



▲ Крупный план кратера Вальхалла на спутнике Юпитера Каллисто. Ракурс изображения не позволяет увидеть небольшой прогиб древнего кратера, но концентрические кольца и светлое пятно точно маркируют его центральную область

◀ Глядя на фото Ганимеда, трудно сообразить, что светлые борозды на его поверхности представляют собой части окружностей. Однако планетологи смогли найти их геометрический центр: он находится рядом с левым нижним углом квадратного вреза

Спутник в полосочку?

Самый большой среди спутников Солнечной системы, третий Галилеев спутник Юпитера Ганимед, имеет диаметр 5270 км. Подобно Луне, он всегда обращен одной стороной к своей планете. В 1979 и 1980 году зонды «Вояджер-1» и «Вояджер-2» сделали детальные снимки этой стороны, а с 1995 по 2003 год аппарат «Галилео» провел полное картирование спутника. Оказалось, что поверхность Ганимеда покрыта светлыми (молодыми) и темными (более древними) регионами (2:1 по площади) и состоит из смеси грязных льдов. В темных областях водный лед составляет примерно половину смеси, в светлых — до 90%.

Темные регионы испещрены мелкими бороздами, которые появились раньше многочисленных местных кратеров. Еще в XX веке американские ученые нанесли борозды на карты и установили, что в пределах полушария Ганимеда их сеть концентрична. То есть разрозненные борозды это детали цельной геометрической картины с единым центром кривизны на невидимой с Юпитера стороне. Если бы картина сохранилась полностью, то выглядела бы так, как, к примеру, выглядят концентрические кольца самого большого кольцевого кратера Солнечной системы: это Вальхалла, который занимает круг диаметром в 4000 км на другом Галилеевом спутнике, Каллисто (см. фото).

Недавно трое планетологов из ведущих университетов Японии под руководством профессора Наойюки

Хирата вновь подвергли тщательному анализу наблюдательные данные о бороздах. Они выяснили, что остатки единой кольцевой структуры можно проследить на расстоянии до 8000 км от гипотетического центра. Статистика пространственных положений центров кривизны борозд показала, что максимальное отклонение их ориентаций от идеальной концентрической картины не превышает 30°. Это ограничивает возможные смещения темных областей от их древних местоположений одной тысячью километров, то есть в процессе эволюции они практически не двигались.

Авторы исследования смоделировали на суперкомпьютере Национальной астрономической обсерватории Японии удар 150-километрового космического тела, который, как они считают, сформировал глобаль-

ную сеть борозд. Удар должен был породить гравитационную аномалию в регионе диаметром в тысячу километров, которую можно будет обнаружить с помощью космических аппаратов.

Однако ученые отметили принципиальную возможность других объяснений. Они надеются, что вопрос будет однозначно решен после полетов новых миссий к спутникам Юпитера. Ближайшую из них, автоматический аппарат JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer — исследователь ледяных лун Юпитера), Европейское космическое агентство планирует запустить в следующем году. (*Icarus*, 2020, 352 [S02] 113941)

Сера лунных лав

Один из основных результатов программы «Аполлон» в семидесятых годах XX века — запас образцов грунта, взятого в разных точках Луны. Половину этого материала НАСА тогда законсервировало для исследований на приборах будущего. Сегодня оно наступило, поэтому в научных журналах все чаще появляются статьи с новыми данными о Луне. Одна из них, работа профессора Брауновского университета Альберто Сала и его коллеги из Института Карнеги Эрика Хаури, посвящена изучению соотношения изотопов серы.

Ученые исследовали образцы вулканических лав с включениями застывших стеклянных капель, доставленные «Аполлоном-15» и «Аполлоном-17». Капли захвачены из расплавленной магмы до ее дегазации при извержении, то есть до удаления из нее серы и других летучих элементов, поэтому их состав дает представление о химической эволюции магм.

Ученые исследовали 67 образцов на предмет соотношения долей изотопов серы с атомными массами 34 и 32. Среди образцов удалось выделить две группы с большим и малым соотношением этих изотопов, которое коррелирует с общим содержанием в них серы и титана. Это значит, что лавы произошли из разных резервуаров лунной толщи. По мнению ученых, большая доля легкого изотопа в лавах свидетельствует

об их связи с образованием жидкого железного ядра внутри Луны, так как железо имеет тенденцию захватывать тяжелый изотоп серы, тем самым обогащая магму легким. Когда же моря жидкой лавы на поверхности планеты охлаждаются и кристаллизуются, в ней повышается концентрация тяжелой серы из-за преимущественного испарения легкой. Принято считать, что эти моря покрыли Луну 100 миллионов лет спустя после ее рождения.

До сих пор астрофизики были уверены, что разные минералы лунных базальтов содержат изотопы серы примерно в равных долях, чего не скажешь об изотопах большинства других химических элементов. Однако новое исследование доказывает, что это не так, соотношение концентраций тяжелого и легкого изотопов могут сильно различаться. Это различие характеризует ключевые моменты ранней эволюции Луны. Работа приближает разгадку тайны рождения Луны и будет продолжена. Ученые также надеются выснить, насколько различается содержание изотопов серы в лунных и земных толщах. (*Science Advances*, 2021, 7, № 9)

Плита поверх Венеры

Господствующая догма современной геологии гласит: земная поверхность состоит из плит, которые перемещаются по подстилающему их слабовязкому слою со скоростью в несколько сантиметров в год. Эту тектоническую машину движет медленное перемешивание земной мантии. На других каменных телах Солнечной системы такого никогда не наблюдали. Венера по многим характеристикам — двойник Земли, поэтому астрофизики изучают ее особенно тщательно. Это не так легко, потому что поверхность планеты покрыта плотной, непрозрачной и горячей атмосферой.

Последняя работа трех ученых из Брауновского университета под названием «Оценка тепловых условий на Венере на основе морфологии многокольцевых кратеров», выпол-

ненная под руководством профессора Брэндона Джонсона, по-видимому, решает проблему венерианской тектоники плит. Ученые детально изучили Мид, самый большой ударный кратер планеты с кольцевыми уступами на расстояниях 190 и 270 км от центра при общем диаметре около 300 км. Он возник от трети до миллиарда лет назад. Исследователи построили компьютерную модель ударного образования кратера. Один из параметров модели — это тепловой градиент планеты, поскольку увеличение температуры с глубиной напрямую связано с механическими свойствами твердых пород планеты. Аналогичный подход Джонсон уже применял к лунным кратерам. В частности, четыре года назад он опубликовал расчет гигантского многокольцевого Восточного моря.

Установлено, что для появления двух уступов в местах их расположения нужна очень толстая внешняя литосфера, значительно толще земной. Расчетный тепловой градиент оказался в два раза меньше необходимого для существования тектоники плит. Он равен 14°C на километр глубины (у Земли — 30°C). Размеры других кольцевых кратеров Венеры подтверждают найденные тепловые параметры. Равновесие гор Максвелла, самых больших гор планеты, и подстилающих их пород также хорошо согласуется с параметрами модели. Авторы делают вывод, что в момент образования кратера Венера была покрыта единой плитой и тектоника плит на ней отсутствовала. (*Nature Astronomy*, 28 января 2021 года)

Новая хронология от доктора Марчи

Геологи датируют возраст земной поверхности по содержанию в ней радиоактивных элементов. На космических телах в большинстве случаев нет возможности взять пробу грунта, поэтому для определения возраста поверхностей планет, их спутников и астероидов астрофизики применяют модели. Например, давние даты событий времен интенсивных бомбардировок вычисляют по числу ударных

кратеров, приходящихся на единицу площади. Грубо говоря, чем кратеров больше, тем древнее регион. Зависимости размера кратеров от размера тела-ударника известны, остается определить их количество в разные периоды эволюции Солнечной системы.

В XX веке во время исследований Луны американские астронавты целенаправленно собирали пробы грунта в разных ее регионах. Пробы также взяли советские автоматические станции. Тогда удалось сравнить данные изотопной и относительной кратерной хронологий Луны, определить абсолютное время ее бомбардировок по изотопным часам, а также оценить количество и размеры астероидов, ударявших наш спутник в разные времена. Затем ученые экстраполировали эти данные на окрестности Марса и построили хронологию его поверхности

Однако теория раннего этапа Солнечной системы не стоит на месте. Доктор Симон Марчи из Юго-Западного научно-исследовательского института (США) на основе этих теоретических уточнений рассчитал вклады разных групп ударников в их общий поток. Его результаты позволили ученому предложить новую хронологию регионов Марса. Он детально рассмотрел ее на примере гнездового кратера Езеро и сильно кратеризованных южных регионов планеты.

Пятидесятикилометровый кратер Езеро расположен на западе равнины Изиды, размер которой полторы тысячи километров. Она перекрывает часть границы огромного Северного полярного бассейна, по-видимому, самого крупного и старого ударного бассейна Марса. Новая хронология уточняет возраст характерных для него гнездовых кратеров. Согласно нее, Езеро образовался 3,1 млрд лет назад, что на полмиллиарда больше общепринятой сегодня цифры, равнина Изиды родилась в интервале 4,05–4,2 млрд лет назад, а сам полярный бассейн – 4,35–4,40. Для южных регионов теория дает несколько большее число крупных кратеров, чем наблюдается. Доктор Марчи считает, что недостающие кратеры либо стерты временем, либо теорию придется уточнить.

Недавнее успешное приземление и первые опубликованные снимки кратера Езеро, сделанные новым марсоходом «Персеверанс» НАСА, дают надежду на проверку хронологии. Одна из его задач – собрать образцы грунта в кратере и упаковать их; потом другой космический аппарат заберет образцы и доставит их на Землю. (*The Astronomical Journal*, 2021, 15 марта)

Троянский кентавр

В начале лета 2020 года астрономы обнаружили необычный малый объект в необычном месте Солнечной системы – комету на орбите Юпитера. Сначала его заметили два телескопа системы предупреждения об опасных астероидах Гавайского университета. Поиск в архивах обзорного каталога переменных небесных источников «Zwicky Transient Facility» показал, что найденный объект (его назвали P/2019 LD2) проявлял кометную активность уже с апреля 2020 года. Последующие наблюдения другой обсерватории США подтвердили этот факт. Так астрономы доказали: среди троянских астероидов Юпитера есть комета.

Напомним, что троянами называют малые тела, движущиеся по орбите планеты с опережением ее на шестьдесят градусов, они собраны в одной из так называемых точек Лагранжа. Это область орбиты, где центробежная и гравитационные силы Солнца и Юпитера компенсированы, поэтому малое тело может здесь остаться надолго. В симметричной орбитальной области позади планеты пребывают греки, другая группа малых астероидов. Принято считать, что все они захвачены при пролете мимо Юпитера и заброшены в эти точки его гравитационным полем. Комет здесь прежде никогда не наблюдали.

Новому удивительному явлению посвящена статья полусотни астрономов под руководством Брюса Болина из Калифорнийского технологического института. В ней обобщены и проанализированы данные о характеристиках LD2, собранные

шестью различными телескопами. Оказалось, что ядро LD2 размером от 200 до 1800 м выбрасывает струи пыли и газа в свою кому, то есть атмосферу. Благодаря дегазации у объекта есть кометный хвост, простирающийся более чем на полмиллиона километров.

Детали строения хвоста и комы различил космический телескоп Хаббл, а состав оценил телескоп Спитцер. Размер выбрасываемых частиц пыли около ста микрон, скорость выбросов – один метр в секунду. Удивительна активность на таком большом расстоянии от Солнца, ведь его света недостаточно для сублимации льда, которая, по общепринятым представлениям, вызывает дегазацию и образование хвоста у комет. Обычно кометы становятся активны на расстояниях в два с лишним раза меньших. Ученые предполагают, что причиной может быть испарение не водяного льда, а моно- и диоксида углерода, также присутствующих в хвосте и коме LD2.

Исследователи сделали вывод, что объект принадлежит к группе кентавров. Эти астероиды проявляют свойства комет, а обращаются по нестабильным вытянутым орбитам между Юпитером и Нептуном. Считается, что такой кентавр состоит из замерзшего углекислого и угарного газов – линии их конденсации как раз расположены между орбитами этих планет. Вода же замерзает ближе к Солнцу, между Юпитером и Марсом.

Чтобы попасть в плен, кентавр LD2 должен был выйти на орбиту Юпитера по очень специфической траектории. Болин говорит, что, скорее всего, около двух лет назад ее при сближении искажил Юпитер. Ученые рассчитали, что если кентавр уйдет из точки Лавгранжа, он очень быстро, примерно через два года снова может сблизиться с Юпитером, будет им выброшен и продолжит свое движение внутрь Солнечной системы. В ближайшие полмиллиарда лет это уход случится с вероятностью 90%. (*The Astronomical Journal*, 11 февраля 2021 года)

Выпуск подготовил
Александр Гурьянов