационное постоянное; M – масса Ганимеда; m – масса Ио; R_{Io} – радиус Ио; R_G – радиус Ганимеда.
n1		$r = 1070000\text{км} - 422000\text{км} = 648\,000\text{км}$	$F = 6,6738 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{8,94 \cdot 10^{22} \text{кг} \cdot 14,8 \cdot 10^{22} \text{кг}}{(1815\text{км} + 2631\text{км} + 648000\text{км})^2} =$ $6,6738 \cdot 10^{-11} \frac{132,312 \cdot 10^{44}}{652442^2} =$ $= 2,07 \cdot 10^{24} \frac{\text{М} \cdot \text{кг}}{\text{с}^2}$
n2		$r = \sqrt{422000^2 + 1070000^2 - 2 \cdot 422000 \cdot 1070000 \cdot 0,4147} = 973\,897,697\text{км}$	$F = 6,6738 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{8,94 \cdot 10^{22} \text{кг} \cdot 14,8 \cdot 10^{22} \text{кг}}{(1815\text{км} + 2631\text{км} + 973897,697\text{км})^2} =$ $= 0,92 \cdot 10^{24} \frac{\text{М} \cdot \text{кг}}{\text{с}^2}$

n3		$r = \sqrt{422000^2 + 1070000^2 - 2 \cdot 422000 \cdot 1070000 \cdot 0} = 1\,070\,083,214 \text{ км}$	$F = 6,6738 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{8,94 \cdot 10^{22} \text{ кг} \cdot 14,8 \cdot 10^{22} \text{ кг}}{(1815 \text{ км} + 2631 \text{ км} + 1\,070\,083,214 \text{ км})^2} = 0,76 \cdot 10^{24} \frac{\text{М} \cdot \text{кг}}{\text{с}^2}$
n4		$r = \sqrt{422000^2 + 1070000^2 - 2 \cdot 422000 \cdot 1070000 \cdot 0,8171} = 703\,398,416 \text{ км}$	$F = 6,6738 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{8,94 \cdot 10^{22} \text{ кг} \cdot 14,8 \cdot 10^{22} \text{ кг}}{(1815 \text{ км} + 2631 \text{ км} + 703\,398,416 \text{ км})^2} = 1,76 \cdot 10^{24} \frac{\text{М} \cdot \text{кг}}{\text{с}^2}$

В расчетах я не использую самую главную приливную силу со стороны Юпитера, т.к., если принять орбиту круговой, то можно считать, что она одинакова для всех позиций положения спутников на орбитах, и она действует постоянно, именно эта приливная сила растягивает спутник, (он деформируется в эллипсоид), на фоне этой главной силы действуют силы со стороны остальных спутников, вызывая дополнительные деформации, которые могут оказаться основными для формирования приливного разогрева Ио.

К сожалению, мы не располагаем хронологической последовательностью фотоснимков извержения для различных положений системы спутников так, чтобы можно было бы сопоставить рассчитанные приливные силы с положением Ио относительно других спутников и не можем сделать окончательных выводов об этой зависимости.

Очень интересной представляется также электрическая модель вулканизма на Ио.

Электрическая модель криовулканизма на Ио

Орбита Ио расположена в той части магнитосферы Юпитера, где потоки заряженных частиц особенно плотны — в центре радиационного пояса. Эта часть магнитосферы напоминает 100-кратно увеличенные в размерах радиационные пояса Земли. Плазма здесь сосредоточена в объеме, весьма приблизительно имеющем вид диска, который жестко связан с вращающимся магнитным полем планеты. Наряду с протонами и электронами в радиационных поясах Юпитера найдены ионы серы, кислорода и других элементов. Поскольку магнитосфера вращается быстро, часть заряженных частиц выбрасывается из нее центробежными силами и движется в межпланетной среде в виде медленного компонента космических лучей, пульсирующего с периодом вращения Юпитера (9 ч 55,5 мин). На орбите Ио находится ток горячей плазмы с температурой до 5×10^4 К.

Электрические и магнитные явления очень интенсивны в магнитосфере Юпитера. Среди чудес природы — мощный естественный электрический генератор, составная часть которого — спутник Ио. Только, пожалуй, «мощный» — не то слово. Между Юпитером и Ио течет ток в 5 млн. А. Мощность этой энергосистемы в 20 раз превышает суммарную мощность всех земных электростанций. Механизм, с помощью которого вырабатывается эта

фантастическая мощность, по-видимому, связан с весьма своеобразной структурой так называемых токовых оболочек в плазмосфере Юпитера (рис. 8). Такая структура давно была предсказана известным шведским ученым Х. Альфвеном для протопланетной туманности.

Причины вулканизма и его особенности представляется возможным объяснить, если учесть, что Ио нагревается текущим через нее сильным током, который возникает за счет разности потенциалов 400 кВ, наводимой движением спутника в магнитном поле Юпитера. Ток замыкается через окружающую Ио плазму и верхние слои атмосферы юпитера. Согласно измерениям «Вояджера-1» сила тока составляет ≈ 10 МА, так, что выделяющаяся джоулева энергия по меньшей мере сопоставима с приливной. Наибольшая разность потенциалов приложена между самой близкой и далекой относительно Юпитера точками на Ио.

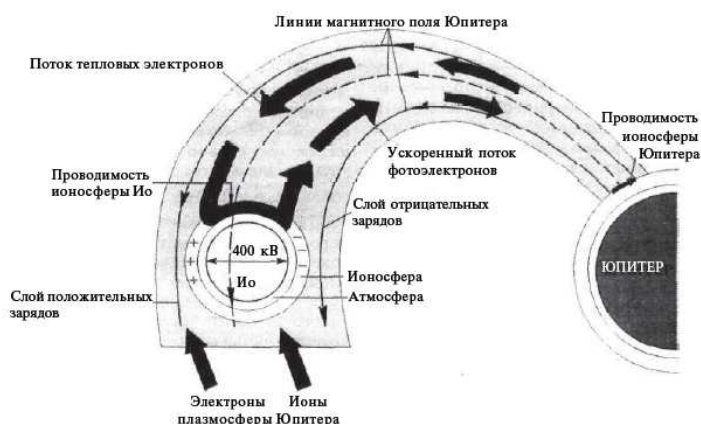


Рис. 6

Электрические процессы в магнитосфере на уровне орбиты Ио связаны с радиоизлучением, приходящим с Юпитера.

Тем не менее, на сегодняшний день основным механизмом обеспечения вулканизма на спутниках считается наличие приливных сил. Приливная сила, действующая на объект,двигающийся по орбите вокруг другого объекта, рассматривается как результат воздействия на близкую сторону от планеты и дальнюю сторону от планеты.

Спутники Сатурна

У Сатурна – огромное количество спутников. Часть из них расположены достаточно близко к Сатурну и двигаются вокруг него по орбитам, близким к круговым. А остальные, внешние, спутники движутся хаотически, их орбиты под разным углом наклонены, они движутся по орбитам в одном либо в другом (мы говорим — в прямом или обратном) направлении. Самый большой спутник – Титан, по массе и размерам он превосходит даже Меркурий. Среди Спутников особое внимание привлекает к себе Энцелад. Это сравнительно небольшой спутник,двигающийся по низкой орбите в области кольца Е.

Станция Cassini впервые обнаружила геологическую активность на Энцеладе (криовулканы на южном полюсе спутника) в 2005 году. В 2014 году ученые получили убедительные доказательства наличия локального подледного океана на спутнике. В 2015 году плане-

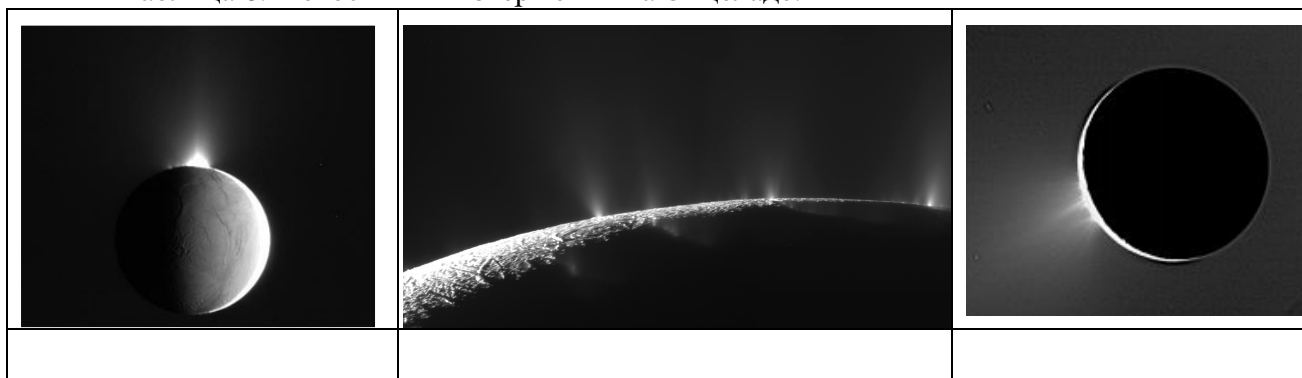
тологи показали, что океан на Энцеладе присутствует не только под поверхностью его южного полюса, а распространяется подо всей ледяной коркой спутника Сатурна.

Энцелад

Энцелад — шестой по размеру спутник Сатурна. Его открыл в 1789 году Уильям Гершель. Вокруг планеты спутник обращается за 32,9 часа. Радиус Энцелада примерно в 25, а масса — в 200 тысяч раз меньше, чем у Земли

Выбросы водяных фонтанов напоминают в определенной степени деятельность гейзеров на Земле с той лишь разницей, что у земных аналогов температура весьма высокая, а гейзеры Энцелада — холодные, разбрасывающие кристаллики льда. В таблице 6 приведены фотографии Энцелада, сделанные КА «Кассини»

Таблица 6. Фотоснимки извержения на Энцеладе.



Орбита Энцелада проходит по самой плотной области кольца Е. Эта область довольно узкая. Поэтому пополнение кольца веществом с Энцелада предполагалось ещё до полёта «Кассини». Его данные это подтвердили.

Летом 2015 «Кассини» подлетел совсем близко к Энцеладу, прошел через струи его выбросов, что позволило сделать химический анализ вещества, которое извергают криовулканы спутника. Оказалось, что химический состав выбросов из криовулканов спутника благоприятен для зарождения и развития жизни, а внутри океана, по всей видимости, гидротермальная активность нагревает воду до 90 градусов по Цельсию. Как показало компьютерное моделирование, в воде спутника Сатурна примерно такое же содержание поваренной соли, как и в земном океане, а также много соды и высокий уровень щелочности (показатель рН достигает 12).

Для энергетической подпитки такого криовулканизма требуется источник энергии мощностью, по меньшей мере, в шесть гигаватт. Самой распространенной версией стало приливное трение в «живой коре» спутника, имеющего эллиптическую орбиту.

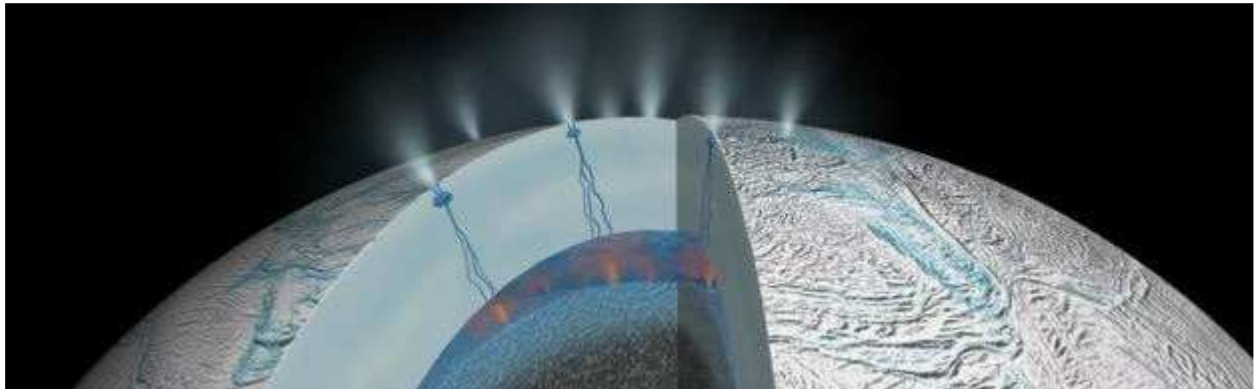


Рис.7

По новой модели тепло в недрах спутника формирует участки теплого льда, отдельные (самые нагретые) пузыри которого, будучи более плотными, чем холодный лед, начинают очень медленно подниматься вверх и вытесняют более плотный лед вниз.

Температура этих пузырей составляет около нуля по Цельсию. Но это много в сравнении с обычным льдом вне зоны «тигровых полос», который у поверхности спутника имеет температуру - 193° С. По мере подъема «лаваовые» ледяные пузыри начинают таять, в них формируется все больше и больше жидкости. Трение стен разломов вблизи поверхности луны добавляет тепла этим пузырям, из которых и берут свое начало фонтаны.

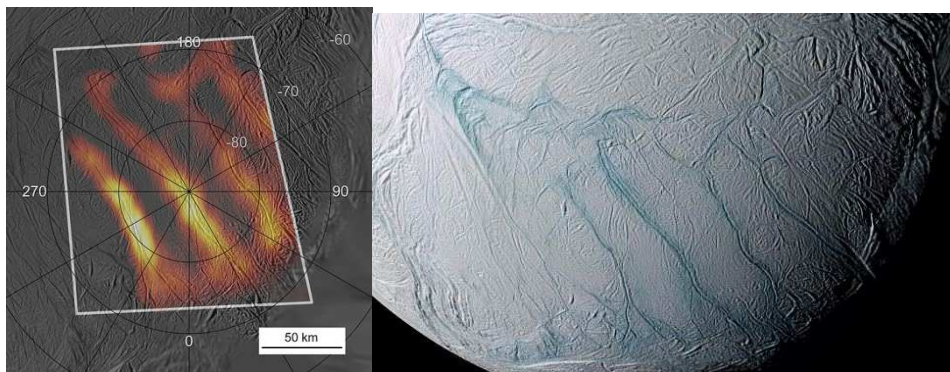


Рис.8 Тигровые полосы на Южном полюсе Энцелада

Радиолитическая модель криовулканизма [7]

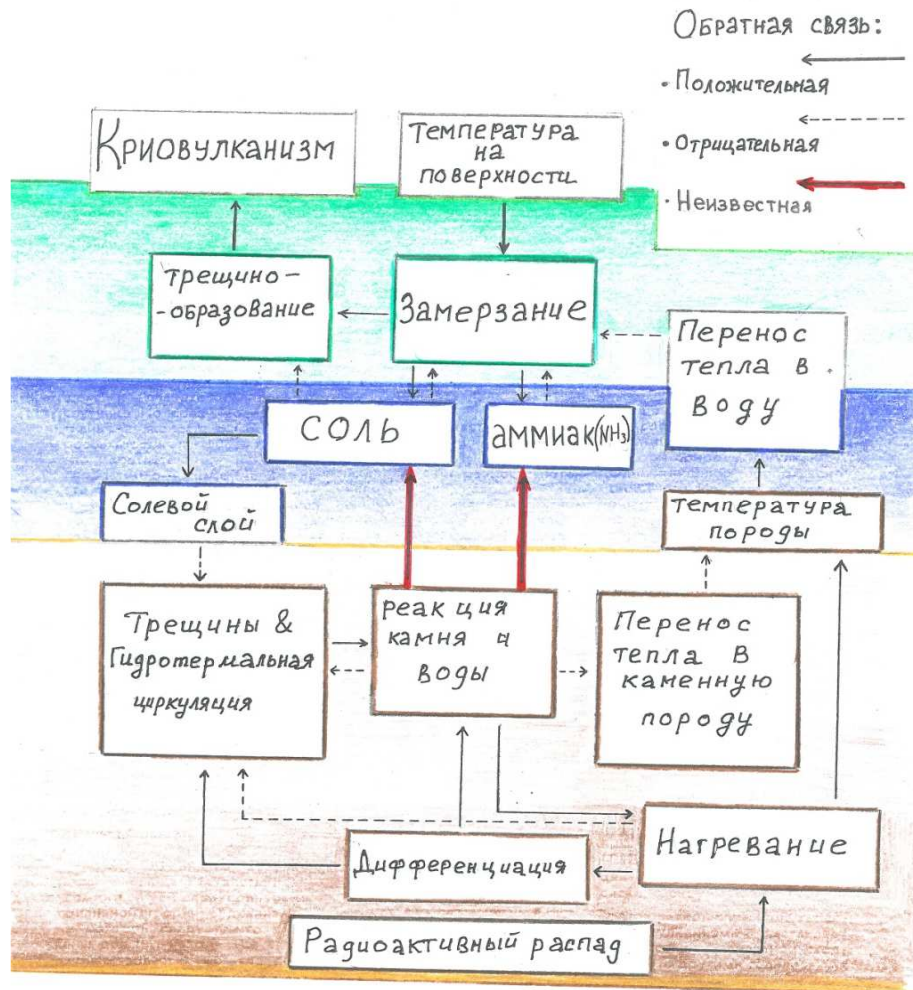


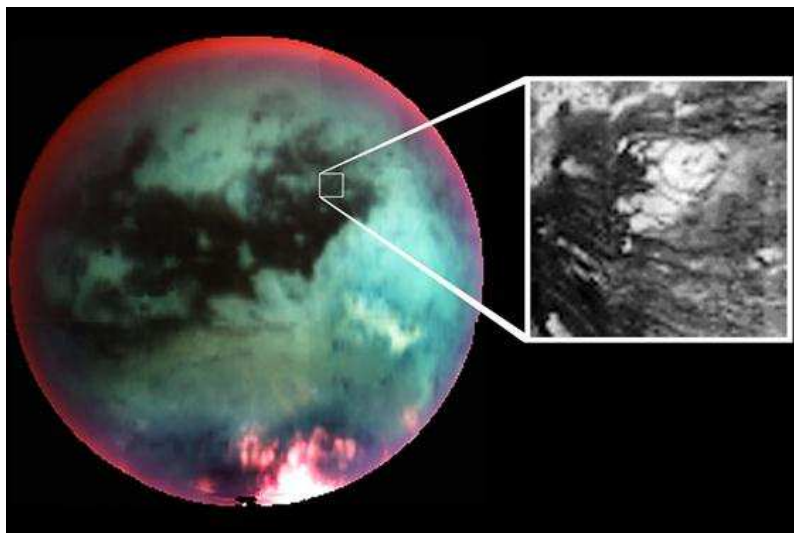
Рис. 9

Новая модель показывает, как химические процессы приводят в действие криовулканы и обеспечивают эпизодические выбросы газов на Энцеладе, а возможно и на всех других телах, включая Европу и объекты пояса Койпера. Водяной лед подвергается окислению из-за радиолитических химических реакций около-поверхностного льда, вызванных облучением. На контакте с обильными запасами восстановителей, таких как аммиак (NH_3), метан (CH_4) и другими углеводородами. Радиолитические окислители, такие как кислород (O_2) и пероксид водорода (H_2O_2) могут постоянно накапливаться глубоко в ледовых реолитах (рыхлых породах), а затем переносится реологическими потоками в подповерхностные зоны, где происходят химические реакции. Эпизодическое нагревание вследствие гравитационных приливов, радиоактивного распада, метеоритных ударов и других геологических процессов может усилить уровень химических реакций и дать толчок к высвобождению накопленной радиолитической окислительной энергии. Вероятно, что наблюдаемая активность в современную эпоху является эволюционной фазой длительного процесса накопления химической энергии в течение миллиардов лет. Криовулканическая активность может затем снижаться вследствие почти полного окисления ресурсов, что возможно уже наблюдается на Европе в условиях интенсивной радиации в магнитосфере Юпитера [7].

Вулканизм на Титане

На спутнике Сатурна Титане также были обнаружены криовулканы..

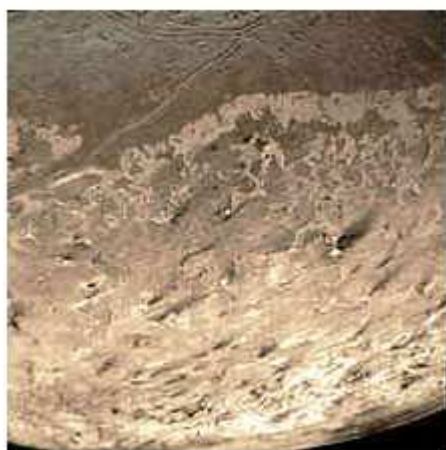
Летом 2005 года аппарат Кассини обнаружил на Титане первый «холодный вулкан», но не смог найти никаких признаков метановых рек и озер. На снимках, сделанных в инфракрас-



ных лучах сквозь плотный слой облаков, разглядели темные куполообразное образование диаметром 30 км, поверхность которого покрыта замерзшим метаном. Скорее всего, жидкий метан поднимается из горячих глубин планеты, затем превращается в лед и постепенно испаряется. Метан – вторая после азота составляющая атмосферы Титана, которая также содержит в заметных количествах воду и аммиак.

Вулканизм на Тритоне

Тритон – крупнейший спутник Нептуна. Он вращается вокруг Нептуна в обратном направлении, причем, орбита его представляет собой почти правильную окружность. Тритон – одно из самых холодных тел в Солнечной системе



Впервые криовулканы были обнаружены «Вояджером-2» на спутнике Нептуна Тритоне. В районе южной полярной шапки спутника имеются небольшие тёмные пятна — это газовые струи, вылетающие из жерл криовулканов.

Снимок Тритона, сделанный КА «Вояджером-2» в 1989 году. Тёмные струи — следы извержений криовулканов

Южная полярная шапка из розового, жёлтого и белого материала занимает значительную часть южного полушария спутника. Этот материал состоит из азотного льда с включениями метана и монооксида углерода. Слабое ультра-

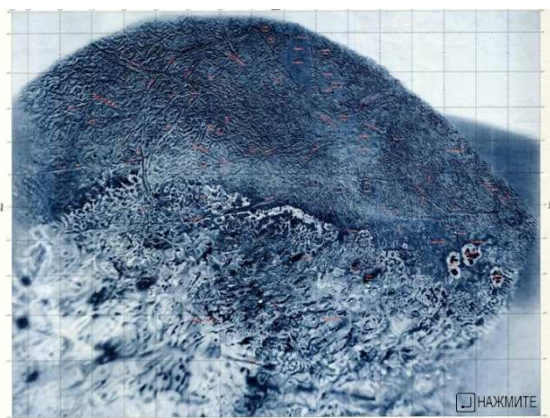
фиолетовое излучение от Солнца действует на метан, вызывая химические реакции, приводящие к появлению розовато-жёлтой субстанции.

На поверхности Тритона мало ударных кратеров, что говорит о геологической активности спутника. По мнению ряда исследователей, возраст поверхности Тритона не превышает 100

млн лет. В полученных «Вояджером-2» данных было зафиксировано всего 179 кратеров, ударное происхождение которых не подвергается сомнению.

В области полярной шапки имеются многочисленные тёмные полосы (около 50). По меньшей мере две из них являются результатами деятельности криовулканизма. Азот, пробиваясь сквозь отверстия во льду, выносит пылевые частицы на высоту до 8 км, откуда они, снижаясь, могут распространяться шлейфами на расстояния до 150 км. Все они тянутся в западном направлении, что говорит о существовании преобладающего ветра. Источники энергии и механизм действия этих выбросов ещё непонятны, но то, что они наблюдаются в широтах, над которыми Солнце находится в зените, позволяет предположить влияние солнечного света.

Явление криовулканизма на Тритоне объясняется энергией приливных взаимодействий.

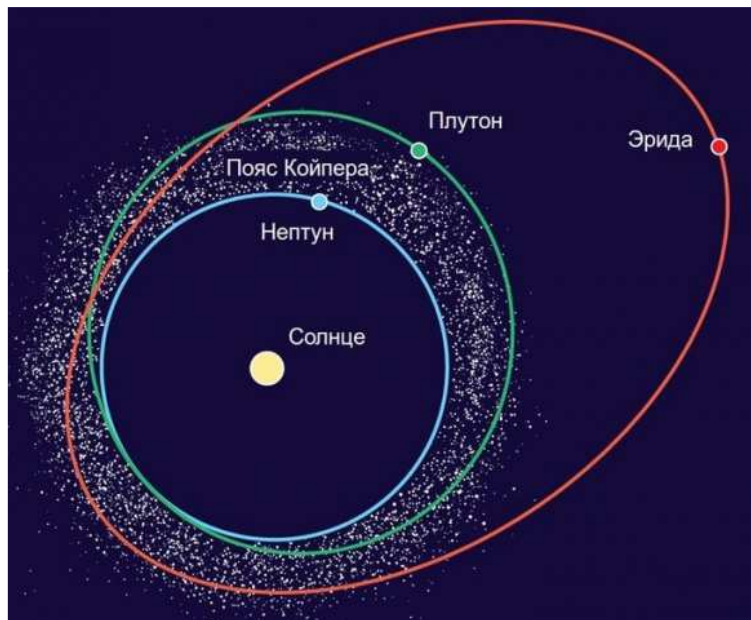


Вулканизм на спутниках Урана

При скрупулёзном изучении фотоснимков спутников Урана, полученных с помощью КА «Вояджер-2», были обнаружены признаки древнего и современного криовулканизма на поверхности Умбриэля, Титании, Оберона и Ариэля. Особенно интересен в отношении криовулканической деятельности оказался спутник Урана Умбриэль. На его полюсе было обнаружено странное кольцевое образование, представляющее собой ярко-белое ледяное кольцо диаметром около 140 км. Предположительно, по своему химическому составу это кольцо состоит из водяного льда с значительной долей твёрдого кислорода. Так как ускорение свободного падения на поверхности Умбриэля невелико, то вещество кольца должно испаряться в вакууме открытого космоса, и соответственно для длительного существования этого природного образования оно должно иметь постоянный источник пополнения. Таким источником могут служить только недра Умбриэля разогреваемые приливными силами от воздействия других спутников Урана и самим Ураном. На других спутниках Урана также обнаружены следы криовулканизма в виде трещин заполненных светлым веществом и ряд других признаков.

Вулканизм на Плутоне

Плутон и его спутники являются объектами пояса Койпера. Этот регион начинается за орбитой Нептуна.



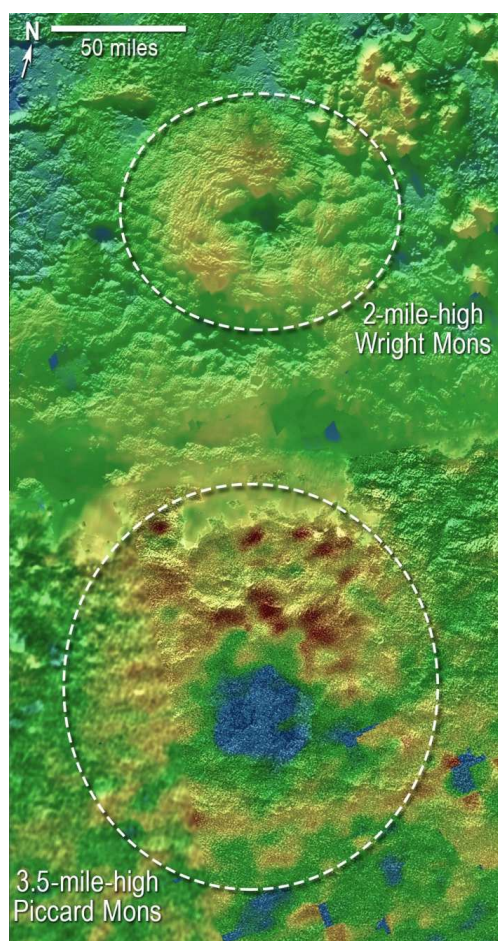
По последним оценкам в поясе Койпера находится по крайней мере 70 000 ледяных объектов диаметром в 100 км и более и имеющих такой же как у Плутона состав.



Фотография Плутона, полученная КА «Новые горизонты» в июле 2015 г.

Рельеф поверхности, который выглядит достаточно «молодо», отсутствие ударных кратеров на больших пространствах свидетельствует о продолжающейся геологической активности. По снимкам аппарата «Новые горизонты» была создана модель, которая показывает очень интересные особенности поверхности Плутона: крупные провалы (дырки) в горе Райт Монс, которые могут быть интерпретированы, как кратеры вулканов.

Научная миссия New Horizons нашла подтверждения существованию на Плутоне двух криовулканов — ледяных образований, извергавших когда-то расплавленные метановые и азот-



ные льды на поверхность планетоида. Это указывает на существование некоторого внутреннего источника тепла, который и запускает эти процессы. Геологи изучали трехмерные карты поверхности Плутона, полученные в рамках пролета аппарата New Horizons и выделили на них два необычных объекта. Это две горы высотой до пяти-шести километров, в центре которых есть углубления, напоминающие кратеры вулканов. На их поверхности обнаружены структуры напоминающие следы древних извержений, которые могли произойти миллиард лет назад. Горы получили название Райт Монс и Пиккар Монс.

По мнению планетологов, на Плутоне криовулканы могли извергать смесь из воды, азотного льда, аммиака и метана. Если на карликовой планете подтвердится существование в прошлом или настоящем криовулканов, то для ученых это будет означать важный этап в понимании геологической и атмосферной эволюции этого небесного тела.

Фото с официального сайта NASA/ Криовулкан Райт в южной части Равнины Спутник.

Вулканизм на Хароне

Крупный спутник Плутона Харон также является очень перспективным объектом с точки зрения активного вулканизма. Крупнейшие наземные обсерватории (Мауна Кеа, телескоп Gemini North система адаптивной оптики и инфракрасный регистрирующий инструмент) обнаружили на поверхности Харона пятна из гидридов аммония и кристаллического льда.

Это не может быть первичный лед, оставшийся со времен формирования Солнечной системы — он перешел бы в аморфную форму в течение нескольких десятков лет из-за УФ-излучения и бомбардировки космическими лучами. Следовательно, кристаллический лед постоянно обновляется. Наиболее вероятный его источник — это криовулканизм, поступление жидкой воды и гидратов аммония через трещины в ледяной коре

По снимкам радиус Харона определен в 606 ± 3 км. Как и Плутон, Харон практически не сплюснут, и полярное сжатие не превышает 1 %. На краю диска Харона видны элементы вертикального рельефа высотой более 3 км. Как в случае Плутона, это означает, что распространенный на Хароне водяной лед, является коренной породой.



На Хароне найдены как гладкие равнины, так и покрытые кратерами, обширная система сдвигов и грабенов, а также крупная заметная темная область с центром на северном полюсе. Темное округлое полярное пятно получило название Мордор. Его внутренняя зона диаметром около 275 км темнее, чем Харон в среднем. С учетом менее темной внешней зоны Мордор имеет около 450 км в поперечнике и постепенно переходит в более светлые равнины, усеянные кратерами. Внутренняя зона частично ограничена криволинейными отметками, которые могут быть либо гребнем, либо открытым сдвигом. Таким образом, данный элемент поверхности мог быть сформулирован как сильным ударом, так и сложным тектоническим процессом

Заключение

Исследование вулканизма на спутниках и малых планетов представляется очень важным и необходимым. Объекты Солнечной системы, которые раньше казались абсолютно мертвыми ледяными мирами, оказались «живыми», не с точки зрения органической жизни, а с точки зрения непрерывно протекающих на них процессов: выделения и перераспределения тепла (ученые обнаружили на них локальные области, которые нагреты до очень высоких температур) и постоянно протекающих химических реакций. Поскольку в этих реакциях участвуют соединения метана, серы и углерода, есть основания предположить возможность образования более сложных молекулярных соединений и даже наличие простейших организмов. Такая гипотеза уже была высказана [11]. Существует также гипотеза, что появлением жизни на Земле, мы обязаны земным вулканам.

Кроме того, в процессе эволюции Солнечной системы, зона возможной обитаемой среды смещается и удаляется от солнца [4], т. е. через несколько миллионов лет (что по астрономическим меркам совсем немного), нашей цивилизации все равно необходимо будет осваивать новые объекты Солнечной системы. Самыми перспективными кандидатами на заселения являются как раз объекты с ярко выраженными процессами вулканизма.

Литература

1. Кореновский Н. В., Якушова А. Ф. «Основы геологии», Учебник, М., «Высшая школа», 1991 г.
2. Ксанфомалити Л. В. «Парад планет», Москва, НАУКА – ФИЗМАТЛИТ, 1997 г.
3. Сурдин В. Г. «Пятая сила», Из-во Московского центра непрерывного математического образования, «Математическое просвещение», М., 2002 г.
4. Сурдин В. Г. Лекция «Открытие новых планет», ГАИШ, 12.06. 2009 г.
5. Дробышевский Э. М. «Электрическая природа вулканов на Ио», «Природа», 1980, № 6
6. Richard Lovett, 21 October 2009 | Nature | doi:10.1038/news.2009.1033
7. Cooper J, “Old Faithful model for ...” et al., 2009 («Старая добрая модель радиолитического газа-приводного вулканизма на Энцеладе»)
8. Erik Klementti “How tall are Eruption on Io and Venus”, “Science”, 17.03. 2014
9. Dmitri Pavlichin „Tidal Heating of Jupiter’s and Saturn’s Moons”, “Submitted as coursework for Physics 210, Stanford University , Autumn 2007
10. Космос. Сверхновый атлас Вселенной., Рандини Жанлука ЭКСМО, Москва, 2010 г.
11. Л. К. Малышева, А. И. Малышев . Планетарный вулканизм как фактор создания условий для зарождения жизни // Вулканология и сейсмология, 2004. № 6. С. 65–77
12. NASA/John Hopkins University. Applied Physics Laboratory/ Carnegie Institution of Washington.,
13. Красильников А. С. «Новы и арахноиды на Венере: геологическое строение, классификация и эволюция», Диссертация, Геологический фак-т МГУ, 2002 г.
14. Фундаментальные космические исследования. Книга 2. Солнечная система., под редакцией дтн проф. Райкунова Г. Г., Москва, 2014 г. (стр. 176)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Основные характеристики планет солнечной системы приведены в табл. 1

Таблица 1 Сводная таблица планет Солнечной системы

Характеристики	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	
Расстояние до Солнца	0,39 а.е. (58 млн км)	108,1 млн км		228 млн км	5,2 а.е. 778 млн км.	9,54 а.е.	19,2а.е.	30,1 а.е.	
Диаметр	4878 км	12104 км		6775 км	139822км			49 528 км	
Масса	3,3 · 10 ²⁶ Г	48,7 · 10 ²⁶ Г	59,83·10 ²⁶ Г	6,44·10 ²⁶ Г	1.8987 × 10 ²⁷ км			1,0243 · 10 ²⁹ Г	
Состав									
плотность			5,52 г/см ³	3,94 г/см ³	1,33 г/см ³	0,70 г/см ³		1,64 г/см ³	
Гравитация(ускорение свободного падения)	372 см/с ²	887 см/с ²	9,8 м/с ²	372 см/с ²	24,79 м/с ²				
Атмосфера	есть	есть	есть	есть	есть				
Температура(мин.- макс.)	690К-90К	477 °С –30 °С	-93,2 °С 58°С	—90 °С +30°					
Период вращения вокруг своей оси		116,8 земных суток	1 суток	24 ч 37 мин 22,58 с	9 ч 55,5 мин				
Период вращение вокруг Солнца	87,97 земных суток)	224,7 земных суток	365-366 дней	687 земных суток	11,86 земного года			164,8 земных года.	
Давление		100 атм 93 бар	1 атм	6,1 мбар					

Таблица 2. Исследование планет и спутников Солнечной системы с помощью КА

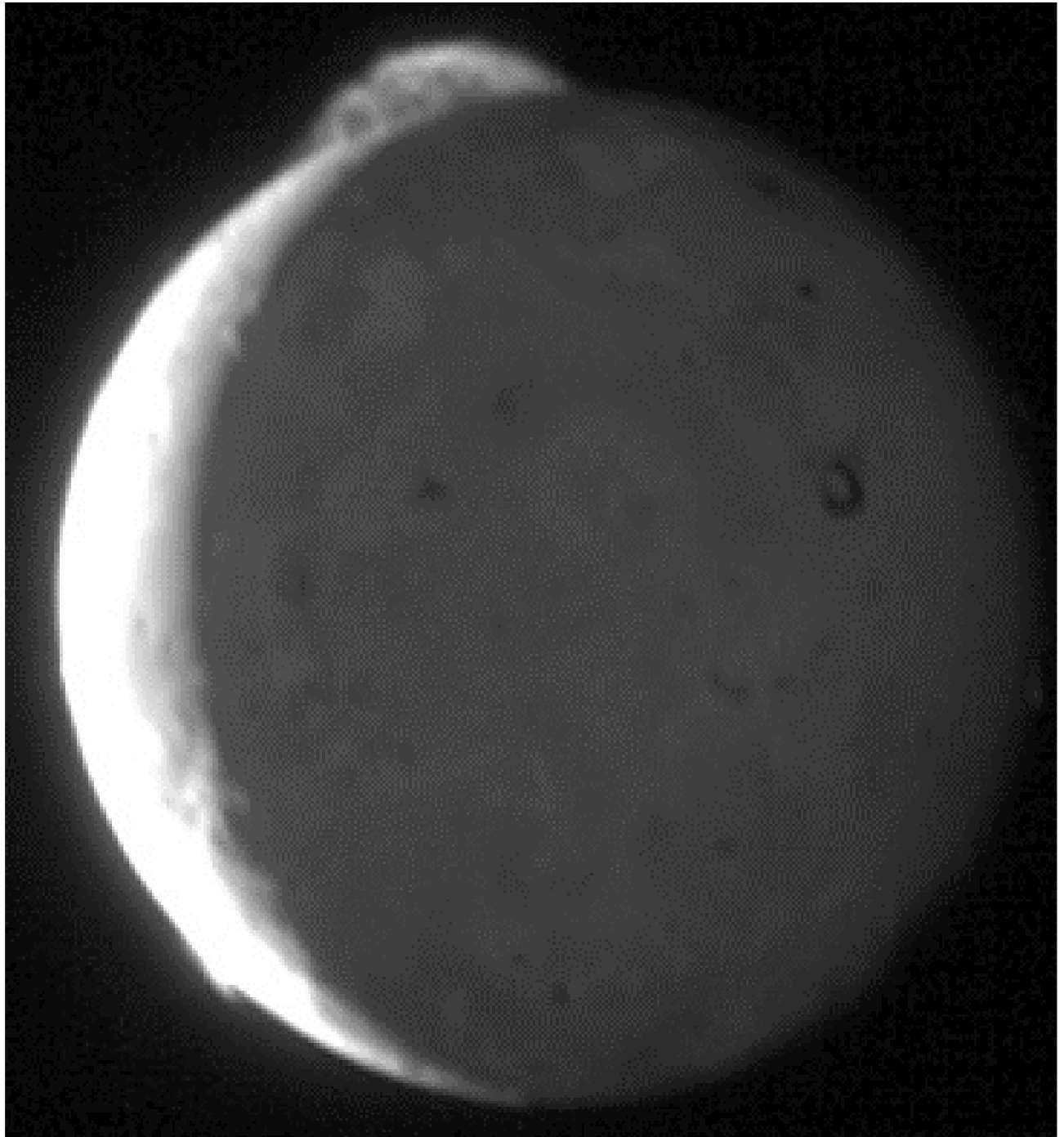
Аппарат	Дата	Снимки, облет	Страна
Маринер - 2	27.08.1962	первое исследование Венеры с пролётной траектории	США
Венера-9	08.06.1975	Спуск на Венеру	СССР
Венера-10	14.06.1975	-и-	СССР
Венера - 13	30.10.1981	Цветные снимки поверхности планеты	СССР
Венера - 14	30.10.1981	Элементный состав пород	СССР
Викинг-1	20.08.1975	Снимки Марса	США
Викинг-2	09.09.1975	-и-	США
Вояджер-2	20.08.1977	Облет Юпитера, Сатурна	США
Вояджер-1	05.09.1977	-и-	США
Пионер-Венера-2 (Pioneer – Venus)	08.08.1978	Исследование Венеры	США
Пионер-10	12.1973	Облет Юпитера	США
Пионер-11	01.09.1979.	Облет Сатурна	США
Галилео	18.10.1979	Информация об Юпитере и его спутниках	США
Вега - 1	15.12.1984		СССР
Вега – 2	21.12.1984		СССР
Вояджер - 2	24.01.1986	Первый облет Урана	США
Магеллан	04.05.1986	Полет на Венеру	США
Вояджер	24.08.1989	Первый пролет Нептуна	США
Галилео	18.10.1989	Облет Венеры, Спутников Юпитера	США
Хаббл	24.04.1990	Космический телескоп, собирающий данные	США
Улисс	06.10.1990	Облет Юпитера	США
Mars Pathfinder	04.12.1996	Посадка на Марсе	США
Кассини - Гюйгенс	15.10.1997	Первый искусственный спутник Сатурна. Посадка на Титан	США
Месенджер	03.08.2004	Первый искусственный спутник Меркурия	США
Venus - Express	9. 11. 2005 (проработал до 2014 г.)	Исследование поверхности Венеры и ее атмосферы.	Европейский КА с ракетоносителем «Союз-ФГ»
Новые горизонты	19.01.2006	Первый облет Плутона – Харона + пояс Койпера	США
Юнона	05.08.2011 14.07.2015	Полет к Юпитеру Пролет возле Плуто-	США

		на	
--	--	----	--

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Фотографии извержений на Ио для расчета высоты выбросов

Ио – 1 «Новые горизонты», Март 2007



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Ию, май, 2007 «Новые горизонты»



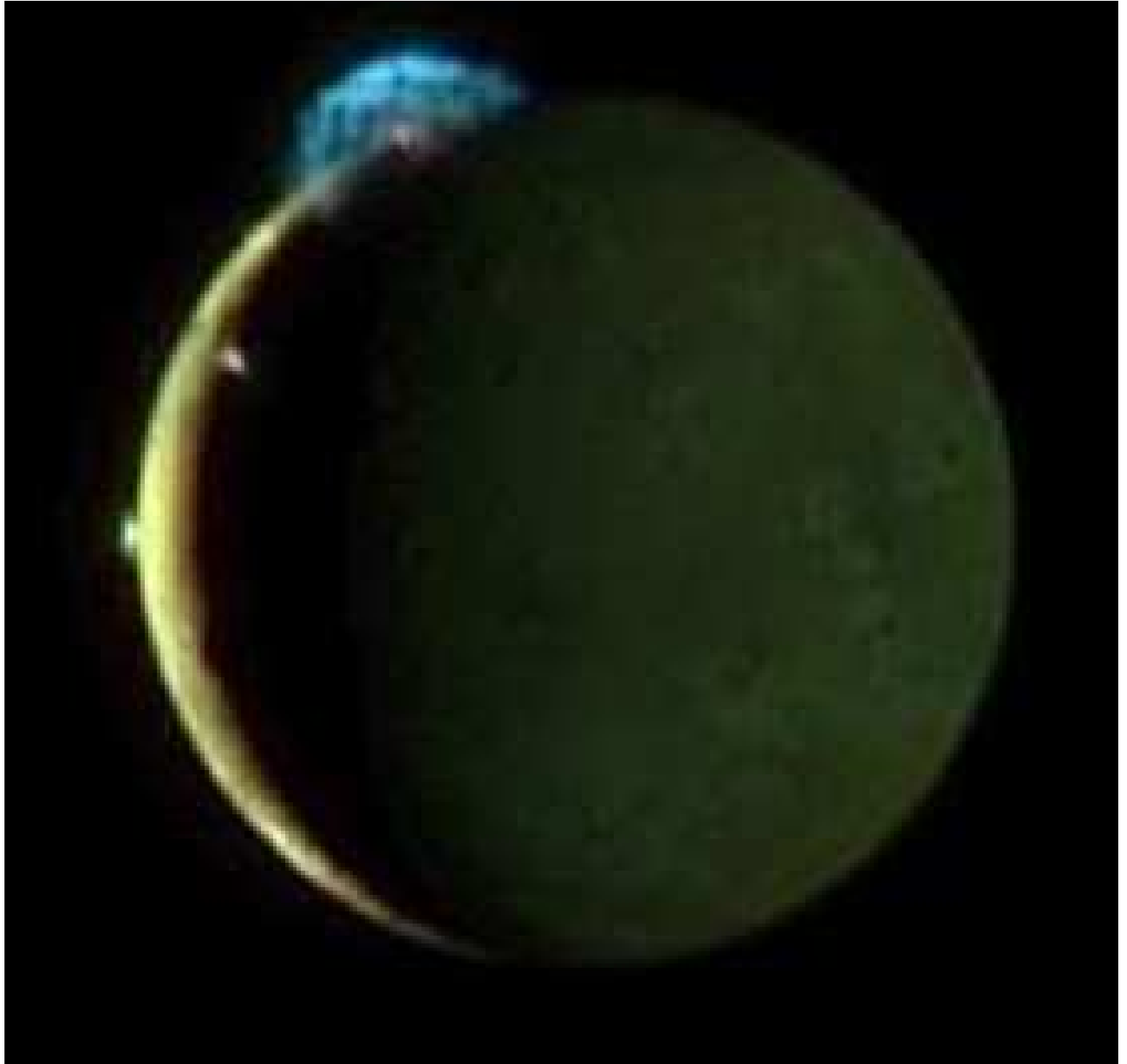
ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Ию. Март, 2007 «Новые горизонты»



ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Ио. Вулкан Тваштор – самый мощный вулкан в Солнечной системе. Фото 7
Мая 2007 г. «Новые горизонты»



ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Ио, Вулкан Пеле, Март, «Новые горизонты

