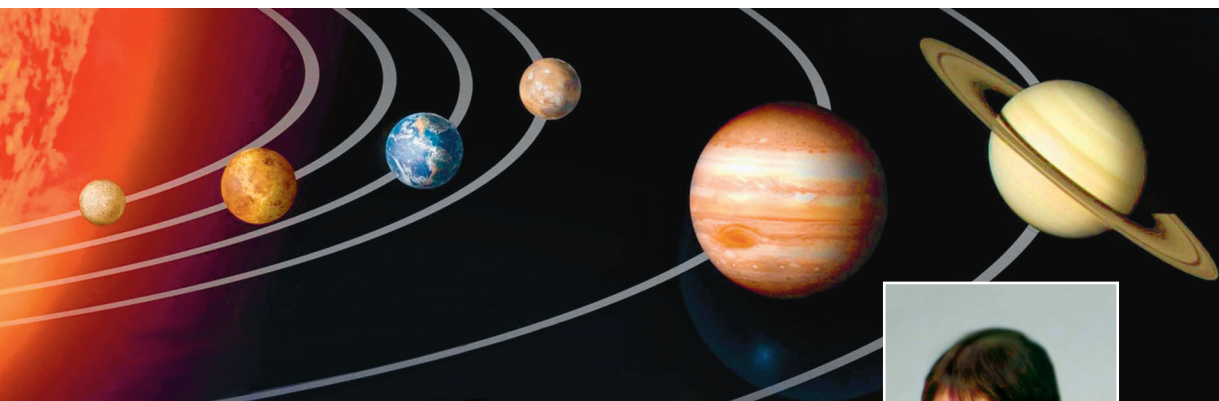


# ПРИЛИВНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ



ГУДКОВА Тамара Васильевна,

доктор физико-математических наук

Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта

DOI: 10.7868/S0044394824010018



**Н**аша Солнечная система представляет собой семейство планет и спутников, сформированных из горных пород, льда, газа, а также их смеси<sup>1</sup>. Для изучения недр Земли был разработан большой арсенал геофизических методов, но возможности для исследования строения других тел Солнечной системы остаются ограниченными. Широкий набор сейсмических данных доступен только для Земли, хотя сейсмические эксперименты были проведены на Луне и Марсе. Такие эксперименты очень дорогостоящие, и поэтому многие исследования планет опираются на дистанционное зондирование и геодезические измерения.

<sup>1</sup> Ксанфомалити Л.В. Парад планет. М.: Наука, Физматлит, 1997; Уральская В.С. Спутниковые системы планет // Земля и Вселенная. 2002. № 2. С. 3–15.

Эффективным средством получения информации о недрах планет и их спутников является измерение их реакции на приливное взаимодействие. Приливный отклик отражает вязкоупругое поведение материала планеты (или спутника) на гравитационное притяжение других тел. Изучение приливов твердых тел дает ключевую информацию о внутренней структуре, эволюции и происхождении планет. Какова роль, которую играют приливы в понимании строения недр планет? Что можно узнать из измерения приливной реакции в ожидаемых миссиях к планетам? Как интерпретация поверхностных геологических особенностей, возникающих в результате приливной деятельности, используется для понимания внутренних свойств и эволюции планетарного тела?

Обычно люди ассоциируют приливы только с изменением уровня моря. В некоторых местах на нашей планете дважды в течение суток можно наблюдать, как вода у берега поднимается и заливают часть суши, и спустя некоторое время уровень воды понижается и вода отступает, обнажая прибрежное дно. Наиболее высокие точки приливов наблюдаются в заливах Бретани в Европе (приливная волна до 14 м), в Североамериканском заливе Фонди до 18 м.

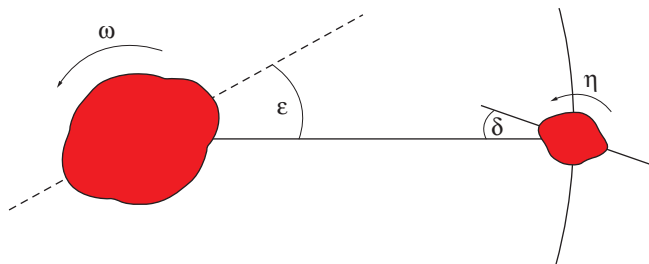
Помимо океанических приливов на Земле, приливы наблюдают в атмосфере и в теле Земли. Именно приливы в теле твердой Земли называются земными приливами. Из-за приливобразующей силы, которая действует на Землю со стороны Луны, и в меньшей мере Солнца, происходят периодические колебания уровня земной поверхности и гравитационного поля Земли. Не смотря на то, что Луна гораздо меньше, чем Солнце, она значительно ближе к Земле, и поэтому ее воздействие на Землю сильнее. Это явление всегда носит взаимный характер. Спутник вызывает приливы на нашей планете, и, в свою очередь, испытывает периодические возмущения от воздействия планеты, которые вызывают его деформацию.

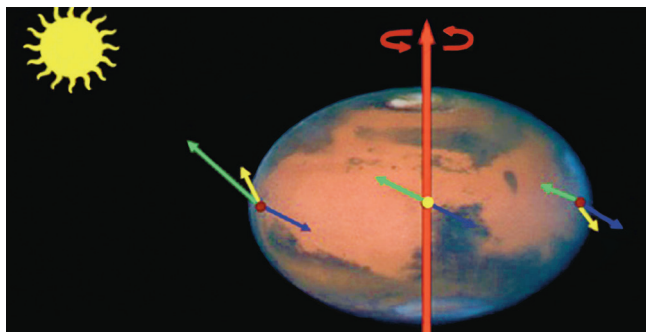
## КАКОВЫ ПРИЧИНЫ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ?

На поверхности Земли тело находится под действием гравитационной силы притяжения, направленной к центру масс Земли, и центробежной

силы, направленной перпендикулярно к оси вращения Земли. Равнодействующая этих двух сил – сила тяжести – определяет в данной точке поверхности направление отвеса. Под действием Луны и Солнца величина и направление силы тяжести в рассматриваемой точке периодически меняются в соответствии с изменениями положений Луны и Солнца относительно Земли. Эти периодические изменения силы тяжести являются причиной океанических приливов. Под воздействием приливных сил происходит также и деформация поверхности Земли, причем амплитуда земных приливов размером около 30 см сравнима с амплитудой наиболее слабых приливов в океане. Амплитуда приливов на Земле зависит от взаимного положения Луны и Солнца относительно Земли. Их вклады могут складываться или вычитаться. Амплитуда также зависит от различных движений Луны относительно Земли. Например, из-за влияния Солнца орбита Луны меняется и происходит так

*Приливная деформация и угол запаздывания приливного горба, индуцированные на планете и ее спутнике в результате гравитационного притяжения двух тел друг к другу ( $\omega$  – угловая скорость вращения планеты,  $\eta$  – угловая скорость вращения спутника). При наличии трения (из-за отклонения свойств вещества планеты и спутника от идеально упругих) возникает запаздывание максимума прилива:  $\epsilon$  и  $\delta$  – угол запаздывания приливного горба планеты и спутника соответственно – для наглядности сильно преувеличены. Hussmann H. International Colloquium and Workshop Ganymede Lander, IKI, Mar 4–8, 2013*





*Изменение величины и направления приливной силы на поверхности планеты в результате приливного воздействия возмущающего тела (например, Солнца). На поверхности планеты выделенные точки находятся под действием гравитационной силы притяжения, направленной к Солнцу (зеленая стрелка), и центробежной силы, направленной перпендикулярно к оси вращения планеты (синяя стрелка). Приливное воздействие (равнодействующая этих двух сил) (желтая стрелка) меняется от точки к точке. Красная стрелка – ось вращения планеты. Hoolst T. International School on Space Science, September 12–16, 2016, L'Aquila, Italy*

называемая прецессия узлов. У этой прецессии период примерно 18.6 лет, и это движение может заметно влиять на климат в разных местах Земли.

## НЕМНОГО ИСТОРИИ

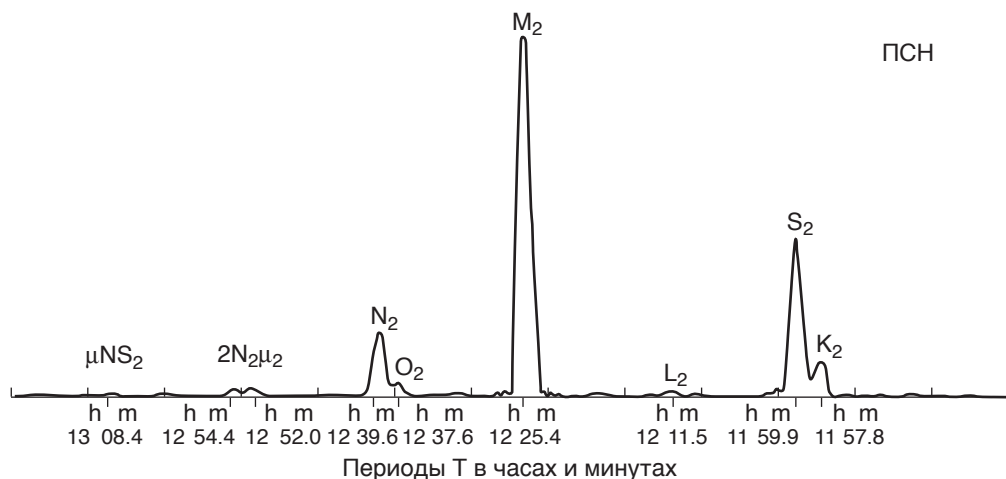
За явлением приливов в океане люди наблюдали еще с древности. На основную причину приливов и отливов в океане впервые указал Исаак Ньютон. Теория приливообразующей силы была дана в его фундаментальной работе 1687 г. «Математические начала натуральной философии». В 1774 г. великий французский математик Пьер-Симон Лаплас показал, что вращение Земли является главным фактором в решении этой проблемы.

Известно утверждение британского физика Уильяма Кельвина, что Земля обладает жесткостью стали, возникшее из рассмотрения прили-

вов. В 1863 г. он обратил внимание на очень простой способ определения средней жесткости земного шара. Его идея состояла в следующем. Если предположить, что Земля – это расплавленное тело, покрытое тонкой корой, то тогда приливные смещения земной поверхности должны почти точно совпадать с приливными смещениями эквипотенциальной поверхности и океанических приливов не должно быть. К тому времени океанические приливы были изучены довольно подробно, и сам факт их существования свидетельствовал о том, что толщина жесткой оболочки Земли должна ис-

числяться не десятками, а сотнями или тысячами километров. При толщине коры порядка десятков километров ей следовало бы приписать значения модуля сдвига, на много порядков превосходящие любые разумные пределы.

Приливная деформация планеты или спутника приводит как к вертикальному, так и к горизонтальному смещению поверхности, а также к возмущению гравитационного поля. В 1909 г. английский ученый Август Ляв ввел два параметра, с помощью которых можно судить о свойствах планетных недр. Первый параметр ( $h$ ) характеризует, насколько поверхность Земли смещается под действием приливных сил со стороны Луны и Солнца в вертикальном направлении; второй параметр ( $k$ ) характеризует изменение потенциального поля Земли из-за перераспределения масс в ее недрах. Есть еще третий параметр – число Шиды ( $l$ ), которое представляет деформации, вы-



Спектры приливных изменений силы тяжести в области полусуточных приливов в Талгаре. Спектральный анализ 18-месячного непрерывного ряда наблюдений приливных изменений силы тяжести, проведенных ИФЗ АН СССР: вверху – ПСТ-анализ полусуточных теоретических приливов, рассчитанных с точностью до 0.01 мГал; внизу – ПСН-анализ соответствующих наблюдаемых приливов. Отношение амплитуд (максимумов) наблюдаемых пиков к теоретическим дает значение гравиметрического фактора, связанного с внутренним строением Земли. Буквами обозначены общепринятые названия приливных волн. Парийский Н.Н. Развитие наук о Земле в СССР. М.: Наука, 1967

званные приливной силой на планете в горизонтальном направлении. Если бы Земля была абсолютно твердым телом, то эти параметры были бы равны нулю.

Изучение реакции Земли на приливное взаимодействие относится к началу XX века, когда был теоретически рассчитан отклик для сжимаемой и однородной модели Земли. Развитие сейсмологии в то вре-

мя сильно уточнило наше представление о строении Земли, затаив вклад от изучения приливов. Но когда приливные возмущения были впервые зарегистрированы на орбитах искусственных спутников – в середине 1960-х гг. – поднялся сильный ажиотаж. К сожалению, ни одна из первых попыток определить число Лява ( $k$ ) из данных спутниковых траекторий не была успешна из-за влияния океани-

ческих приливов, которые искажали данные о деформации твердой земной поверхности.

В середине 1960-х гг. в лаборатории внутреннего строения Земли Института физики Земли (ИФЗ АН СССР) под руководством члена-корреспондента АН СССР Н.Н. Парийского были начаты интенсивные экспериментальные исследования земных приливов для уточнения моделей внутреннего строения Земли<sup>2</sup>. Уже к 1970-м гг. в ИФЗ были накоплены уникальные многолетние серии непрерывных приливных наблюдений в Обнинске, Красной Пахре и Талгаре, анализ которых позволил определить значения чисел Лява – с точностью около 1%, что соответствует точности измерений с помощью гравиметра при определении амплитуд приливных волн около 0.2 микрогала (1 мкГал =  $10^{-6}$  Гал)<sup>3</sup>. При столь высокой точности наблюдений возникла необходимость учитывать эффекты океанических приливов не только в прибрежных, но и в континентальных областях. Расчеты ученых показали, что даже для весьма удаленных от океана пунктов (таких, как Обнинск или Талгар) учет влияния океана, так называемая «поправка за океан», имеют величину порядка

1 мкГал, что значительно превышает погрешности наблюдений.

В последние годы, благодаря внедрению радиointерферометров со сверхдлинной базой и криогенных гравиметров, точность астрометрических и приливных гравиметрических наблюдений возросла более чем на несколько порядков. С увеличением точности современной геодезии приливную реакцию Земли можно измерить с помощью спутниковой альтиметрии и Глобальных систем позиционирования. Точность современной спутниковой лазерной локации (Satellite Laser Ranging Systems, SLR) составляет менее 1 см, что позволяет определить координаты станции и параметры ориентира Земли. Данные с геодезических спутников – американских LAGEOS (запущены 4 мая 1976 г. и 23 октября 1992 г.), французских STELLA (26 сентября 1993 г.) и STARLETTE (6 февраля 1975 г. и 26 сентября 1993 г.) – используют для определения числа Лява Земли по движению станции наблюдения. Это открывает принципиально новые возможности исследования внутреннего строения Земли.

---

## ПРИЛИВНОЕ ТРЕНИЕ

---

Предположим сначала, что недра планеты идеально упругие. Наибольшая ось деформируемой приливом планеты расположена вдоль линии, которая соединяет центры планеты и спутника. Тогда, если планета вращается быстрее, чем спутник обращается вокруг нее по орбите, приливные выступы при вращении планеты будут перемещаться по ней, все время оставаясь на линии центров. В этом случае вдоль линии центров момент сил, действующий между приливным горбом и возмущающим телом, равен нулю. Это верно

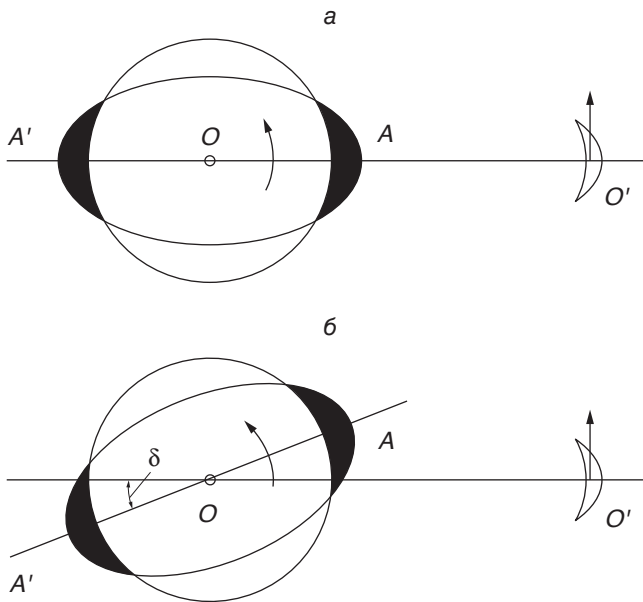
---

<sup>2</sup> Молоденский С.М. Приливы и нутация Земли // Астрон. Вестник. 2004. Т. 38 (6). С. 542–558.

<sup>3</sup> Гравиметр – прибор для измерения ускорения силы тяжести. Гал – единица измерения ускорения, применяется в гравиметрии при измерениях ускорения свободного падения  $g$ . Стандартное значение  $g$  на Земле – 980.665 Гал. Изменение ускорения силы тяжести на поверхности Земли в точке, лежащей на линии центров Земля – Луна, из-за воздействия приливообразующей силы составляет 0.11 миллигал (мГал). Современные гравиметры уже достигли точности определения  $g$  на уровне  $\sim 10^{-7}$ – $10^{-9}$  при относительных измерениях, а точность при абсолютных измерениях может составлять 0.03–0.07 мГал.

только при отсутствии диссипации (от лат. *dissipatio* – рассеивание) в системе.

Рассмотри случай, когда свойства планеты отклоняются от идеальной упругости. Если планета не вращается синхронно с приливным периодом, ее недра при каждом приливном цикле подвергаются периодической приливной деформации. Такие изменения всегда сопровождаются диссипацией, и приливный отклик планеты будет отставать по фазе от периодического приливного возмущения. Следовательно, приливный горб будет смещен на некоторый малый отрицательный угол по отношению к линии центров. Это угловое смещение линейно зависит от коэффициента затухания и частоты возмущения. Если планета вращается быстрее, чем приливный горб, то наличие диссипации будет приводить к передаче момента вращения планеты орбитальному движению возмущающего тела. Часть кинетической энергии вращения планеты передается орбитальному движению приливообразующего тела, а остаток рассеивается в планете в виде тепла. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока угловая скорость вращения планеты не сравняется с угловой скоростью орбитального движения возмущающего тела. Если вращение планеты отстает от вращения приливного горба, то приливный момент стремится передать угловой момент



Система Земля – Луна. Приливные выступы для: а – идеально упругой планеты или спутника, б – при наличии трения (из-за отклонения свойств вещества Земли от идеальных, в океанах возникает запаздывание максимума прилива). В точке А – гравитационная сила притяжения Луны максимальна, в точке А' – минимальна, О – центр Земли, О' – центр Луны,  $\delta$  – угол запаздывания максимума прилива. Стрелками обозначены направление вращения Земли и направление движения Луны. Смещенный с оси вследствие трения приливный выступ вызывает замедление вращения Земли из-за момента сил, возникающего при взаимодействии Луны и приливного выступа; этот же момент сил увеличивает момент количества движения Луны по орбите, вследствие чего Луна отодвигается от Земли. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М. 2013. С. 67

и энергию орбитального движения возмущающего тела вращению планеты, и часть кинетической энергии переходит в тепло внутри планеты.

Периодические деформации фигуры планеты сопровождаются диссипацией энергии. Этот необратимый переход механической энергии в тепло планетных недр вносит свой вклад в энергетический баланс планеты, наряду с другими источниками ее разогрева, такими как радиоактивность,

гравитационное сжатие, поток солнечного излучения. Приливный разогрев не является существенным для внутренней энергетики всех планет земной группы. Однако для спутников планет-гигантов ситуация совсем иная<sup>4</sup>.

Приливная диссипация не только отвечает за наблюдаемые орбиты и спиновые состояния небесных тел, но и может влиять на тепловую эволюцию этих тел. В результате тепловой эволюции внутренняя температура планеты (или спутника) изменяется со временем. Это приводит к существенным изменениям внутренней структуры и физических свойств тела, таким как вязкость и жесткость, которые, в свою очередь, могут значительно изменить приливную реакцию тела и повлиять на его орбитальную эволюцию и вращение. В Солнечной системе мы можем найти несколько примеров, когда приливная и тепловая эволюция влияют друг на друга. Например, в спутнике Юпитера Европе приливное нагревание может быть достаточно интенсивным для поддержания присутствия жидкого подповерхностного океана. Кроме того, приливное нагревание может привести к вулканизму, как на спутнике Ио, значительно превышающему нагрев долгосрочными радиогенными изотопами. Когда значительная часть льда или жидкой воды присутствует внутри тела, приливное нагревание может повлечь за собой криовулканизм<sup>5</sup>. Считается, что это происходит в нескольких ледя-

ных лунах, таких как Энцелад, Титан, Европа и Тритон.

Теория приливов дает хорошие результаты для системы Земля – Луна. Приливное трение тормозит вращение Земли и систематически увеличивает продолжительность суток. В настоящее время скорость вращения Земли за счет приливного трения меняется очень медленно, хотя этот эффект был сильнее в прошлом, когда Луна была ближе к земле. Замедление вращения Земли из-за приливного трения приводит к увеличению орбитального момента количества движения Луны. В результате Луна испытывает систематическое отодвигание от Земли и ее орбита расширяется. Вопрос об эволюции лунной орбиты связан с проблемой происхождения Луны, кроме того, и изучение эволюции лунной орбиты дает ценную информацию о свойствах Земли в раннюю эпоху после ее образования. Таким образом, приливное трение приводит к замедлению вращения Земли и отодвиганию Луны от Земли<sup>6</sup>.

---

## ЛУНА КАК ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ТЕОРИИ ПРИЛИВОВ

---

Луна – одно из наиболее изученных тел Солнечной системы. Она находится на расстоянии всего в 60 радиусах Земли, и ее поверхность подвергается ежемесячной приливной деформации в 0.1 м под воздействием гравитационного поля Земли. Этот приливный потенциал периодически воздействует также на гравитационное поле Луны и ее ориентацию. Кроме того, на Луне нет океана, как на Земле, и приливные изменения

---

<sup>4</sup> Хаббард У. Внутреннее строение планет. Пер. с англ. М.: Мир. 1987.

<sup>5</sup> Криовулканы (холодные вулканы) извергают воду, метан, аммиак (криолаву), в отличие от вулканов, из которых извергается расплавленная скальная порода. Например, они действуют на спутниках Юпитера Ганимеде, Европе и спутнике Сатурна Энцеладе.

---

<sup>6</sup> Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: Наука и образование, 2013.

определяются только твердотельными приливами. Эти вариации обнаруживаются космическими аппаратами, находящимися на орбите Луны, и лазерными измерениями LLR (Lunar-Laser Ranging), проводимыми со станций на Земле. Эти точные регулярные измерения за последние 50 лет сделали Луну лучшим местом для проверки теории приливов. Интерпретация этих вариаций дает информацию о недрах Луны, но тем не менее все равно остается много вопросов о ее внутренней структуре и механизмах диссипации<sup>7</sup>.

Определение числа Лява  $k_2$  (число Лява второго порядка) на месячном периоде Луны (ее орбитальный период) было недавно получено в ходе выполнения с 2012 г. американского эксперимента GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) по изучению гравитационного поля и внутреннего строения, который включает точные измерения двух спутников, находящихся на орбите Луны<sup>8</sup>. Этот эксперимент аналогичен спутниковому проекту GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment NASA, DLR) в 2002–2017 гг. для изучения гравитационного поля Земли. Число Лява  $h_2$  определяется лазерным альтиметром LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) на борту американского орбитальной станции Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), который измеряет с 2009 г. смещения поверхности Луны с точностью до 10 см. Значения параметра диссипации Луны извлекают из измерений лазерной локации (LLR) путем анализа лунной ориентации и либрации. Лазерная локация Луны состоит в измерении расстояния между двумя точками на поверхности Земли

и Луны. Это выполняется в результате точных измерений времени движения в прямом и обратном направлениях светового луча, испускаемого лазером со станции на Земле, и возвращаемого лунными уголковыми отражателями, развернутыми астронавтами США и российскими роботизированными миссиями «Луноход» в 1970 и 1973 гг. Это позволяет определить расстояния Земля – Луна с точностью до сантиметра.

Мы находимся в начале изучения диссипативных свойств Луны, и наши знания по-прежнему фрагментарны. Установка новых, более компактных и оптимизированных одиночных лунных светоотражателей, лучше распределенных пространственно на Луне во время следующих полетов по пилотируемой программе *Artemis* (США), позволит улучшить точность измерений.

---

## РОЛЬ ПРИЛИВОВ В ИЗУЧЕНИИ НЕДР ПЛАНЕТ И СПУТНИКОВ

---

Наблюдения за изменением уровня поверхности Земли и других тел Солнечной системы помогают изучать их глубинное строение. Недра планеты не являются упругими и в результате подвергаются воздействию внутреннего трения, из-за которого приливная выпуклость точно не совпадает с положением приливногo тела, а демонстрирует фазовое отставание. Величина приливной деформации и фазовое отставание чувствительны к внутренним свойствам планеты: какие минералы находятся в недрах планеты, при каких температурах, при каком состоянии (жидкое или твердое). Чем «мягче» планета, чем больше она деформируется под влиянием приливов. Поэтому большая деформация (более высокие значения чисел Лява) подразумевает,

---

<sup>7</sup> Иванов М.А. Неразгаданные тайны Луны // Земля и Вселенная. 2019. № 4 (328). С. 52–63.

<sup>8</sup> Две новые лунные АМС // Земля и Вселенная. 2012. № 2. С. 35–36.



что внутренняя часть планеты является менее жесткой, т. е. содержит жидкие части, высокопористый материал и т. д., в то время как большое фазовое запаздывание подразумевает, что недра состоят из материала, который является более вязким. Таким образом, приливная реакция в виде приливных чисел Лява и угла запаздывания приливного горба используются для исследования внутреннего строения планет и спутников<sup>9</sup>.

При анализе приливных наблюдений на Земле сопоставляются амплитуды и фазы каждой гармоники теоретических приливов с измеренными значениями. Причем приливы – единственное геофизическое явление, для которого известны силы, вызывающие деформацию. Измерения приливов дают дополнительные сведения о внутреннем строении планеты, позволяя исследовать физико-механические свойства земных недр. Для регистрации отклонений отвеса устанавливается аппаратура, непосредственно связанная с земной корой. Под действием приливообразующей силы кора деформируется в направлении этой силы, и проводятся наклонномерные измерения. Приливные вариации силы тяжести регистрируются гравиметрами.

## МЕРКУРИЙ

Исследования недр Меркурия долгое время опирались на данные о магнитном и гравитационном поле, полученными американской межпланетной станцией *Mariner-10* в 1974–1975 гг. Более подробное картирование гра-

<sup>9</sup> Bagheri A., Efroimsky M., Castillo-Rogez J., Goossens S., Plesa A.-C., Rambaux N., Walterová M., Khan A., Giardini D. Tidal insights into rocky and icy bodies: An introduction and overview // *Adv. Geophys.* 2022. Vol. 63. P. 231–320.

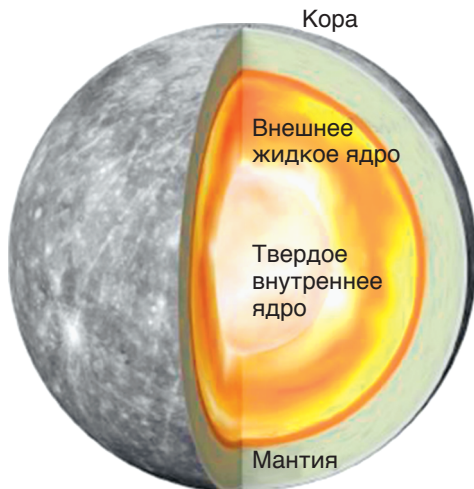


Схема внутреннего строения Меркурия по анализу геодезических данных, полученных космическим аппаратом *Messenger* (США). Модель планеты состоит из четырех слоев: твердого внутреннего ядра, внешнего жидкого ядра, мантии и коры. Genova A. et al. *Geoph. Research Letters*. 2019. Vol. 46 (7). P. 3625–3633

витационного поля Меркурия выполнено космическим аппаратом NASA MESSENGER (MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry и Ranging) в 2011–2015 гг., впервые выведенным на орбиту Меркурия<sup>10</sup>, и была определена гравитационная приливная реакция Меркурия (число Лява  $k_2$ ). Меркурий не имеет спутников, и приливы на Меркурии вызываются Солнцем. Меркурий ближайшая к Солнцу планета, и приливы на Меркурии сравнимы или даже сильнее, чем лунные приливы на Земле. Именно измерение момента инерции и чисел Лява Меркурия позволило ученым узнать, что Меркурий удивительно плотное для своих размеров тело, и это, скорее всего, связано с присутствием очень боль-

<sup>10</sup> Аняньева В.И. «Мессенджер» изучает Меркурий // *Земля и Вселенная*. 2016. № 4. С. 30–48.

шого железного ядра. Анализ данных лазерной альтиметрии Mercury Laser Altimeter (MLA) предоставил первую оценку радиального смещения поверхности (число Лява  $h_2$ ). По этим значениям было определено наличие твердого внутреннего ядра с наиболее вероятным размером от 0.3 до 0.7 от радиуса жидкого ядра.

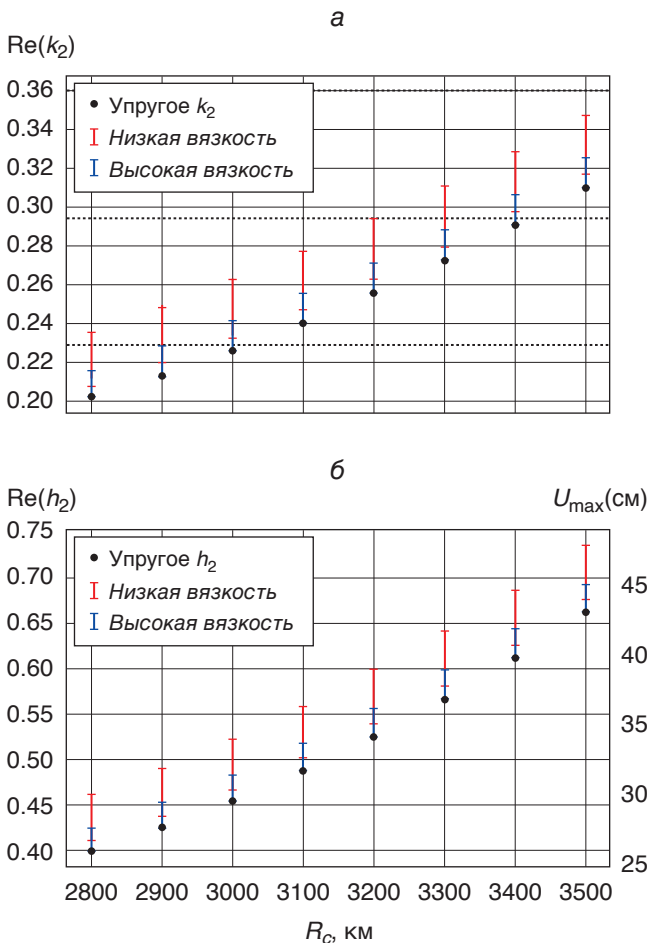
Следующая программа изучения Меркурия связана с космическим аппаратом VeriColombo (ESA, JAXA), который должен выйти на его орбиту в 2025 г. Он проведет точные измерения гравитационного поля, а также выполнит лазерную альтиметрию с более глобальным охватом,

чем это было возможно с помощью MESSENGER. Это поможет решить некоторые проблемы в понимании внутренней структуры Меркурия.

## ВЕНЕРА

В 1996 г. по данным наблюдений американских межпланетных станций *Magellan* и *Pioneer Venus Orbiter* была получена оценка числа Лява  $k_2$  и сделан вывод, что Венера имеет полностью жидкое ядро. Однако этот вывод основывался на рассмотрении чисто упругой модели планеты. В настоящее время показано, что при решении этой

Графики модельных значений вещественной части неупругих чисел Лява  $k_2$  (а) и  $h_2$  (б) в зависимости от радиуса ядра  $R_c$  для ряда моделей Венеры с различной вязкостью. Горизонтальные штриховые линии показывают полосу допустимых наблюдений значений числа Лява  $k_2$ . Если вязкость низкая, то предпочтительнее модели с радиусом ядра 3100–3400 км, а если вязкость высокая, то с ядром 3200–3500 км. Так как вязкость экспоненциально убывает с увеличением температуры, то большое ядро свидетельствует о «холодной мантии», а среднее ядро – о «горячей мантии». Агостини D.O., Гудкова Т.В. *Астрон. вестн.* 2023. Т. 57 (5). С. 410



задачи необходимо учитывать вязкоупругие свойства недр Венеры. К сожалению, погрешность измерений на сегодняшний день достаточно высока, и сейчас нет однозначного ответа о размере и состоянии ядра, имеющиеся данные не ограничивают ни состояние ядра, ни минералогию мантии и температурный профиль<sup>11</sup>.

Из-за отсутствия точных приливных измерений Венера по-прежнему остается самым загадочным из земных миров. Сейчас планируются два проекта по изучению Венеры для запуска в 2031 г. Миссия NASA VERITAS (Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy) изучит геологическую и вулканическую активность, а также выполнит измерение гравитационного поля и приливной реакции планеты<sup>12</sup>. Программа ESA *EnVision* будет сосредоточена на геологических структурах Венеры, которые представляют интерес для понимания тепловой эволюции планеты<sup>13</sup>. Как и в случае VERITAS, основные цели миссии также включают определение гравитационного поля с пространственным разрешением около 170 км. В то время как VERITAS обеспечит глобальную геофизическую съемку, миссия *EnVision* предназначена для целенаправленных, повторных наблюдений за регионами, представляющими интерес,

выявленными первой миссией. С помощью новых данных будет возможно уточнение размера ядра Венеры, и первые измерения фазы запаздывания приливного горба наложат ограничения на величину средней вязкости мантии.

---

## МАРС

---

Благодаря многочисленным успешным полетам, особенно за последние два десятилетия, Марс стал самой геофизически исследованной планетой после Земли. Это единственная планета земной группы, за исключением Земли, которая имеет естественные спутники. Приливы на Марсе генерируются главным образом Солнцем и Фобосом, поскольку приливы, вызванные Деймосом, значительно слабее из-за его небольших размеров и большего расстояния. Обширный объем информации о Марсе был получен с орбитальных и спускаемых космических аппаратов (*Mars Pathfinder*, *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey*, *Mars Reconnaissance Orbiter*, *Mars Express*). До проведения сейсмических измерений, выполненных миссией *InSight*, геодезические измерения были единственными данными при построении моделей внутреннего строения Марса.

Число Лява  $k_2$ , полученное из анализа данных MGS в сочетании с информацией от американских межпланетных станций *Viking Lander* и *Mars Pathfinder*, указало на наличие большого жидкого ядра радиусом 1520–1840 км. На основе анализа сейсмических данных от марсотрясений, обнаруженных в ходе сейсмического эксперимента SEIS миссии NASA *InSight*, в 2021 г. был определен радиус жидкого марсианского ядра  $1830 \pm 40$  км с плотностью 5700–6300 кг/м<sup>3</sup>. В 2023 г., используя большой объем сейсмиче-

---

<sup>11</sup> Dumoulin C., Tobie G., Verhoeven O., Rambaux N. Tidal constraints on the interior of Venus // J. Geophys. Res.: Planets. 2017. Vol. 122. № 6. P. 1338–1352. Amorim D.A., Гудкова Т.В. Внутреннее строение Венеры на основе модели PREM // Астрон. вестн. 2023. Т. 57 (5). С. 403–414.

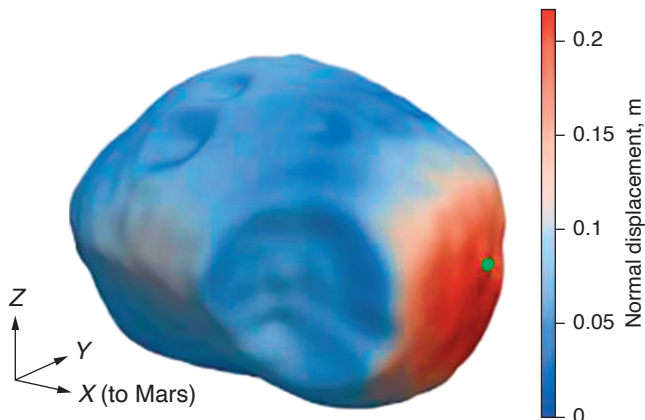
<sup>12</sup> Cascioli G., Hensley S., De Marchi F., Breuer D., Durante D., Racioppa P., Iess L., Mazarico E., Smrekar S.E. The determination of the rotational state and interior structure of Venus with VERITAS // Planet. Sci. J. 2021. Vol. 2. P. 220–231.

<sup>13</sup> Rosenblatt P., Dumoulin C., Marty J.-C., Genova A. Determination of Venus' interior structure with EnVision // Remote Sens. 2021. Vol. 13. id. 1624.

---

Смещение поверхности Фобоса по нормали (normal displacement) за счет приливного воздействия Марса (в метрах). Ось X направлена к Марсу.  
Dmitrovskii A.A. et al. Icarus. 2021. P. 114714

---



ческих данных, было найдено, что металлическое ядро Марса на 150–170 км меньше (радиус ядра Марса  $1650 \pm 20$  км) и на 5–8% плотнее ( $6500 \text{ кг/см}^3$ )<sup>14</sup>. Эти результаты точного сейсмического анализа очень хорошо согласуются с выводами, основанными на данных о приливах. Это соответствие иллюстрирует силу геодезических измерений при зондировании внутренней структуры планет.

Изучение приливов в системе Марс – Фобос – Деймос не только дает информацию о внутреннем строении Марса, но может быть использовано для получения знаний о недрах и происхождении двух его спутников. Результаты показали, что с большой вероятностью два спутника являются остатками распавшегося прародителя, который был разрушен 1–2.7 млрд лет назад. Более того, основываясь на данных о приливной эволюции спутников, сделан вывод, что Фобос и Деймос являются сильно диссипативными телами и имеют сильно раздробленную и пористую внутреннюю структуру. В зави-

симости от внутренних свойств спутников приливы, вызываемые на них Марсом, могут быть значительными. Моделирование приливных деформаций Фобоса дало несколько возможных моделей его внутреннего строения, таких как «груда камней» или монолитное тело, состоящее из горных пород или смеси льда и горных пород. Какая из этих моделей реальна, будет исследовано предстоящей японской миссией Martian Moons eXploration (MMX), запуск которой намечен на 2024 г., и образцы грунта, возвращенные со спутников, смогут пролить свет на происхождение Фобоса и Деймоса.

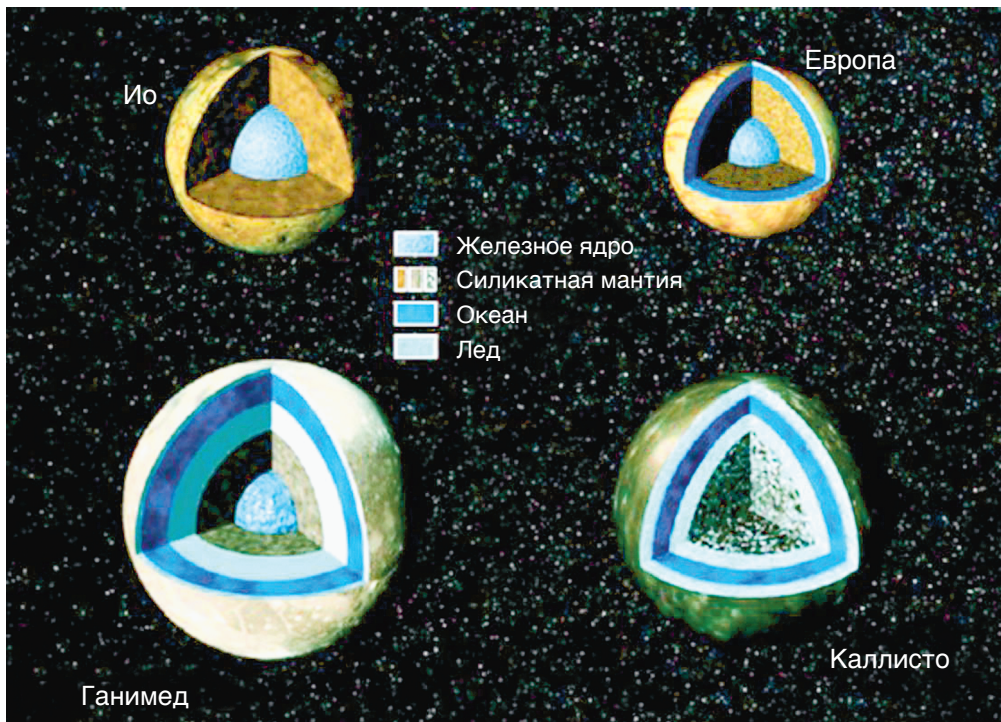
---

## СПУТНИКИ ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ

---

Ледяные спутники планет-гигантов многочисленны и различаются по своим свойствам. Огромные ледяные спутники могут иметь слои с жидкой водой под слоем ледяной поверхности. Решающим фактором для существования внутренних океанов является наличие летучих компонент, таких как аммиак. Наличие и протяженность таких слоев зависит от теплового состояния и состава водного слоя во внешней части спутника. Точное определение гравитационного поля спутника – это одна из

<sup>14</sup> Samuel H., Drilleau M., Rivoldini A., Xu Z., Huang Q., Garsia R.F., Lekic V., Irving J.C.E., Badro J., Lognonne P.H., Connolly J.A.D., Kawamura T., Gudkova T., Banerdt W.B. Geophysical evidence for an enriched molten silicate layer above Mars's core // Nature. 2023. Vol. 622. P. 712–717.

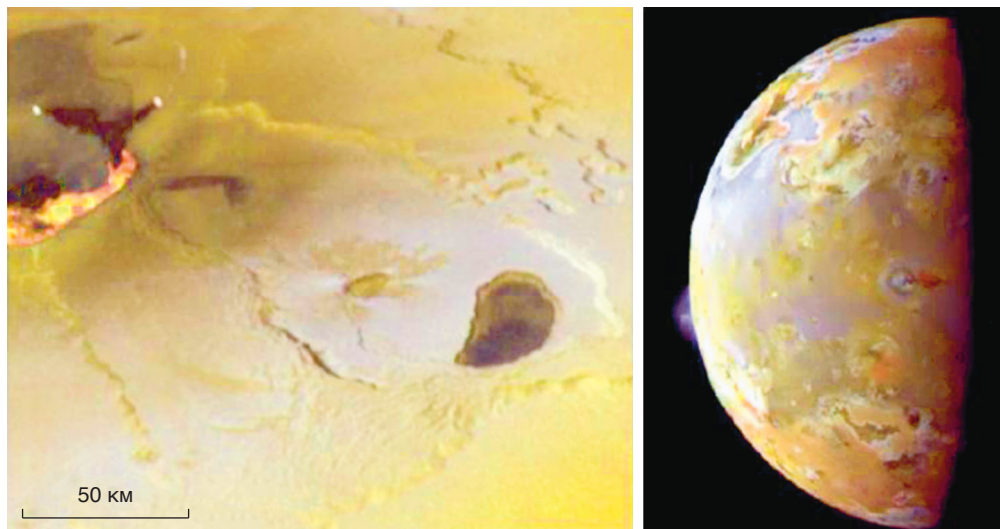


Модели внутреннего строения спутников Юпитера Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто. Состав оболочек: железное ядро, силикатная мантия, океан, лед – показан цветом. Sotin C., Tobie G. *Comptes Rendus De L'Academie Des Sciences Physique*. 2004. V. 5. P. 772

возможностей обнаружить подповерхностные океаны. Амплитуда и фаза задержки приливного горба как отклика на периодические внешние силы могут быть использованы для определения общей жесткости недр, что также, в свою очередь, накладывает ограничение на существование жидких слоев<sup>15</sup>. Приливные амплитуды будут на порядок величины больше при наличии жидкого слоя под внешним ледяным слоем. Поэтому приливный отклик слоя льда может быть использован для определения толщины ледяного слоя, и, следовательно, глубины залегания жидкой воды.

<sup>15</sup> Hussmann H., Sotin C., Lunine J.I. Interiors and evolution of icy satellites. In *Treatise on Geophysics*. 2<sup>nd</sup> ed. 2015. Vol. 10. P. 605–635.

Огромная масса и размер Юпитера, а также небольшое расстояние от спутников вызывают сильные приливные силы. Это важный источник энергии в системе Юпитера. Приливное трение считается на порядок больше радиогенного и само может объяснить наличие океана под ледяной корой. К концу 1970-х гг. стало очевидным значение приливного трения для некоторых спутников. Для Ио, Европы, Ганимеда и Энцелда приливное трение рассматривается как основная причина вулканической деятельности Ио и значительного обновления поверхности за время существования. Программа NASA *Galileo* (работала на орбите Юпитера в 1995–2003 гг.) привела к дальнейшему улучшению знаний о внутрен-



Снимки высокого разрешения спутника Юпитера Ио по данным, полученным космическим аппаратом *Galileo* (США). Вулканические плюмы поднимаются на высоту более чем на 100 км над его поверхностью: слева – недавний поток горячей лавы на поверхности; справа – плюм виден на кромке спутника. *Tobie G. International School on Space Science, September 12–16, 2016, L'Aquila, Italy*

ней структуре галилеевых спутников. Аналогичные данные были получены в 2004–2017 гг. межпланетной станцией *Cassini* (США) для некоторых ледяных спутников Сатурна<sup>16</sup>.

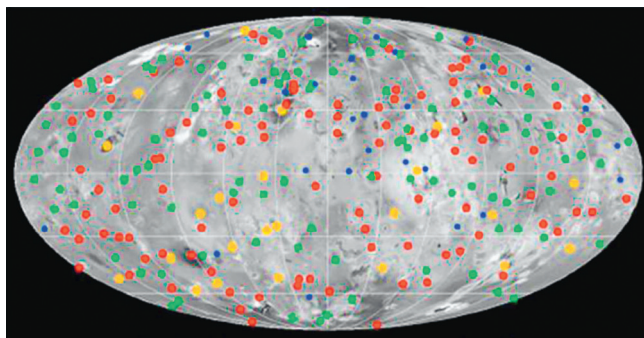
## ПРИЛИВНОЙ РАЗОГРЕВ

Приливная реакция спутников планет-гигантов стала темой, вызывающей большой интерес после того, как было признано, что приливное трение в недрах этих спутников может быть значительным источником тепла. Эти условия наилучшим образом выполняются для спутника Юпитера Ио, для которого приливное трение до сих пор является доминирующим. В настоящее время приливный нагрев дает суще-

ственный вклад в тепловой бюджет Европы, Энцелада и, возможно, Титана. Пример сильной активности Энцелада показывает, что внутренний состав и тепловое состояние могут быть решающим для приливных эффектов.

Обнаружение активного вулканизма на Ио было одним из самых неожиданных результатов полетов двух американских аппаратов *Voyager* к Юпитеру. Еще перед их пролетом в 1979 г. вблизи Ио было высказано предположение о том, что приливный разогрев может играть главную роль в истории спутника. Но даже с учетом этого предположения трудно было предвидеть реальные масштабы современной вулканической активности Ио. Снимки с *Voyager-1* отчетливо засвидетельствовали об очень молодой поверхности Ио с точки зрения геологии, на которой полностью отсутствуют видимые ударные кратеры.

<sup>16</sup> Шевченко В.В. Жизнь и смерть «Галилео» // Земля и Вселенная, 2004, № 3. Уральская В.С. Некоторые итоги миссии «Кассини-Гюйгенс» // Земля и Вселенная, 2019, № 1.



Спутник Юпитера Ио – самый вулканически активный объект в Солнечной системе. Мощность его приливного нагрева оценивается между 65 и 125 ТВт. Распределение и мощность теплового излучения извергающихся в настоящее время вулканов Ио. Цветом показано тепловое излучение от слабого к большому: синий, зеленый, красный, желтый. С марта 2017 г. по июль 2022 г. космический аппарат Juno (США) идентифицировала 266 горячих точек. Davies A.G. et al. *Nature Astronomy*. 2023. Vol. 8. P. 95

Вулканические структуры были найдены даже до обнаружения активных извержений, происходивших в течение пролета *Voyager*. Поверхность Ио перерабатывается с интенсивностью 0.1 см/год.

Тепловая структура и энергетика Ио довольно необычны. Спутник Юпитера Ио имеет такой же размер как Луна, но наблюдаемый средний тепловой поток на поверхности приблизительно в 100 раз выше. Этот тепловой поток сопровождается активной и обширной вулканической деятельностью, которая выше, чем у любого тела Солнечной системы. Не существует способа объяснить, как такая большая энергия могла быть запасена изначально в спутнике. На самом деле, Ио непрерывно получает энергию от Юпитера, и этот способ – механизм приливного разогрева – представляет пример роли приливной диссипации. Нагревается ли Ио некоторым другим механизмом, отличным от приливной диссипации? В качестве такой возможно-

сти предлагался электрический разогрев, так как Ио движется в сильном магнитном поле Юпитера, и вдоль магнитных силовых линий, проходящих через Ио, текут индуцированные токи, цепь замыкается в ионосфере Юпитера. Если такой механизм и имеет место, то только как дополнительный источник.

Несмотря на несколько наблюдений со стороны миссий и устойчивую программу наземных наблюдений, нам по-прежнему не хватает полного понимания механизмов, ведущих приливный ра-

зогрев в Ио, и особенно того, что это говорит нам о глубоких недрах Ио. Наблюдения магнитного поля Галилео указывают на то, что спутник может содержать глобальный магматический слой, хотя его происхождение обсуждается. Измерения вулканической активности в качестве показателя поверхностного теплового потока на основе наборов данных космических аппаратов, охватывающих несколько десятилетий, обнаружили более низкую активность в экваториальной области. Пик теплового потока приходится на средние широты. Распределение областей высокой диссипации внутри Ио очень зависит от локализации диссипации: в астеносфере или нижележащей мантии.

Приливные числа  $h_2$  и особенно  $l_2$  более чувствительны к распределению расплава, чем  $k_2$ , и позволили бы различать режимы с доминированием мантии или с доминированием астеносферы. Кроме того, амплитуда дневной либрации Ио будет в несколько раз больше, если Ио имеет

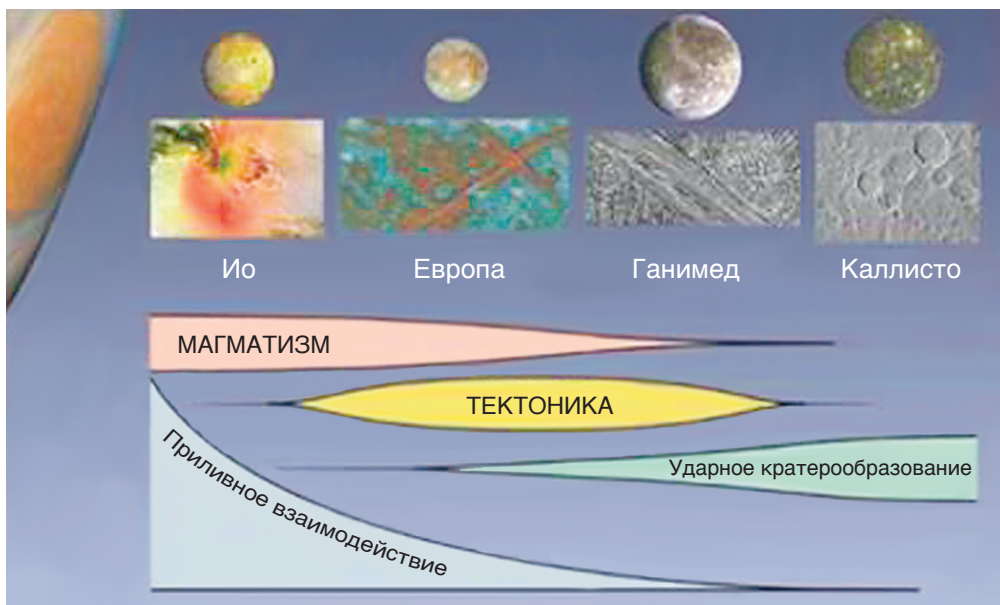
океан магмы по сравнению с частично расплавленной астеносферой. По оценкам, амплитуда либрации может быть больше 1 км в первом случае. Миссия ESA JUICE (JUperiter ICy moons Explorer), которая была запущена в апреле 2023 г. и наблюдения с аппарата NASA Juno (два близких пролета к Ио в 2023 и 2024 гг.) могут пролить свет на поведение этого спутника.

На данный момент имеющиеся ограничения приливных параметров обледеневших спутников немногочисленны. Множественные облеты спутника Сатурна Титана орбитальным аппаратом *Cassini* привели к высокому значению числа Лява  $k_2$ , которое было интерпретировано как свидетельство наличия океана высокой плотности: около  $1200 \text{ кг/м}^3$ . Такая высокая плотность указывает на большое содержание солей, что не может быть одно-

значно объяснено космохимическими пропорциями. Согласно прогнозу, измерение гравитационного поля в рамках миссии NASA *Europa Clipper* (запуск в конце 2024 г.) даст возможность получить довольно точное приливное число Лява  $k_2$  для спутника Европа. Сочетание радиолокационных измерений и получения снимков поверхности дадут значение числа  $h_2$ . Миссия JUICE также планирует получить эти параметры для спутника Ганимед.

## ГЕОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ – ЗЕРКАЛО ПРИЛИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

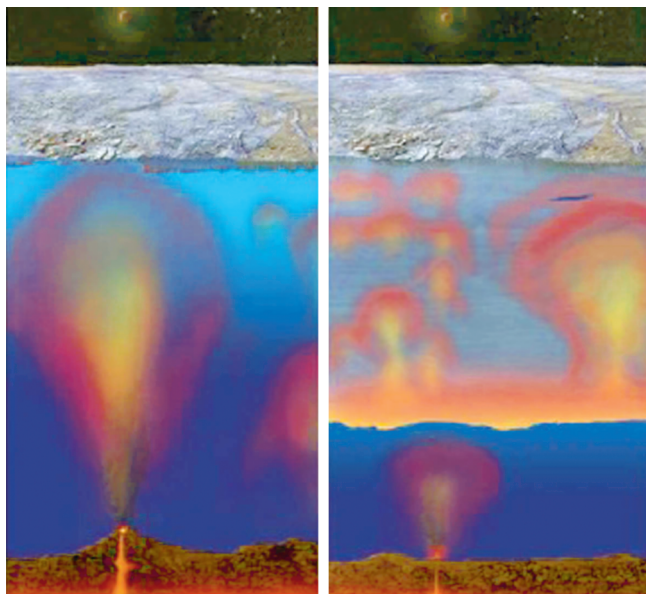
Поверхностные геологические особенности в результате приливного взаимодействия могут также использоваться для ограничения как внутреннего стро-



Галилеевы спутники Юпитера и их энергетический баланс. Приливное взаимодействие ослабляется от Ио к Калисто. Геологическая активность уменьшается с увеличением расстояния от Юпитера: магматизм, тектоника, ударное кратерообразование.

Hussmann H. *The Solar System overview*. DLR, 2012–2013





*Разрез спутника Юпитера Европа. Схематично показаны возможные процессы в недрах спутника, которые являются причиной его молодой поверхности: локализованные источники тепла в силикатной оболочке: вода очень горячая и во время вулканического извержения, поднимаясь к поверхности, проплавляет ледовую кору, вызывая смещения (слева); лед с примесями плавится при более низкой температуре, чем чистый водяной лед; из-за разогрева приливным трением внешних слоев происходит частичное плавление вещества, что приводит к движению к поверхности (справа).*

*Hussmann H. DLR. Potsdam Summer school. Sep 24, 2012*

ения, так и тепловой эволюции планетарных тел. Хотя эта область все еще является областью активного изучения, некоторые выводы были получены.

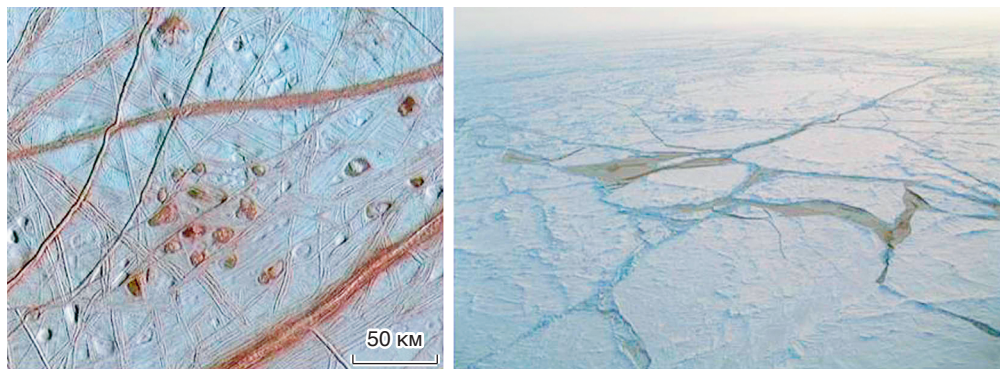
Степень приливного воздействия на поверхность спутника зависит не только от таких орбитальных элементов, как эксцентриситет и наклонение, от близости к родительской планете, а также от реакции материала, из которого состоит планета или спутник, на приливную деформацию. Это, в свою очередь, сильно зависит от наличия или отсутствия океана, реологии недр и величины теплового потока, выделяемого спутником. Таким

образом, геологические особенности, видимые на поверхности, могут дать представление о внутренней структуре и тепловом состоянии. Например, имеется или нет тектоническая активность, является диагностической характеристикой для тепловой истории спутника. Аналогично, наличие извержений в виде поверхностных потоков или гейзеров может дать представление об истории охлаждения спутника и составе его подповерхностного океана. Наконец, даже изменения в морфологии кратера могут характеризовать общую тепловую историю спутника.

Полученные снимки поверхности высокого разрешения спутника Европа проливают некоторый свет на его внутреннюю структуру и эволюцию. По сравнению с другими спутниками на Европе имеются характерные

тектонические черты, такие как поднятия, блоки, хаотические террасы. Малое количество кратеров указывает на то, что поверхность обновлялась за счет тектонических или криовулканических процессов.

Поверхность Европы моложе, чем поверхность других галилеевых спутников Ганимеда и Каллисто. Причинами могут быть: 1) тонкая кора, которая периодически разрывается под действием приливных сил, блоки подвергаются потокам жидкого океана снизу, и могут двигаться относительно друг друга, так как температура поверхности ниже температуры



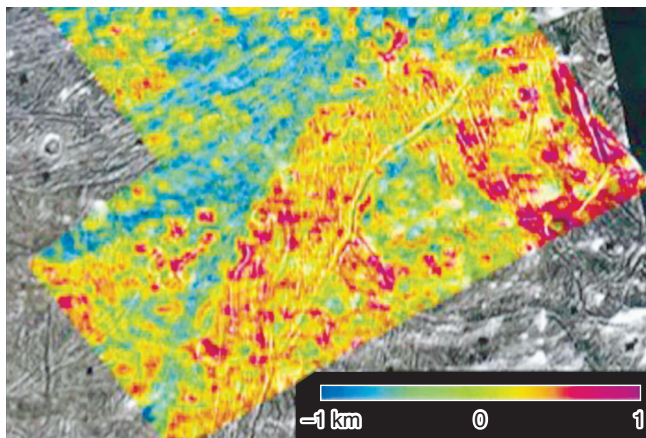
Трещиноватая ледяная поверхность спутника Юпитера Европы (слева). Видны разломы, купола и красноватые пятна и полосы, что характерно для тектоники и криовулканизма. Снимок получен космическим аппаратом Galileo (США). Справа – трещины в паковом льду Арктики на Земле

замерзания, то вода на поверхности быстро замерзает; 2) локализованные источники тепла в силикатной оболочке: вода очень горячая и во время вулканического извержения, поднимаясь к поверхности, проплавляет ледовую кору, вызывая смещения. При этом вулканизм необязателен, конвекция в силикатной оболочке может создавать зоны более высокой температуры и условия для продвижения горячей воды к поверхности. Это приветствуется экзобиологами, поскольку при таком сценарии условия на границе силикаты/океан похожи на условия на дне земного океана; 3) лед с примесями плавится при более низкой температуре, чем чистый водяной лед; из-за разогрева приливным трением внешних слоев происходит частичное плавление вещества, что приводит к движению расплава от области большего давления к меньшему (т. е. к движению вещества к поверхности) и образованию хаотичных террас.

Энцелад демонстрирует тектонические особенности, которые морфологически схожи с таковыми в на Европе, но тектонизм Энцелада явля-

ется региональным, с активностью, сосредоточенной вблизи южного полюса. Толщина оболочки льда на Энцеладе, по-видимому, значительно меняется в зависимости от местоположения; ледяная оболочка очень тонкая на южном полюсе, и толще всего вдоль экватора. В неоднородной ледяной оболочке усиливаются приливные напряжения в тонких зонах. Таким образом, степень тектонической активности вполне может быть показателем толщины ледяной оболочки, причем более старые тектонические области представляют собой в прошлом тонкие зоны. Эта интерпретация предполагает, что, как и на Европе, множественные гребни трещин указывают на относительно тонкие ледяные оболочки.

Хочется отметить еще один интересный случай – это спутник Сатурна Япет. Известно, что если космическое тело вращается, его форма будет не идеальным шаром, а немного сплюснутой. Всем известно, что из-за вращения Земли вокруг своей оси ее радиус на экваторе примерно на 30 км больше, чем радиус на полюсах. Зная скорость вращения тела, можно вы-



Поверхность спутника Юпитера Ганимеда. Геологические черты указывают на тектонические процессы в прошлом и криовулканическую активность. Для наглядности перепад высот показан цветом от  $-1$  км до  $1$  км. Tobie G. International School on Space Science, September 12–16, 2016, L'Aquila, Italy

числить, какая у него должна была быть форма, если бы оно было в равновесии. Однако не всегда это соответствие выполняется. Форма Япета соответствует периоду обращения длительностью нескольких часов, но на самом деле период Япета составляет почти 80 дней. Это указывает на то, что когда-то Япет вращался значительно быстрее, чем сейчас. Замед-

ление вращения, скорее всего, произошло из-за приливных сил со стороны Сатурна.

За последние два десятилетия наше понимание внутренней структуры планет и спутников было значительно улучшено благодаря данным космических миссий. В ближайшее десятилетие нас ждет еще много удивительных открытий.

**Издательство** предлагает услуги по редакционно-издательской подготовке материалов, сборников, а также весь комплекс полиграфических услуг

**Издательство «Наука»** готово оказать услуги под ключ по организации и проведению семинаров, конференций, презентаций, выставок в конференц-зале и на экспозиционных площадках издательства по адресу:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7(495)276-7735  
 Подробная информация на сайте [www.naukapublishers.ru/history/partnership](http://www.naukapublishers.ru/history/partnership)