

VI ежегодная научная конференция школьников
Иркутской области «Человек и космос»

Вулканизм на планетах и спутниках Солнечной системы

Автор:	Дигас Екатерина Максимовна 8 «А» кл. СОШ №27 г. Ангарска
Научный руководитель:	Климушкин Дмитрий Юрьевич, к.ф.-м.н., зав. лаб. ИСЗФ СО РАН
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.....	10
Спутники Юпитера.....	12
Ио	13
Расчет Движения спутников по орбитам вокруг Юпитера.	15
Расчет приливных сил	17
Заключение	18
Литература	19
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	20
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	21
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	22
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	23
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	25

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 вземную вулканическую деятельность на основании данных, полученных исследовательскими космическими аппаратами Cassini, Voyager и New Horizons.

В первой представлен обобщенный обзор планет солнечной системы, чтобы проанализировать их сходство, отличия и проявления вулканизма. Обнаружение реликтового вулканизма на поверхности Венеры 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

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

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 Стромбели, Липарские о-ва	
3. Плинианский	Мощные, внезапные взрывы, выбросы огромного кол-ва тефры – 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 пород.	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.

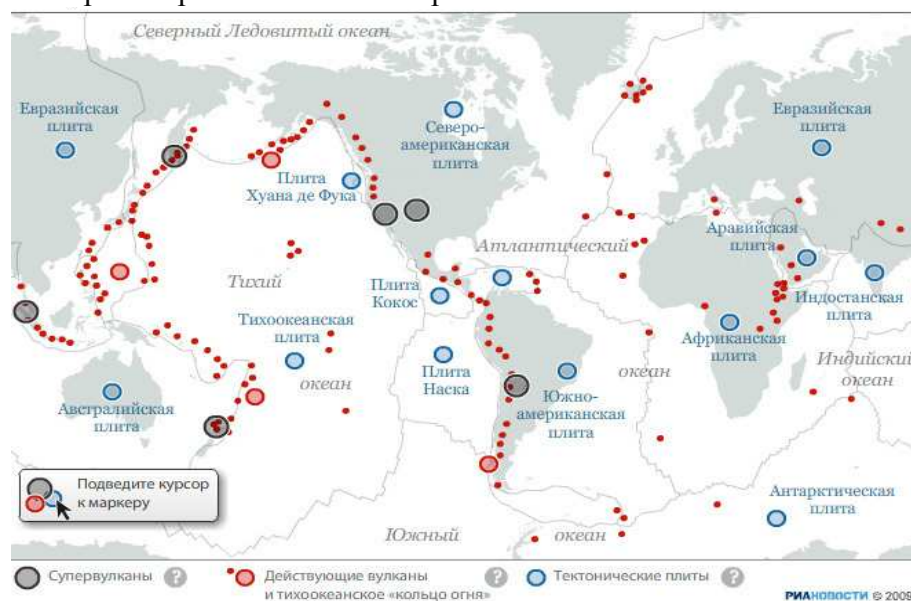


Рис.1 Тектонические плиты и вулканическая активность на Земле.

Несмотря на то, что земные вулканы изучаются уже очень давно, в этой области можно сделать еще много интересных открытий и получить неожиданную и важную информацию.

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.



Были получены снимки поверхности планеты и химический состав его атмосферы. Естественно, атмосфера этой планеты оказалась весьма разреженной (ее называют экзосферой, как и верхние слои атмосферы Земли).

Вся поверхность планеты покрыта сплошной сеткой кратеров и на вид неотличима от хорошо известной поверхности Луны в материковых районах. 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 регион поверхности, покрытый 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.

По мнению ученых, их открытие является "подтверждением тектонической активности на Меркурии в относительно недалеком прошлом". Для сравнения, 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

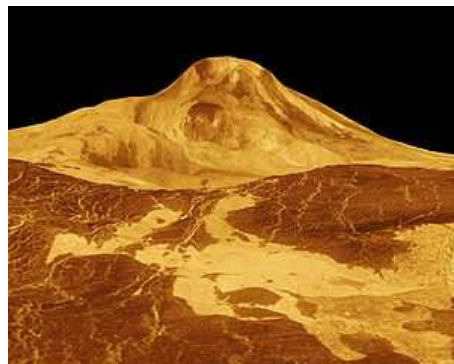
Вторая по порядку от Солнца планета - Венера, находящаяся от него на расстоянии $108,2 \cdot 10^6$ км. Орбита почти круговая, радиус планеты 6050 км, средняя

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.

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, высокими вулканическими конусами.



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.



Наложение тепловых данных на топографическую карту планеты позволила учесть зависимость температуры от рельефа поверхности. Как и на Земле, температура поверхности полностью определяет температуру на каждой высотной отметке..

Мы знаем, что при извержении вулкана на Земле вещество лавы вступает в реакцию с кислородом и другими компонентами атмосферы. На Венере идет

сходный процесс, но он более интенсивный и существенно изменяет состав внешнего слоя извергающейся породы. В результате химических реакций с поверхностного материала с атмосферным углекислым газом или двуокисью серы формируется вторичная «корка» из минералов, таких как кальцит (CaCO_3), ангидрит (обезвоженный гипс, CaSO_4) или гематит (Fe_2O_3).

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), а также ряд других более мелких особенностей. Тем не менее, вулканические структуры не являются общими. Есть менее 20 вулканов на Марсе, и только 5 из них являются гигантскими щитами. 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 в целом. 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, что отличает его от других планет. В тоже время на Марсе широко развит площадной вулканизм (как на Земле и Луне).

Но самый высокий из четырех вулканов — гора Олимп. На рис. 6 в сравнимом вертикальном масштабе показаны высочайшая вершина земного шара: Джомолунгма (Эверест), 8848 м, и гора Олимп на Марсе, 27400 м от подножья. Гора Олимп — вулкан, который специалисты относят к типу щитовых. Лава таких вулканов отличается жидкой консистенцией и при извержениях растекается на большие расстояния.

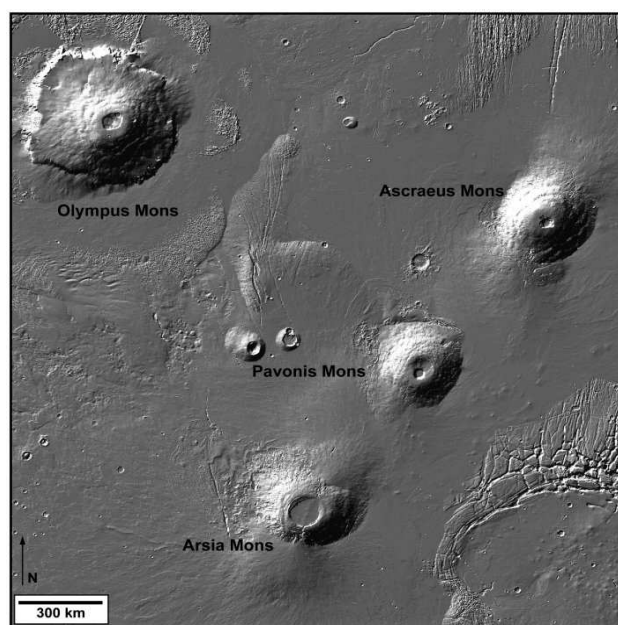
Олимп – потухший вулкан. Он простирается на 540 км в ширину и имеет крутые склоны по краям высотой до 7 км. Длина вулканической кальдеры Олимпа – 85 км, ширина – 60 км. Глубина кальдеры достигает 3 км. Для сравнения – у крупнейшего вулкана Земли Мауна Лоа на Гавайских островах диаметр кратера составляет 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» показал, что самая свежая лава на склонах Олимпа имеет возраст около 2 млн. лет, то есть совсем недавно по геологическим меркам.



Четыре гигантские вулканические вершины — гора Олимп и три вулканических конуса в области Фарсида. Они образуют почти правильный треугольник

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

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.

Впервые явление криовулканизма было обнаружено на спутнике Юпитера Ио.

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



Рис. 1

На рис. 1 показан механизм работы криовулкана. Эта модель использует гипотезу наличия расплавленного ядра планеты, состоящего из скальных пород, воды в жидкой фазе поверхностного льда.

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. На высоте 8 км струи изгибаются на 90° и вытягиваются в широкие горизонтальные шлейфы, тянущиеся на 150 км и более. На снимках Тритона удалось насчитать до 50 таких пятен. Криовулканизм на Тритоне предположительно порождён энергией приливных взаимодействий.

Во время ряда пролётов зонда «Кассини» близ Титана были получены свидетельства, что на нём существуют криовулканы, выбрасывающие в атмосферу относительно большое количество холодного вещества. Предположительно, они являются источником метана в атмосфере Титана.

В группу планет гигантов входят: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Планеты-гиганты отличаются большим числом спутников; у Юпитера к середине 2001 года их обнаружено уже 28, Сатурна - 30, Урана - 21 и только у Нептуна - 8.

Спутники Юпитера

В настоящее время известно 67 спутников

Из всех спутников Юпитера выделяются 4 галилеевых. Это Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. Они отличаются большими размерами (от размера Луны до размеров Меркурия) и близостью к планете. В таблице 1 представлены галилеевы спутники.

Таблица 1 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	

На рисунке 4 показано расположение галилеевых спутников на орбитах

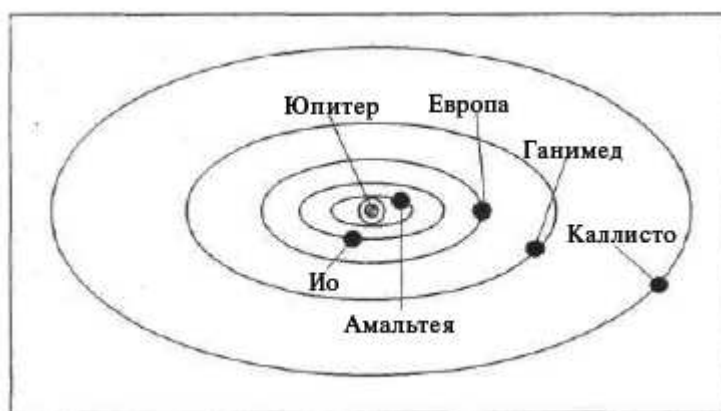


Рис. 4

Ио

Ио – самый вулканически активный объект Солнечной системы. На ее желто-оранжевой поверхности "Вояджеры" обнаружили 12 действующих вулканов, извергающих султаны лавы и газа высотой до 500 км. Основным 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.

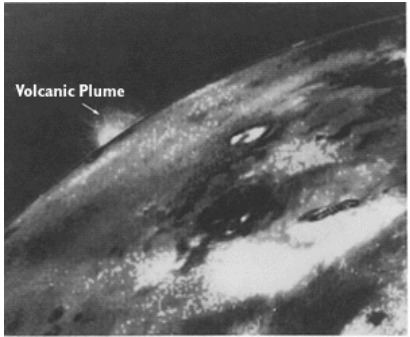

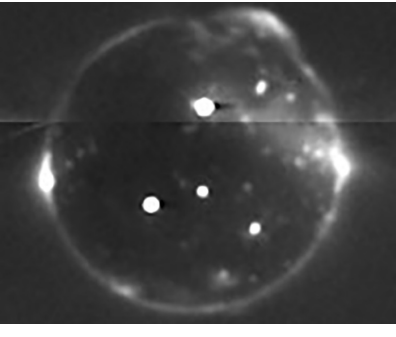


Фото с сайта: <http://galspace.spb.ru/foto-3.file/3.html>

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, позволяющие оценить величины скорости извержения и приливных сил, выбрасывающих лаву через жерло криовулканов.

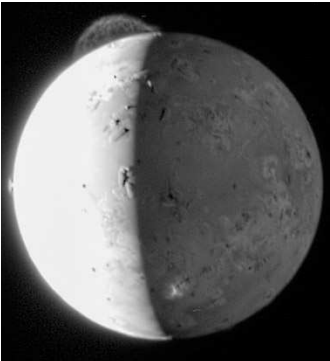
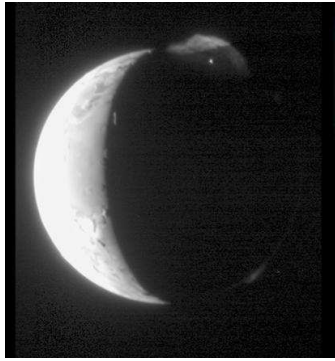
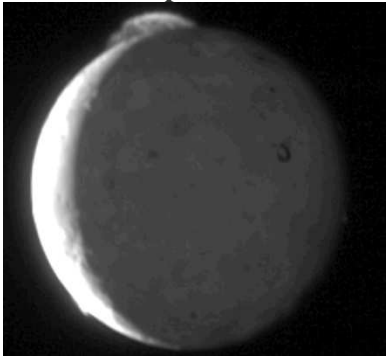
		
<p>Voyager 2, NASA, июль, , 1979 год</p>		

Графический анализ снимков, сделанных Кассини со 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 $g = G \cdot M_{Io} / R_{Io}^2$,

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

M_{Io} – масса Ио, , R_{Io} – радиус Ио

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

		<p>Март 2007</p> 
<p>$h_1 = 295,47 \text{ км}$</p>	<p>$h_2 = 234,88 \text{ км}$</p>	<p>$h_3 = 206,25 \text{ км}$</p>
<p>$V = \sqrt{2gh}$</p>		
<p>$mV^2 / 2 = mgh$ $V_1 =$</p>	<p>$mV^2 / 2 = mgh$ $V_2 =$</p>	<p>$mV^2 / 2 = mgh$ $V_3 =$</p>
<p>$\sqrt{2 \cdot 1,796 \text{ м/с}^2 \cdot 295,47 \text{ км}}$ $= 32,57 \text{ км/с}$</p>	<p>$\sqrt{2 \cdot 1,796 \text{ м/с}^2 \cdot 234,88 \text{ км}}$ $= 29,05 \text{ км/с}$</p>	<p>$\sqrt{2 \cdot 1,796 \text{ м/с}^2 \cdot 206,25 \text{ км}}$ $= 27,22 \text{ км/с}$</p>

Расчет Движения спутников по орбитам вокруг Юпитера.

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

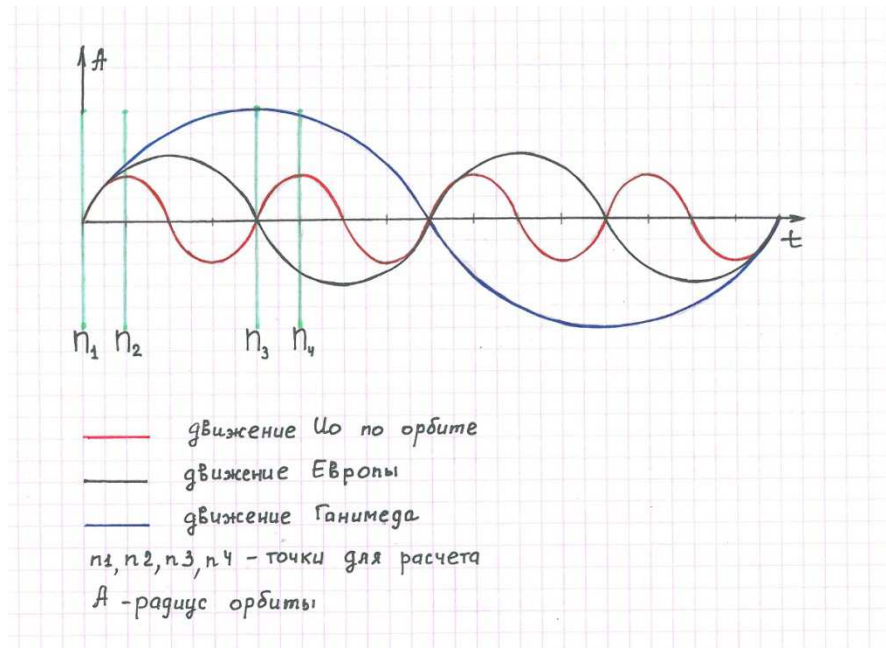
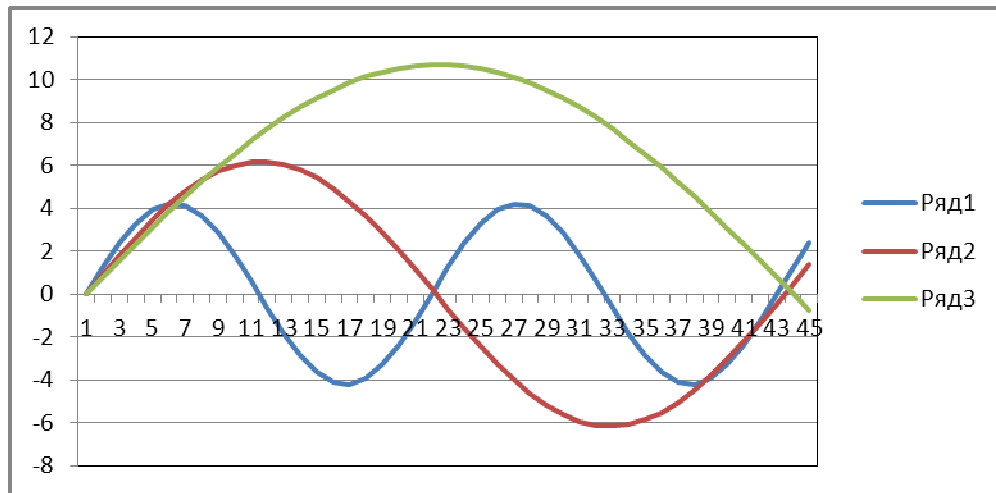


Рис. 6. График движения вокруг Юпитера спутников Ио, Европы и Ганимеда

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

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

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 Ньютоновский закон гравитации, можно посчитать приливные силы на спутник с учетом массы и радиуса планеты и расстояния от спутника до планеты. [8]

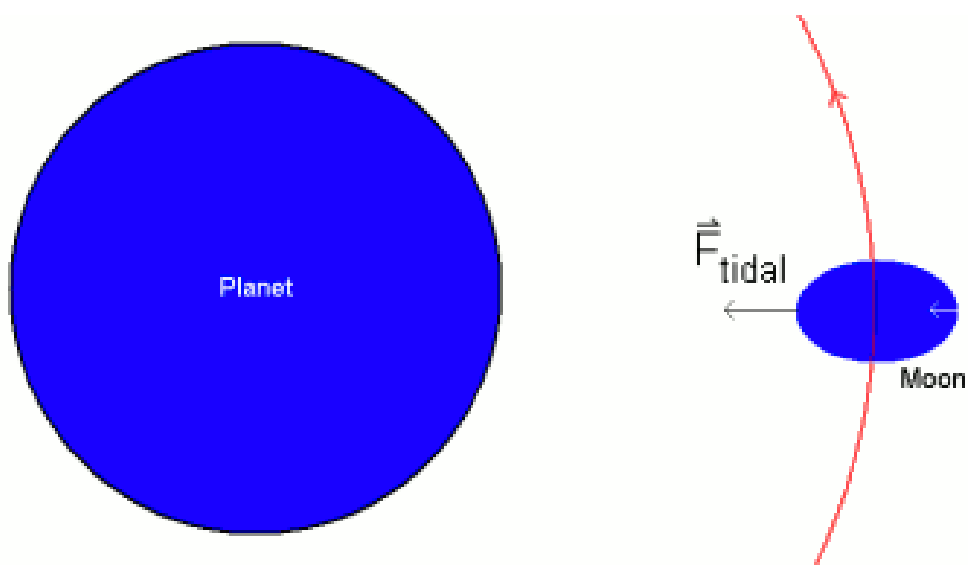
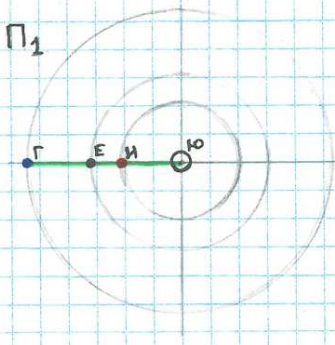
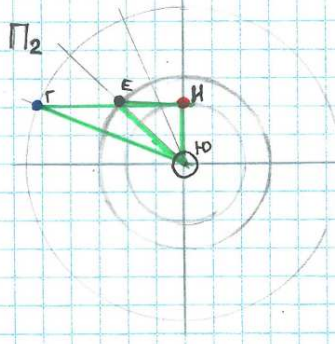
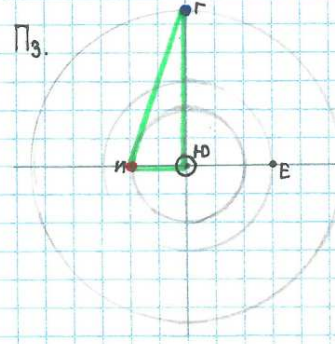
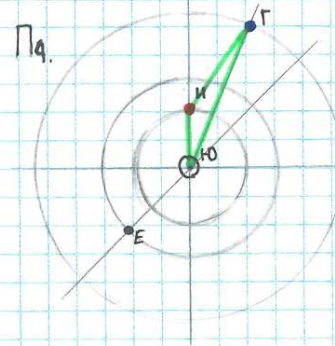


Рис. 7

Для разных позиций (n_1, n_2, n_3, n_4) в соответствии с графиком (рис. 6) 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, она равна ... В табл. _ приведены расчеты Приливных сил со стороны спутников Европы и Ганимеда.

Расчет приливных сил

Позиции спутников вокруг Юпитера	Расчет по формуле	Расчет по формуле
<p>П₁</p> 	<p>$r = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos(\gamma)}$, где γ - расстояния между спутниками</p> <p>$r_{ЕИ} = 617000_{\text{км}} - 422000_{\text{км}} = 195000 \text{ км}$ (расстояние между Европой и Ио)</p> <p>$r_{ГИ} = 1070000_{\text{км}} - 422000_{\text{км}} = 648000 \text{ км}$ (расстояние между Ганимедом и Ио)</p>	<p>$F = G \cdot \frac{Mm}{(R+R_1+r)^2}$, где F - приливная сила.</p> <p>$F_{ЕИ} = 6,954 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{4,8 \cdot 10^{22} \text{ кг} \cdot 8,94 \cdot 10^{22} \text{ кг}}{(1569+1815+195000)^2}$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{4,8 \cdot 8,94 \cdot 10^{44} \text{ кг}^2}{(19834000)^2}$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{42,312 \cdot 10^{44}}{3,9355 \cdot 10^{16}} = 6,954 \cdot 10^{-11}$</p> <p>$F_{ГИ} = 6,954 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{4,8 \cdot 10^{22} \text{ кг} \cdot 8,94 \cdot 10^{22} \text{ кг}}{(2631 \text{ км} + 1815 \text{ км} + 648000_{\text{км}})^2}$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{132,312 \cdot 10^{44}}{(838,05 + 121,98 + 865,35)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot 4,045e+40 \approx 2,26 \cdot 10^{27} \frac{\text{кг}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2}$</p>
<p>П₂</p> 	<p>$r_{ЕИ} = \sqrt{617000_{\text{км}}^2 + 422000_{\text{км}}^2 - 2 \cdot 617000_{\text{км}} \cdot 422000_{\text{км}} \cdot 0,6820} =$</p> <p>$\sqrt{1780840000 + 3806890000 - 355450436000} =$</p> <p>$\sqrt{203622864000} \approx 451245,902 \text{ км}$</p> <p>$r_{ГИ} = \sqrt{1070000_{\text{км}}^2 + 422000_{\text{км}}^2 - 2 \cdot 1070000_{\text{км}} \cdot 422000_{\text{км}} \cdot 0,4147} =$</p> <p>$\sqrt{178084000000 + 1144900000000 - 374507276000} =$</p> <p>$\sqrt{948476724000} \approx 973897,697 \text{ км}$</p>	<p>$F_{ЕИ} = 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{4,8 \cdot 10^{22} \cdot 8,94 \cdot 10^{22}}{(1569+1815+451245,902)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{42,312 \cdot 10^{44}}{(116,2+121,98+787,02)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot 4,247e+39 \approx 2,95 \cdot 10^{27} \frac{\text{кг}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2}$</p> <p>$F_{ГИ} = 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{8,94 \cdot 10^{22} \cdot 14,8 \cdot 10^{22}}{(2631+1815+973897,697)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{132,312 \cdot 10^{44}}{(138,05+121,98+991,22)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot 8,451e+39 \approx 5,87 \cdot 10^{27} \frac{\text{кг}}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2}$</p>
<p>П₃</p> 	<p>$r_{ГИ} = \sqrt{422000^2 + 1070000^2 - 2 \cdot 422000 \cdot 1070000 \cdot 0} = \sqrt{1780840000000}$</p> <p>$\approx 1070000,0 \text{ км}$</p> <p>$r_{ЕИ} = \sqrt{617000^2 + 422000^2 - 2 \cdot 617000 \cdot 422000 \cdot 0} = \sqrt{1780840000000}$</p> <p>$\approx 1070000,0 \text{ км}$</p>	<p>$F_{ГИ} = 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{8,94 \cdot 10^{22} \cdot 14,8 \cdot 10^{22}}{(2631+1815+1070000,0)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{132,312 \cdot 10^{44}}{(138,05+121,98+1022,84)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{132,312 \cdot 10^{44}}{1645755,4369} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot 8,039e+39 \approx$</p> <p>$\approx 0,7610^{11} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$</p>
<p>П₄</p> 	<p>$r_{ГИ} = \sqrt{422000^2 + 1070000^2 - 2 \cdot 422000 \cdot 1070000 \cdot 0,9171} = \sqrt{1780840000000 + 1144900000000 - 828214868000} =$</p> <p>$\sqrt{994769332000} \approx 703398,416 \text{ км}$</p>	<p>$F_{ГИ} = 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{8,94 \cdot 10^{22} \cdot 14,8 \cdot 10^{22}}{(2631+1815+703398,416)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{132,312 \cdot 10^{44}}{(138,05+121,98+889,34)^2} =$</p> <p>$= 6,954 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{132,312 \cdot 10^{44}}{1321051,3639} =$</p> <p>$= \frac{883 \cdot 10^{44}}{5,01 \cdot 10^{11} \cdot 10^{16}} =$</p> <p>$\approx 1,7640^{18} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$</p>

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 та, чтобы можно было бы сопоставить рассчитанные приливные силы с положением Ио относительно других спутников и не можем сделать окончательных выводов об этой зависимости.

Заключение

Исследование вулканизма на спутниках и малых планетах 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 Klementi “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, Starford Universiti, Autumn 2007.
10. Космос. Сверхновый атлас Вселенной, Ранцини 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

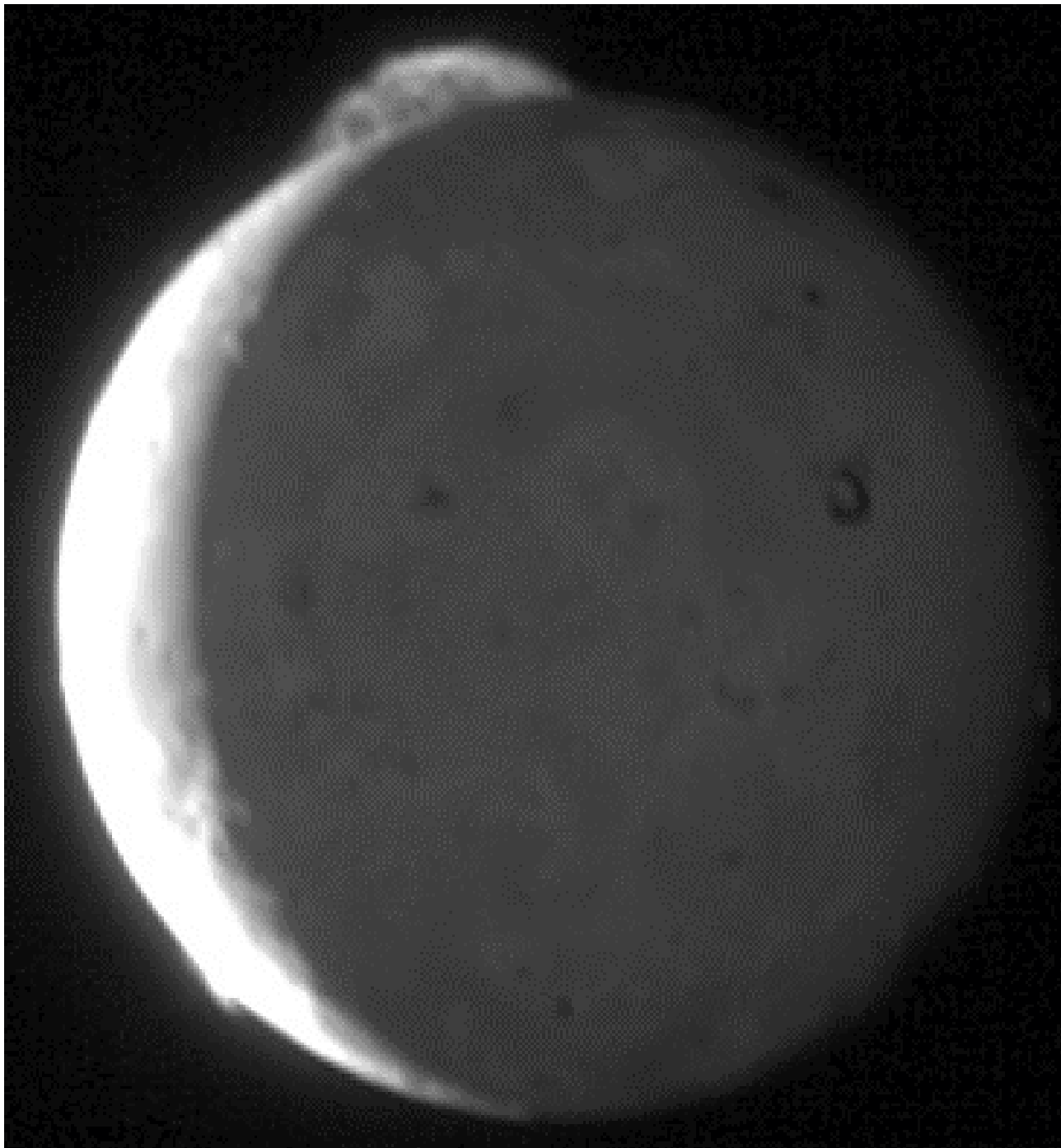
Основные характеристики планет солнечной системы приведены в табл. 1

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	139822 км			49 528 км
Масса	$3,3 \cdot 10^{26}$ г	$48,7 \cdot 10^{26}$ г	$59,83 \cdot 10^{26}$ г	$6,44 \cdot 10^{26}$ г	$1,8987 \times 10^{27}$ км			$1,0243 \cdot 10^{29}$ 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 вращения 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				

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Фотографии извержений на Ио для расчета высоты выбросов
Ио – 1 «Новые горизонты», Март 2007



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Ию, май, 2007 «Новые горизонты»



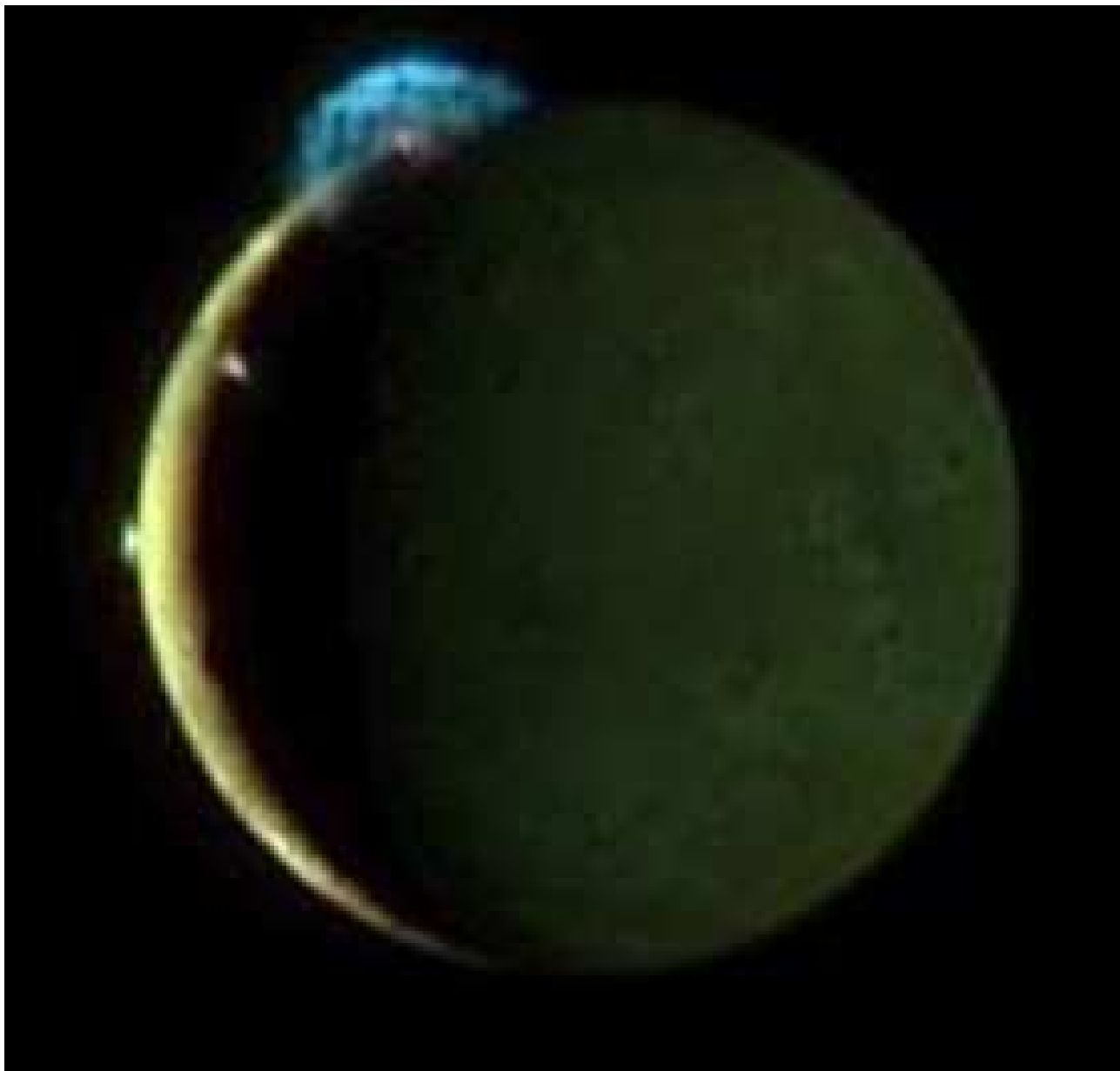
ПРИЛОЖЕНИЕ 4

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»

