

# ПЛАНЕТЫ НА ЛЕНТЕ СЕЙСМОМЕТРА

Планеты Солнечной системы, как и Земля, испытывают «планетотрясения». Это подтвердила уже ставшая исторической американская миссия «Аполлон» на Луну. Полученные в ходе этой миссии сейсмические данные учёные анализируют до сих пор и опираются на них при подготовке новых планетных исследований. Но зачем мы изучаем сейсмическую активность планет? И что нам о ней известно?

**Доктор физико-математических наук Тамара ГУДКОВА,  
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.**

Самые глубокие скважины, пробуренные на Земле, позволяют заглянуть лишь в тонкий приповерхностный слой коры. Что же тогда говорить о других планетах, недра которых пока вообще недоступны для прямых исследований. Знания о внутреннем строении планет мы получаем благодаря сейсмологии — науке, изучающей колебания планеты и связанные с ними явления.

Причины возникновения упругих волн внутри и на поверхности планеты могут быть разными — как природными (удары метеоритов, геологические процессы), так и искусственными (взрывы). Для регистрации таких волн на поверхности планеты размещают сейсмические станции. Если измерять время пробега волн до различных станций и число таких наблюдений достаточно, можно восстановить пути распространения этих волн. На основе сейсмической информации определяют, как внутри планеты меняются давление, плотность и другие физические параметры, позволяющие судить о строении недр.

Впервые сейсмическое событие, случившееся на значительном расстоянии от точки наблюдения, было зарегистрировано чуть больше 120 лет назад. Это произошло 17 апреля 1889 года в Астрофизической лаборатории в Потсдаме (Германия), когда прибор, предназначенный для точного измерения силы тяжести, зарегистрировал сейсмические колебания, вызванные землетрясением в Японии. Расстояние от Японии до Германии волна прошла за несколько часов. В 1947 году на основе накопленных данных о времени прибытия объёмных сейсмических волн была создана сейсмическая модель Земли. Собственные колебания Земли впервые зарегистрированы после чилийского землетрясения 1960 года. Их регистрация открыла путь к созданию глобальной модели внутреннего строения планеты. В 1977—1984 годах были разработаны трёхмерные (3D) томографические модели земной мантии.

## «ПЛАНЕТНЫЕ» ВОЛНЫ И КОЛЕБАНИЯ

*Объёмные и поверхностные волны.* Если ударить в колокол, то всё пространство вокруг наполнится звуком. По существу, то же самое происходит после планетотрясения или искусственного взрыва: недра планеты заполняются «сейсмическим звуком» — сейс-

мическими волнами, которые распространяются от одной точки внешней поверхности планеты к другой. Планеты имеют слоистое внутреннее строение, в котором можно выделить кору, мантию и ядро. На границах раздела внутри планеты (например, на границе коры и мантии — границе Мохоровичича, мантии и ядра) объёмные сейсмические волны испытывают преломление и отражение. Многократно отражаясь, они постепенно затухают. Анализируя их, можно выявить, находится планетное вещество в жидком или твёрдом состоянии.

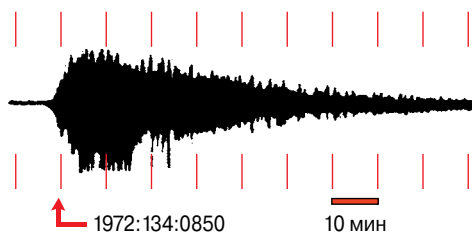
В дополнение к объёмным сейсмическим волнам возбуждаются поверхностные волны — волны Лява и Релея, которые распространяются вдоль поверхности. В этих волнах большая часть движений сконцентрирована в самом внешнем поверхностном слое планеты, и их амплитуда сильно уменьшается с глубиной.

*Собственные колебания.* Любое упругое тело при воздействии на него будет колебаться с определёнными частотами, зависящими только от упругих свойств самого тела. Планета — тоже упругое тело, в котором в результате сильного планетотрясения могут начаться естественные или собственные колебания, причём этот «звон» не прекращается иной раз в течение многих часов и даже дней. Аналогией может служить струнный музыкальный инструмент, который «излучает» музыкальные гармоники, зависящие от длины, плотности и натяжения звучащей струны.

Собственные колебания представляют особый интерес для исследования внутреннего строения планеты, так как для их анализа не требуется знать местонахождение источника и время события, а значит, достаточно иметь запись лишь с одной станции, что весьма ценно для внезапных исследований.

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ НА ЛУНЕ

На сегодняшний день Луна — единственное космическое тело, кроме Земли, для которого получены сейсмические данные. 21 июля 1969 года на Луне была установлена первая автоматическая сейсмическая станция «Аполлон-11» (США, НАСА). Она проработала до 27 августа того же года, после чего из-за неисправности управления вышла из строя. Непрерывные сейсмические



*Лунные сейсмограммы куда длиннее земных. Если первые исчисляются часами, то вторые не превышают в среднем 30 минут. Пример лунной сейсмограммы.*

наблюдения на Луне начались 19 ноября 1969 года, когда прилунилась станция «Аполлон-12». Затем в течение двух с половиной лет на видимой стороне Луны разместили ещё три сейсмические станции «Аполлон-14, -15 и -16». Таким образом, была создана сеть сейсмических станций для «прослушивания» Луны. Запись сейсмических данных прекратилась в сентябре 1977 года — к этому времени учёные получили достаточно большой объём информации, и продолжать эксперимент стало неразумно из-за огромных затрат.

Первым впечатляющим открытием было то, что на Луне действительно бывают лунотрясения. Станции зарегистрировали более

\* В зависимости от глубины эпицентра различают мелкофокусные (эпицентр находится на небольшой глубине) и глубокофокусные (эпицентр лежит глубоко). Так, мелкофокусных лунотрясений располагаются на глубине около 200 км, а землетрясения — до 300 км (отметим, что наиболее частые землетрясения — мелкофокусные, чей эпицентр располагается на глубинах менее 70 км).

\*\* Микросейсм — колебания поверхности планеты малой амплитуды, вызываемые прохождением циклонов и другими атмосферными процессами, на Земле — также океаном и деятельностью человека.

Оборудование для проведения измерений на поверхности Луны, использовавшееся в миссии «Аполлон-16» (1972). Применение сейсмографов (регистрирующих колебания почвы) для исследования планет предложено в 60-е годы XX века. Первый из них был установлен на аппарате Ranger 3 (США) в 1962 году и предназначался для исследования Луны, но так и не был доставлен на планету из-за проблемы с ракетноносителем. Сейсмические исследования позволили предварительно рассчитать, что жидкое ядро Луны радиусом  $330 \pm 20$  км имеет твёрдую сердцевину радиусом  $240 \pm 10$  км, содержащую большое количество железа. Кроме того, часть лунной мантии протяжённостью около 480 км на границе с ядром находится в частично расплавленном состоянии. Помимо железа в ядре Луны содержится несколько процентов таких лёгких элементов, как сера, что перекликается с новыми сейсмическими данными о строении Земли.

двенадцати тысяч сейсмических событий (несколько событий в день). Среди них — мелко- и глубокофокусные\* лунотрясения и удары метеороидов.

По данным сети «Аполлон» планетологи построили сейсмическую модель Луны. Оказалось, что наш естественный спутник имеет мантию, ядро и мощную кору толщиной 40—60 км на видимой стороне (недавние оценки толщины коры — 30—45 км) и несколько большую — на обратной.

Лунные сейсмограммы отличались от земных большей длительностью — до нескольких часов, что связано с сильной неоднородностью наружного слоя коры толщиной 15—20 км. Волны в нём бегут, рассеиваясь и многократно отражаясь, что затрудняет интерпретацию прихода объёмных сейсмических волн.

По земным меркам наибольшие лунотрясения считаются слабыми, тем не менее Луна — идеальный объект для сейсмических исследований, поскольку на ней нет атмосферы, океанов и промышленности, а соответственно и связанных с ними сейсмических помех.

Судя по имеющимся данным о сейсмичности Луны, в будущем можно рассчитывать на регистрацию её собственных колебаний, а значит, зондировать наружные оболочки Луны до глубины 1000 км.

## МАРС — ПЛАНЕТА ИНКОГНИТО

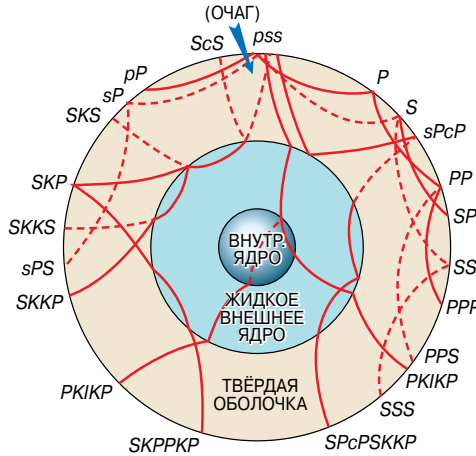
Марсианская сейсмология, приняв эстафету у лунной, началась 4 сентября 1976 года. Планировалось, что на Марсе будут работать одновременно две сейсмические станции, однако первый сейсмометр не включился, работал только сейсмометр «Викинг-2». С единственным сейсмографом вполне реально было попытаться измерить микросейсм\*\*, зарегистрировать какое-либо марсотрясение или падение метеорита. Но в течение 19 месяцев почти непрерывной работы сейсмометра ни одного подобного события не зарегистрировали. Однако уровень сейсмичности Марса, определённый по разломам, видимым на его поверхности, предполагает, что Красная планета сейсмически более активна, чем Луна.

## ПРИМЕРЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В НЕДРАХ ЗЕМЛИ

Продольная волна сжатия называется Р-волной. При её распространении упругие горные породы испытывают последовательно сжатия и растяжения. Р-волна может проходить как по жидким, так и по твёрдым участкам планетных недр.

Поперечная волна сдвига обозначается как S-волна. Она распространяется только в твёрдых телах. Волна, отразившаяся на поверхности внешнего ядра, обозначается дополнительной буквой с. Так, РсР — это Р-волна, прошедшая через мантию и отражённая земным ядром.

Буквы К и I относятся к Р-волнам, прошед-



расположен на глубине, волна, идущая от фокуса (источника) до внешней поверхности, обозначается строчными буквами р или s.

шим через внешнее и внутреннее ядро.

Сейсмические волны отражаются и от внешней поверхности. Продольные волны, порождённые Р-волной, обозначаются РР, порождённые РР-волной — РРР. Аналогично SS, SSS и т.д. для одного, двух и более отражений S-волны. Буквами SP помечают S-волну, распространяющуюся в мантии и отражённую от земной поверхности как Р-волна.

Если источник сейсмического события

## СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАНЕТЫ

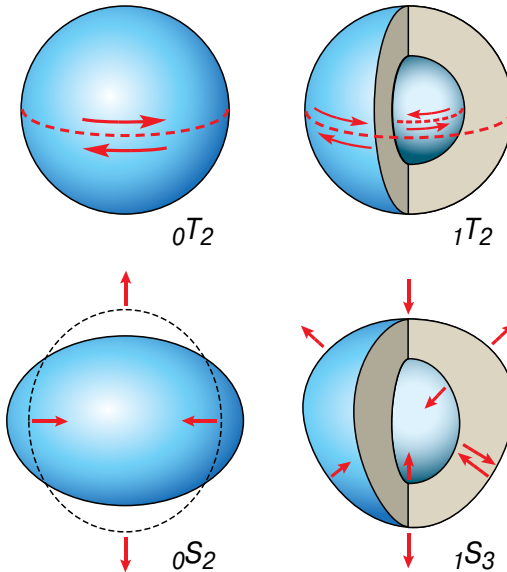
Колебания планеты можно рассматривать как колебания упругого шара. Существуют два типа таких колебаний: сферидальные колебания S и крутильные (или тороидальные) колебания T. Крутильные колебания, в отличие от сферидальных, не связаны с изменением объёма и формы планеты, поэтому они не изменяют её гравитационное поле и не регистрируются гравиметрами. Сейсмографы записывают колебания обоих типов. Тип собственных колебаний определяют, сравнивая спектры частот, записанные сейсмографами и гравиметрами.

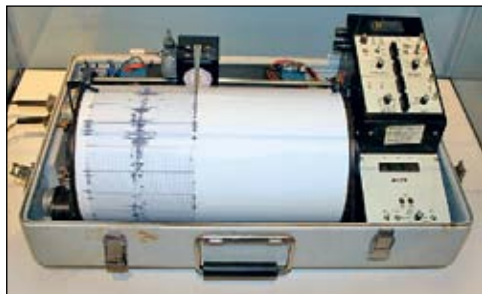
Для характеристики мод крутильных колебаний используют обозначения вида  ${}_n T_p$ , где индекс n соответствует числу нодальных (узловых, от лат. nodus — узел) поверхностей внутри планеты, а l — числу секторов, ограниченных этими поверхностями на поверхности планеты. На рисунке представлены простейшие собственные колебания. Основному

крутильному колебанию  ${}_0 T_2$  соответствует только одна нодальная поверхность, секущая поверхность планеты по экватору, относительно которой Северное и Южное полушария «закручиваются» в противоположных направлениях. Первый радиальный обертон основной моды обозначается  ${}_1 T_2$ : по-прежнему остаётся одна нодальная линия на поверхности, но, кроме того, появляется одна глубинная (радиальная) поверхность, по раз-

ные стороны которой смещения происходят в противоположных направлениях. Планета условно разделена на четыре области, в каждой из которых движение имеет различное по отношению к соседней области направление.

Колебания основной моды  ${}_0 S_2$  напоминают чередующиеся деформации упругого футбольного мяча: две узловые линии на поверхности, которые для этой моды совпадают с параллелями Северного и Южного полушарий.





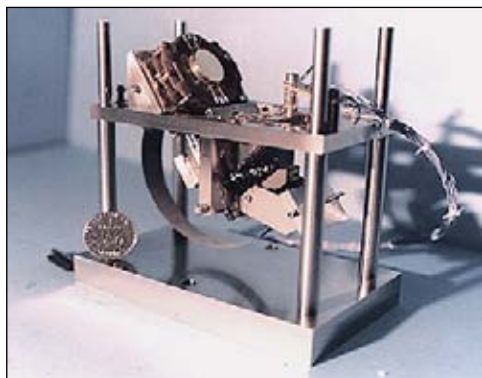
*В большинстве сейсмометров используется инерция свободно подвешенной центрально расположенной массы на упругой подвеске, например пружине или маятнике. Такая подвеска допускает перемещение маятника по отношению к основанию, закреплённому на грунте. Когда основание сотрясается сейсмическими волнами, инерция массы вынуждает её отставать от движения основания.*

Отсутствие регистрации сейсмоактивности «Викинг-2» можно объяснить чувствительностью сейсмометра к ветру. Климатические условия на Марсе суровые, температура поверхности колеблется от  $-125^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ , причём суточные перепады температур превышают  $50^{\circ}$ . Преобладает ветреная погода со скоростью ветра около  $10\text{ м/с}$ , могут иметь место шторма с порывами — до  $100\text{ м/с}$  (это больше скорости ветра в Антарктиде), также бывают пылевые бури. Сейсмометр «Викинг-2», расположенный на платформе посадочного устройства на упругих ножках, регистрировал вибрацию платформы из-за ветра и сейсмические шумы, вызываемые ветровыми течениями в атмосфере Марса.

Следующая миссия — «Марс-96» — имела две небольшие автономные станции и два пенетратора\*, но потерпела неудачу вскоре после старта.

Таким образом, строение Красной планеты плохо изучено по сравнению с Зем-

*Сейсмометр OPTIMISM, созданный для миссии «Марс-96». Размеры  $9\times 9\times 9\text{ см}$ , масса  $405\text{ г}$ , возможность измерения до  $10^{-8}\text{ м с}^{-2}$  при  $1\text{ Гц}$ . Разработан группой учёных парижского Института физики Земли.*



лэй и в меньшей степени с Луной. Тем не менее первый шаг сделан, и с помощью Викинга получена полезная информация для будущих сейсмических экспериментов. В последующих миссиях датчики сейсмометра предполагается установить непосредственно на поверхности планеты. Защитное устройство для сейсмометра должно уменьшить ветровые шумы и перепады температур. Одновременно могут быть использованы записи сейсмических шумов, вызываемых ветровыми течениями в атмосфере Марса, для определения подповерхностной структуры непосредственно под станцией по корреляции между двумя сигналами. Предполагается, что ветровые течения в атмосфере Марса (в частности, пылевые смерчи) могут воздействовать на поверхность планеты, возбуждая в ней поверхностные волны. Метод корреляции применяется в сейсмологии Земли для изучения структуры коры до глубин  $20\text{ км}$ .

Для внесения поправок в модели внутреннего строения Марса до глубин  $2000\text{ км}$  достаточно установить один широкополосный сейсмометр, который позволит зарегистрировать частоты собственных колебаний планеты при достаточно сильном марсотрясении. В мантии Марса возможны зоны частично расплавленного вещества — астеносфера. И сейсмические волны способны её обнаружить. В идеале для исследования недр Марса нужна сеть из небольшого числа сейсмических станций, разнесённых на сотни километров. Поскольку на Марсе нет ни океана, ни человеческой деятельности, ожидается, что сейсмический шум на нём ниже, чем на Земле.

#### АКТИВНАЯ ВЕНЕРА

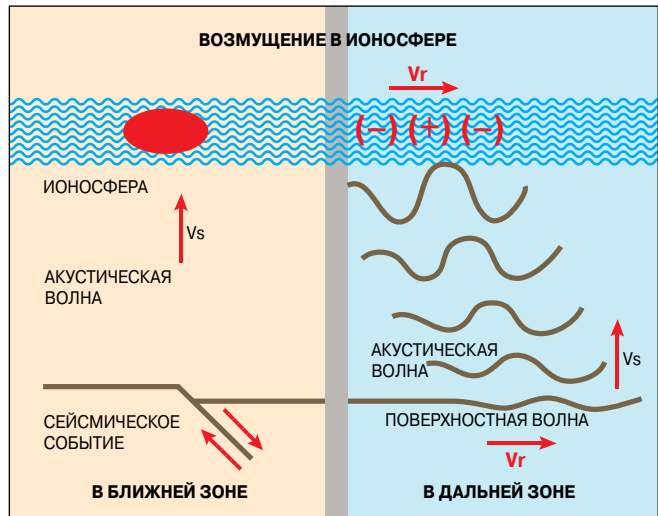
По теоретическим оценкам, сейсмичность Венеры стоит в ряду между Марсом и Землей. Молодой возраст поверхности Венеры и сложный гористый рельеф свидетельствуют о её тектонической активности. Горы на Венере имеют, скорее всего, вулканическое происхождение. Не исключено, что вулканическая деятельность на Венере происходит и в настоящее время. По оценкам НАСА, на Венере могут иметь место около  $100$  сейсмических событий в год с магнитудой выше  $5$ , события с магнитудой  $6$  происходят в пять раз реже.

Технические условия для сейсмических экспериментов на поверхности Венеры очень сложны. Из-за высокой температуры ( $\approx 500^{\circ}\text{C}$ ) и давления на поверхности ( $\approx 90\text{ бар}$ ) ни один из инструментов не проработает на ней более двух часов. Альтернативой для Венеры может стать регистрация сигналов, связанных с сейсмической активностью, в атмосфере.

Известно, что сильные сейсмические события на Земле и процессы в атмосфере взаимосвязаны. Наблюдения, которые велись

\* Пенетратор — ударный проникающий зонд, внедряющийся в грунт.

Мелкофокусные землетрясения порождают волны сжатия, которые распространяются в атмосфере, при этом их амплитуда возрастает на несколько порядков, когда они достигают ионосферных высот. В частности, волны Релея, возникающие после землетрясения, вызывают поверхностные смещения, которые производят акустические волны. Эти волны усиливаются по мере прохождения через атмосферу. На диаграмме показано взаимодействие между сейсмическими волнами, акустическими волнами и ионосферой непосредственно над очагом сейсмического события (в ближней зоне) и в отдалении от него (в дальней зоне).  $V_s$  — скорость звука в атмосфере,  $V_r$  — скорость поверхностных волн.



с начала 1960-х годов, показали, что после сильных землетрясений наблюдается возмущение ионосферы. Акустические волны в атмосфере, генерируемые сейсмическими поверхностными волнами, наблюдались как от удалённых очень сильных землетрясений (с магнитудой выше 7), так и вблизи небольших сейсмических событий. Такие явления и сейчас регистрируются при землетрясениях силой 7—7,5 при помощи GPS (используется для определения электронной плотности в ионосфере) или доплеровскими зондами, которые определяют вертикальную скорость движения ионосферных слоёв на высоте отражения зондирующего электромагнитного сигнала.

Хотя на Венере сейсмические события не столь сильны, как на Земле, это компенсируется более сильным взаимодействием поверхности Венеры с более мощной атмосферой, которое приводит к значительному усилению в ней сигнала. Хорошие результаты в дистанционной сейсмологии Венеры может принести доплеровский зонд с соответствующими рабочими характеристиками, что следует принять к рассмотрению при создании в будущем орбитальной станции на Венере (оптимальная высота орбиты такой станции 150 км). Для выявления полной сейсмической картины эксперимент должен включать орбитальную станцию с радаром и два-три маленьких субспутника для приёма сигнала.

## ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ

Внутренняя структура планет-гигантов (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун), так же как и планет земной группы, недостаточно изучена. Хотя внутри планет-гигантов могут существовать твёрдые области, они не доступны прямому наблюдению. Вместо них мы видим протяжение атмосферы, не имеющей резкой границы с внутренними слоями планеты.

В связи с интенсивной энергетикой планеты (поток тепла из недр примерно вдвое превы-

шает его количество, получаемое от Солнца) предполагается, что в Юпитере могут возбуждаться собственные колебания. Регистрация собственных колебаний позволила бы получить новую информацию о недрах планеты, подобно той, какую дала гелиосейсмология для понимания недр Солнца.

Предварительные теоретические модели внутреннего строения Юпитера получены на основе данных о его гравитационном поле. Опираясь на эти модели, рассчитали теоретический спектр колебаний планеты. Из сравнения этого спектра с данными наблюдений можно определить размер ядра Юпитера и скачки плотности в его недрах.

Поиск собственных колебаний Юпитера начался в конце 1980-х годов при помощи инфракрасных и спектроскопических наблюдений. Сейсмологические наблюдения были также проведены после падения А- и Н-фрагментов кометы Шумейкера—Леви 9 на Юпитер в 1995 году. Но сейсмический сигнал не был зарегистрирован из-за малой выделившейся сейсмической энергии при падении этих тел.

Недавно появились сообщения, что длинноволновые колебания (основные моды собственных колебаний) Юпитера обнаружены наземными наблюдениями и идентифицированы до 20 тонов.

Проекты «Марс-GEMS», «Mars-Net», «Венера-Д», «Луна-Глоб», разрабатываемые сейчас в международной кооперации НАСА, ЕКА, Роскосмосом и Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA), так или иначе включают сейсмические исследования Луны, Марса, Венеры. Поскольку все планеты Солнечной системы образовались в едином процессе из единого протопланетного облака, учёные с нетерпением ждут результатов новых сейсмических наблюдений на планетах, которые помогут нам лучше понять Землю.