### Что такое Вальхалла?

**/исследование спутника Юпитера космическими аппаратами/**

Близко мы познакомились с «Прекраснейшей» в 1979 г., когда американские «Вояджеры» передали на Землю снимки этого спутника Юпитера. Нельзя сказать, что мы о ней ничего не знали. О ее существовании стало известно еще в 1610 г. Считается, что ее вместе с еще тремя спутниками Юпитера обнаружил Галилео Галилей, однако «прекраснейшей» (по-гречески «Каллисто») ее назвал Симон Марий, немецкий врач и астроном, работавший в Ансбахе и оспаривавший приоритет Галилея в открытии спутников Юпитера.

О Каллисто и до снимков с «Вояджеров» было известно довольно много. Знали, что это пятый (по расстоянию) спутник Юпитера, что радиус Каллисто (2400 км) близок к радиусу Меркурия, что период обращения относительно Юпитера составляет 16,7 сут., и вращение, как и у остальных галилеевых спутников Юпитера, синхронно, т. е. Каллисто всегда обращена к Юпитеру одним и тем же полушарием.

Однако полеты американских космических аппаратов обрушили на нас лавину новой информации. Прежде всего, по гравитационным возмущениям их орбит были определены массы спутников, и поскольку радиусы их были известны, можно было оценить их среднюю плотность. Оказалось, что, как и подобает «Прекраснейшей», в отличие от вулканической. Ио, если не сердце, то уж во всяком случае, мантия Каллисто - ледяная, 40 % ее массы составляет лед. Но особенно удивительны были снимки. На Ио обнаружились вулканы, на Ганимеде - поля параллельных борозд, а на Каллисто - удивительное образование, которое сначала называли «Глаз быка», а позже оно получило имя Вальхалла (по названию дворца верховного бога скандинавской мифологии Одина) На снимках это образование действительно очень похоже на коровий глаз, так что Прекраснейшая оказалась еще и волоокой. Вальхалла имеет характерную для космических тел, лишенных атмосферы, округлую форму и простирается на расстояние около 4 тыс. км., (напомним, что диаметр Каллисто — 4800 км). К тому же, в отличие от обычных кратерных структур, здесь не выражен рельеф отсутствует депрессия и вместо характерной системы нескольких кольцевых валов, у Вальхаллы существует система слабо выраженных в рельефе почти концентрических извилистых хребтов, высота которых не превосходит 1 км В этой системе можно насчитать несколько десятков концентрических колец. Позже кратерные системы со сглаженным рельефом стали называть палимпсестами (как известно, в палеографии палимпсестами называют древние пергаменты, на которых поверх старого, смытого текста записан новый).

Если бы Вальхалла располагалась на Земле, это была бы равнина в поперечнике равная Антарктиде (т. е. перекрывающая всю Европу) с очень «скучным» рельефом, регулярность которого легко обнаруживалась бы со спутника. Для человека на поверхности Земли этот рельеф представлялся бы однообразными грядами пологих холмов, поднимающихся на несколько градусов над горизонтом с двух противоположных сторон. Поднявшись на гряду, можно было бы увидеть, что дальше располагаются такие же гряды.

В начале 80-х годов автор вместе с А. Н. Сановичем занимались исследованием многокольцевых бассейнов Луны и, конечно, не могли не обратить внимание на такое удивительное образование как Вальхалла, однако вплотную смогли заняться им значительно позже. За это время в исследовании самого образования и Каллисто в целом был получен ряд новых результатов.

По снимкам, полученным «Вояджерами», в НАСА построена великолепная карта Каллисто. Изучение галилеевых спутников и развитие исследований по их космогонии (считается, что спутники образовались в результате аккреции вещества находившегося вблизи Юпитера) позволили рассчитать внутреннее строение Каллисто. По-видимому, достаточно уверенно можно считать, что в эпоху образования Вальхаллы спутник имел кору толщиной порядка 20 км, состоящую изо льда с примесью силикатов и лежащую на водяной мантии в несколько сот км.

Под мантией располагалось ядро с силикатной оболочкой, возникшей из материала, осаждавшегося из водяной мантии. Что касается палимпсеста Вальхалла, то хорошо видно, что это образование делится на три зоны: центральную (радиусом 300—400 км) яркую и лишенную деталей, внутреннюю, шириной 200— 300 км, с концентрическими кольцевыми хребтами, ширина которых 15 км, длина отдельных гряд достигает ~ 700 км, а расстояние между концентрическими хребтами составляет 20—30 км и, наконец, внешнюю, шириной более 600 км. Во внешней зоне ширина концентрических валов 15—20 км, а расстояние между ними около 70 км. По подсчетам малых кратеров был оценен и возраст Вальхаллы, он оказался близким к 3,9 млрд. лет.

Появился ряд гипотез о происхождении Вальхаллы. Часть из них связывала образование бассейна с внутренними тектоническими процессами, часть с падением огромного метеорного тела, создавшего гигантский кратер. Однако во всех гипотезах предполагалось, что наблюдаемая структура возникла в результате разрушений коры и последующих вязких процессов, которые и привели к образованию множества кольцевых валов. Нам показалось странным, что в ходе такого процесса возникали только круговые валы. Казалось, что в этом случае должны быть и радиальные образования, и мы решили подойти к проблеме несколько с другой стороны.

Действительно, наблюдается некоторая регулярная периодическая структура. Чаще всего такие структуры связаны с волновыми процессами. В нашем случае, явление как-то связано со свойствами вещества, может быть с его прочностными характеристиками (однако, тогда непонятно, почему проявляется такая строгая, да еще и «анизотропная» - нет радиальных разломов - периодичность), либо с процессом распространения каких-то механических колебаний. Если это механические колебания, то, по-видимому, мы имеем дело с установившейся системой стоячих волн, иначе не объяснить пространственную периодичность.

Скорее всего, колебания происходили в коре, но толщина коры при формировании Вальхаллы составляла около 20 км, следовательно, процесс надо рассматривать в свете теории длинных гравитационных волн - приближенной гидродинамической теории волнового процесса, происходящего в бассейне, глубина которого мала по сравнению с длиной волны. Длинные гравитационные волны распространяются со скоростью, не зависящей от длины волны и равной (здесь g — ускорение силы тяжести на поверхности Каллисто, h - глубина бассейна). В нашем случае g известно, а про глубину бассейна мы ничего не знаем. Правда, если колебания возникли из-за распространения какого-то импульса с продолжительностью Т, то длина волны будет пропорциональна произведению Т на скорость распространения волны. Поскольку длина стоячей волны равна половине длины бегущей, это утверждение справедливо и для стоячих волн. Предполагая, что система валов связана с системой стоячих волн и принимая во внимание, что во внутренней зоне расстояние между валами вдвое меньше, чем во внешней, мы должны прийти к выводу: глубина предполагаемого бассейна во внутренней его части должна быть в 4 раза меньше внешней.

Если бы бассейн удалось «осушить», мы увидели бы гигантский кратер с центральной горкой. Но именно такие формы характерны для лунных кратеров больших (но не слишком больших) поперечников. Если поперечник лунного кратера превышает несколько сот километров, как правило, его дно залито базальтовой лавой, и собственный рельеф дна под слоем лавы фактически не известен. Такие кратеры, точнее бассейны, обычно представляют собой масконы - локальные положительные гравитационные аномалии, которые, как показывает моделирование, связаны с подъемом к поверхности и частичным излиянием более тяжелого вещества мантии.

Не может ли быть Вальхалла аналогом лунного маскона? Основное отличие здесь в том, что на Луне плотность вещества мантии выше плотности коры из-за их разного химического состава, в то время как на Каллисто вещество мантии, если она водяная, отличается от вещества коры только фазовым состоянием, поскольку плотность воды больше плотности обычного льда (заметим, что давление в коре и подкоровых слоях слишком мало, чтобы в этом случае появились экзотические фазы льда). И, конечно, вязкость льда, а тем более воды, намного порядков меньше вязкости скальных пород.

Как же образуются масконы на Луне? По-видимому, механизм таков: при столкновении с метеоритом прочность коры нарушается настолько, что она уже не может противостоять давлению мантии, вещество мантии перетекает в область пониженного давления, т. е уменьшенной толщины коры. При этом, если пластичность коры достаточно велика, возникают лишь отдельны трещины, через которые менее вязкое вещество мантии выдавливается на поверхность. Если кора на дне кратера раздроблена на свободно плавающие блоки, полностью или частично реализуется изостазия, т. е работает закон Архимеда. В действительности из-за вязкости мантийного вещества и увеличения вязкости при охлаждении с выходом на поверхность изостазия не может быть полной.

|  |
| --- |
| Этапы формирования палимпсеста Вальхалла (по статье Г. А. Лейкина и А. Н. Сановича в «Трудах ГАИШ», в печати): |
|  | а) На поверхность Каллисто выпал крупный метеороид, образовавший кратер радиусом около 2 тыс. км и глубиной, сравнимой с толщиной коры Каллисто |
|  | б) Пластическая деформация коры в районе удара привела к образованию депрессии и подъему дна кратера |
|  | в) В процессе деформации в центре кратера кора была разрушена и произошел выброс вещества мантии, в результате которого депрессия заполнилась водой. В ходе заполнения в бассейне образовалась система стоячих волн |
|  | г) В узлах системы стоячих волн образовались скопления льда |
|  | д) Рост ледяных скоплений в узлах привел к образованию валов, процесс прекратился после промерзания бассейна  |

Как же в аналогичной ситуации обстоят дела на ледяном спутнике? Для простоты будем считать кору и мантию не содержащими силикатных материалов. Их содержание и в действительности должно быть невелико, поскольку в жидкой водяной мантии быстро происходит гравитационная дифференциация (проще говоря, частицы более тяжелых скальных пород оседают, образуя силикатную оболочку ядра). Будем также считать, что формирование Вальхаллы не повлекло за собой существенных изменений мантии в целом. Это, вероятно, близко к истине, поскольку объем области, занятой бассейном, всего — 1 % объема мантии. События, вероятно, развивались так. В эпоху, когда толщина ледяной коры Каллисто составляла около 20 км, спутник столкнулся с космическим телом, образовавшим на поверхности кратер глубиной около 10 км. Скорее всего скорость соударения была не очень велика и тело до соударения существовало в окрестностях Юпитера (при большой скорости соударения поперечник кратера был бы соизмерим с его глубиной). Таким образом, на поверхности Каллисто в определенном месте толщина коры стала вдвое меньше и давление мантии на кору перестало уравновешиваться весом коры. Возникло избыточное давление мантии, равное (H — толщина коры, q — плотность вещества коры, g — ускорение силы тяжести на поверхности Каллисто, равное 124 см/с2). Оно должно было составлять около 100 атм.

Скорее всего, под действием этого давления дно кратера поднялось и деформировалось. Характерное время этого процесса (время, за которое дно поднимается на высоту, соизмеримую с его толщиной) равно отношению динамической вязкости материала дна к напряжению в этом материале, т. е. избыточному давлению. Если принять, что дно ледяное, а вязкость льда порядка 107, характерное время деформации дна составит несколько месяцев. Трудно представить себе, что при столь значительной деформации дно кратера останется целым. Вероятно, в нем образуются разрывы, через которые вещество мантии устремится на поверхность. При избыточном давлении в 100 атм, скорость истечения вещества мантии (воды) составит по закону Бернулли около 100 м/с. При такой скорости истечения водяная струя будет подниматься над поверхностью .спутника на высоту около 5 км и, падая обратно, заполнит депрессию кратера. Вес воды, заполнившей депрессию, уравновесит избыточное давление и истечение прекратится. Надо заметить, что кратерный вал, который должен был образоваться при столкновении, создаст избыточное давление на кору, направленное сверху вниз. Это может вызвать опускание коры и увеличение глубины кратерной депрессии в прилегающих к валу областях.

Сравним теперь эту картину с тем, что нам известно о Вальхалле. Глубина бассейна во внутренней зоне примерно в 4 раза меньше, чем во внешней. Это так и должно быть. Теперь мы можем оценить не только отношение глубин, но и сами глубины, и объем заполненного водой бассейна. По-видимому, в качестве разумной оценки можно принять глубину бассейна во внутренней зоне близкой к 2 км, а во внешней — к 8—10 км. В этом случае объем заполненного бассейна порядка 107—108 км3. Напомним, что объем Каспийского моря ~105 км3, Тихого океана порядка 107 км3, общее количество воды на Земле, включая лед, около 1,5 \* 109 км3. Чтобы оценить время заполнения депрессии, а именно оно характеризует продолжительность импульса, который привел к образованию системы стоячих волн, надо знать поперечник жерла водяного вулкана, заполнившего бассейн. Соблазнительно принять за жерло центральную часть Вальхаллы. Как уже говорилось, она лишена кольцевых валов (как и должно быть, если глубина бассейна здесь очень велика) и имеет поперечник порядка 600 км. Если это действительно жерло, время заполнения бассейна будет порядка 2 000 с, и тогда за характерную продолжительность импульса разумно принять 'половину этой величины. Скорость распространения волны в приближении длинных гравитационных волн мы знаем. Получается, что глубина бассейна во внешней зоне действительно должна составлять 8—10 км, а во внутренней (предполагаемой зоне поднятия) — порядка 2 км.

Таким образом, наши представления как будто согласуются с наблюдениями, но главная загадка все еще остается: сами по себе стоячие волны в жидкости рано или поздно затухнут, откуда же взялись детали рельефа, свидетельствующие о некогда существовавшей системе стоячих волн?

Видимо, дело в том, что температура на поверхности Каллисто не превышает 170 К, т. е. на сто с лишним градусов ниже температуры замерзания воды. Не могло ли случиться, что в процессе замерзания образовались ледяные торосы, которые и видны как ледяные валы? По существу, мы имеем дело с одной из задач математической физики — задачей о промерзании. Из ее решения следует, что толщина льда увеличивается пропорционально квадратному корню из времени, т. е. нарастает весьма медленно. Однако на начальных стадиях толщину нарастающего слоя льда надо оценивать из других соображений. В условиях Каллисто, пока толщина слоя льда настолько мала, что можно пренебречь поглощающимся в нем инфракрасным излучением, изменение толщины слоя будет определяться балансом энергий: освобождаемой при замерзании воды и излучаемой во внешнее пространство с поверхности льда. При температуре замерзания воды энергия излучения будет сосредоточена по закону Вина в основном в области длин волн около 10 мкм. Поглощение инфракрасного излучения на пути в 1 см для льда в этой области не превышает нескольких процентов. Следовательно, пока толщина слоя не превышает нескольких сантиметров, можно считать, что его толщина увеличивается пропорционально времени. Разумеется, эти соображения справедливы только для тел, не имеющих атмосферы. В противном случае отток тепла будет, вообще говоря, определяться теплопроводностью или конвекцией атмосферы.

Расчеты показывают, что в начальный период толщина слоя льда на Каллисто увеличивается на величину порядка 10~4 см/с, или, учитывая, что продолжительность колебания 103 с, на 1 мм за одно колебание.

Казалось бы, это ничего не дает: не все ли равно, с какой скоростью увеличивается толщина льда? Рано или поздно бассейн промерзнет. Однако дело в том, что в системе стоячих волн существуют узлы и пучности, причем, если в узлах уровень жидкости остается постоянным, в пучностях он то растет, то убывает. Поскольку лед плавает и на ранних стадиях не образует сплошного покрова, он будет сдвигаться к узлам и смерзаться там, образуя своеобразные торосы, рост которых еще более ускоряется за счет набрызгивания воды на их поверхность. В то же время смещение тороса к пучности, находящейся в ложбине, фактически не происходит, поскольку основная масса тороса находится под водой. По-видимому, разумно принять, что торосы растут со скоростью порядка сантиметра за колебание. Если учесть, что 9/10 массы тороса должно быть погружено в воду, то при глубине бассейна во внешней зоне около 10 км высота вала над поверхностью не должна превышать 1 км, а во внутренней зоне, где, по нашему мнению, глубина ~2 км, составлять около 200 м. Оценки показывают, что наиболее реальный механизм затухания стоячих волн - прорастание торосов до дна бассейна, что препятствует горизонтальному перетеканию воды от одной пучности к другой. За это время (порядка 100 лет) и возникнет система концентрических валов. Оставшаяся в бассейне вода будет промерзать «статически» (процесс описывается уравнением теплопроводности). Характерное время «статического» промерзания — порядка миллиарда лет.

Надо сказать еще о двух проблемах.

Во-первых, почему при высокой скорости истечения и больших масштабах турбулентность позволила сохраниться системе стоячих волн? Дело здесь в том, что турбулентность — явление существенно трехмерное и ее максимальные элементы (вихри) характеризуются в данном случае глубиной бассейна. Хотелось бы считать, что извилистость хребтов в значительной мере связана именно с турбулентностью.

Во-вторых, почему структуры типа Вальхалла сравнительно редки? Правда, наряду с Вальхаллой, на Каллисто существует еще один многокольцевой палимпсест Асгард с поперечником около 1600 км. Выявление аналогичных структур на Ганимеде затруднено условиями наблюдений. И, конечно, необходимо благоприятное стечение обстоятельств: в ледяной спутник с надлежащей толщиной коры и водяной мантией должен попасть подходящий метеороид. К тому же вращение спутника не должно быть слишком быстрым, иначе из-за сил Кориолиса в бассейне не будут развиваться радиальные течения, порождающие стоячие волны.

Если изложенные соображения верны, то после завершения всех процессов, через миллиард лет после столкновения, единственным свидетельством тяжелого ранения Прекраснейшей будут поверхностные кольцевые шрамы. На Луне возник бы маскон.