

Упругие колебания ЗЕМНОГО ШАРА

Е. Ф. Саваренский
Доктор физико-математических наук

О. Е. Старовойт
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР (Москва)

Происхождение Земли, изучение ее строения, состава и происходящих в ней процессов всегда привлекали внимание ученых.

Для непосредственного экспериментального изучения доступна пока верхняя часть земной коры, составляющая около 0,001 радиуса Земли, об остальной части планеты приходится судить по косвенным признакам. Представление о строении Земли можно получить, изучая внутри нее характер изменения плотности, температуры, давления, упругих параметров и др. Наиболее достоверные сведения дает изучение распространения упругих волн при землетрясениях. Интенсивное развитие сейсмологии за последние 50 лет принесло много важных открытий, в числе которых необходимо отметить открытое недавно явление собственных колебаний земного шара.

Впервые в 1954 г. известный геофизик Беньоф при анализе записи деформационным сейсмографом (стрейн-сейсмограф) Камчатского землетрясения 4 ноября 1952 г. обнаружил колебания с периодом около 57 мин., которые наблюдались через 3,5 часа после начала землетрясения. Он высказал предположение, что это явление есть не что иное, как собственное колебание земного шара. Рассмотрим образование этих колебаний.

Собственные колебания любого тела можно представить как совокупность стоячих синусоидальных волн различного периода (основного тона и обертонов). Возьмем, например, идеально упругий стержень

и ударим по торцу. При этом возникнет сжатие. Вследствие упругости оно будет передаваться соседним участкам. По стержню побежит продольная волна (рис. 1). Дойдя до противоположного конца, эта бегущая волна отразится и пойдет в обратном направлении: у первого конца вновь произойдет отражение, и весь процесс повторится. Волны, бегущие в прямом и обратном направлении, накладываются одна на другую и создают так называемую стоячую волну. Точки, в которых колебания складываются, называются пучностями, а точки, где они взаимно уничтожаются, узлами (рис. 2). В нашем стержне узлы и пучности будут образовывать целые поперечные сечения, т. е. плоскости, а в телах произвольной формы — более сложные поверхности. Таким образом, в стержне устанавливается стоячая волна, а колебания, которые он при этом испытывает, называются **с о б с т в е н н ы м и**.

В рассматриваемом случае оба конца стержня не закреплены, поэтому в нем формируются стоячие волны, у которых на концах будут пучности. Как видно из рис. 3, а, на его длине L укладывается целое число полуволн. При одной полуволне в стержне устанавливается собственное колебание с периодом $T = \frac{2L}{c}$, где c — скорость распространения волны, зависящая от упругости

и плотности. Это наибольший период, и он определяет основной тон. Стоячие волны, сформировавшиеся из двух, трех и т. д. полуволн, образуют колебания с

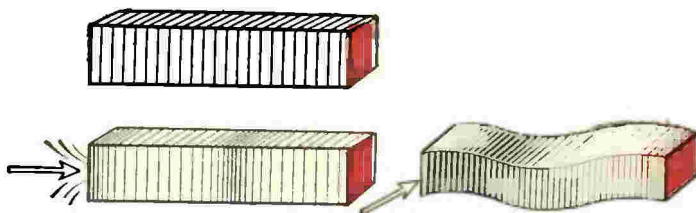


Рис. 1. Возникновение в стержне продольной волны (удар в торец) и поперечной (удар сбоку)

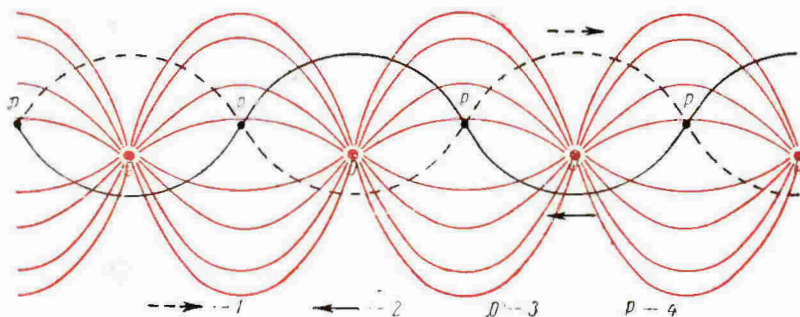


Рис. 2. Образование стоячей волны (красные линии) из двух бегущих (черные): 1 — прямая волна, 2 — отраженная, 3 — узлы, 4 — пучности стоячей волны

периодами, меньше в $2, 3, \dots, n$ раз (n — целое число), называемое обертонами (рис. 3, а).

Собственные колебания стержня, у которого закреплен один конец, определяются стоячими волнами, образующимися на свободном конце пучность, а на закрепленном — узел (рис. 3, б). Здесь период основного тона $T_1 = \frac{4L}{c}$, а обертонов $T_n = \frac{4L}{nc}$,

где $n = 3, 5, 7, \dots$. Стержень, у которого оба конца закреплены, имеет период собственных колебаний такой же, как и стержень со свободными концами, но на концах его вместо пучностей будут узлы. Собственное колебание стержня обычно представляет собой совокупность основного тона и обертонов, т. е. совокупность синусоидальных колебаний различного периода.

В твердых телах возможны также и поперечные волны, которые возникнут при ударе сбоку (см. рис. 1). Движение частиц при этом перпендикулярно направлению распространения волны. Механизм образования собственных колебаний остается прежним, изменяется только скорость распространения. Период поперечных колебаний больше, чем колебаний, образуемых продольными волнами, так как скорость по-

перечных волн меньше скорости продольных. В общем случае в стержне возбуждаются собственные колебания обоих типов. Если сделать спектрограмму собственного колебания стержня, т. е. разложить его на синусоидальные составляющие, то в спектре обнаружим линии, соответствующие основному тону и обертонам продольных и поперечных

колебаний. Получим так называемый линейный спектр. Аналогично возникают собственные колебания в твердых телах различных форм и размеров, в том числе и в земном шаре.

Собственные колебания Земли возбуждаются при очень сильных, катастрофических землетрясениях, как, например, в Чили в мае 1960 г. В момент землетрясения освобождалось огромное количество упругой

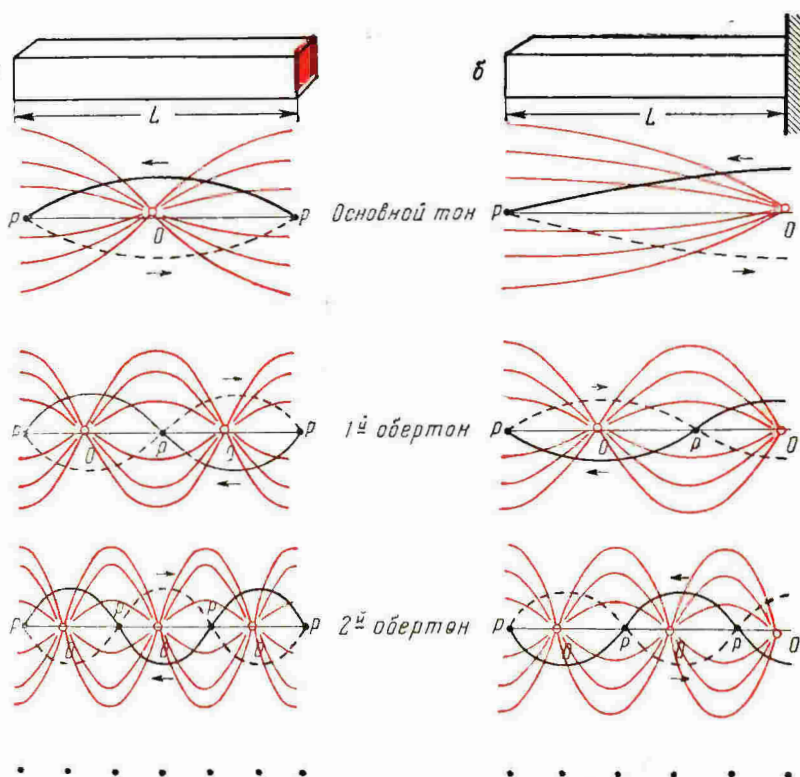


Рис. 3. Собственное колебание стержня: а — с незакрепленными концами; б — с одним закрепленным концом; красные линии — стоячие волны

энергии, накопленной в результате различных внутренних физико-химических процессов. Эта энергия распространяется по всему объему планеты в виде продольных и поперечных волн. На сферических границах, разделяющих слои с разными упругими свойствами, возникают преломления и отражения. Продольные и поперечные волны отражаются от верхней и нижней границ слоя, и при некоторых углах падения эти отражения происходят почти без потерь. Поскольку при этом колебания будут распространяться внутри слоя вдоль ограничивающих его поверхностей, они называются *поверхностными волнами*. При этом в их формировании заметная роль принадлежит поверхности Земли. Исследования последних лет показали, что поверхностные волны с большим периодом (сотни секунд) сравнительно слабо поглощаются и на их распространение неоднородности земной коры не влияют. Такие длинные волны служат ценным средством для изучения строения Земли и определения положения и характеристики очагов землетрясений.

Для иллюстрации образования поверхностной волны вновь обратимся к идеально упругому стержню с одним закрепленным концом. Представим себе, что бесчисленное множество таких стержней, соединенных между собой, и составляют слой. Если ударить по одному из стержней, то энергия будет распространяться не только по этому стержню, а и от стержня к стержню по слою вдоль его поверхностей. Если слой расположен на упругой, более жесткой среде, то колебания в ней могут сильно ослабевать с глубиной. Таким образом появляется поверхностная волна.

Наша Земля — упругое тело сферической формы, состоящее из целого ряда слоев с различными упругими свойствами. От землетрясений вдоль поверхности Земли и поверхности слоев распространяются поверхностные волны со значительными амплитудами, которые хорошо видны на сейсмограммах. Различают два типа таких волн — Рэлея и Лява. В волнах Рэлея движение частиц происходит по эллипсу, расположенному в вертикальной плоскости, проходящей через источник и пункт наблюдения (рис. 4, а). При движении волн Лява частицы колеблются в горизонтальной плоскости под прямым углом к направлению распространения этих волн (рис. 4, б). При землетрясениях излучаются колебания в очень

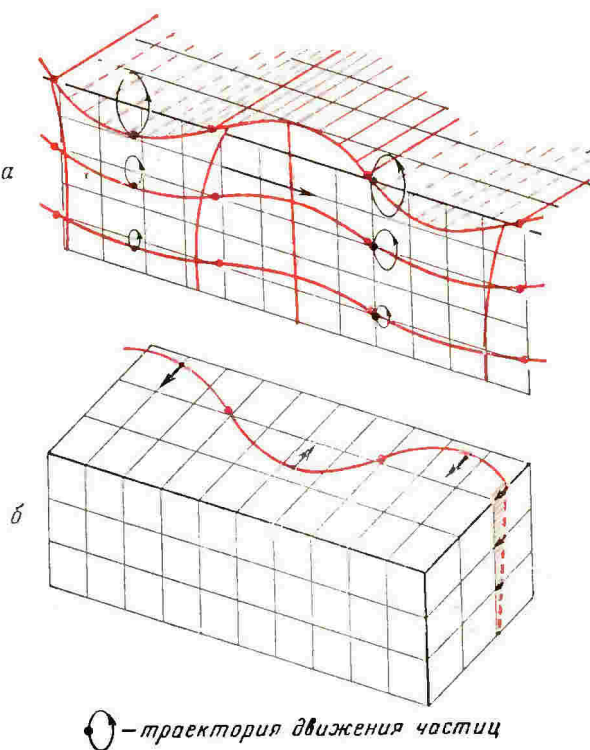


Рис. 4. Поверхностные волны Рэлея (а) и Лява (б)

широком диапазоне частот, и чем длиннее волна, тем более глубокие слои земного шара вовлекаются в колебательный процесс. При очень сильных землетрясениях наблюдаются очень сильные поверхностные волны, многократно оббежавшие земной шар. На сейсмической станции «Симферополь» во время Чилийского землетрясения 1960 г. были зарегистрированы волны, около семи раз оббежавшие земной шар и прошедшие расстояние почти 280 000 км. Распространяясь в разные стороны от очага землетрясения, такие волны накладываются одна на другую и, подобно волнам прямым и отраженным в стержне, образуют стоячие волны и соответственно собственные колебания Земли (рис. 5). Таким образом, собственное колебание Земли и есть не что иное, как совокупность стоячих поверхностных волн различного периода. Эти колебания можно разделить на два типа соответственно двум типам поверхностных сейсмических волн.

К первому относятся колебания, образовавшиеся в результате наложения поверхностных волн Лява (частицы совершают колебания только в плоскости касательной

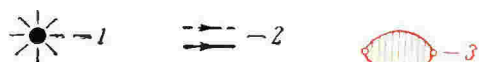
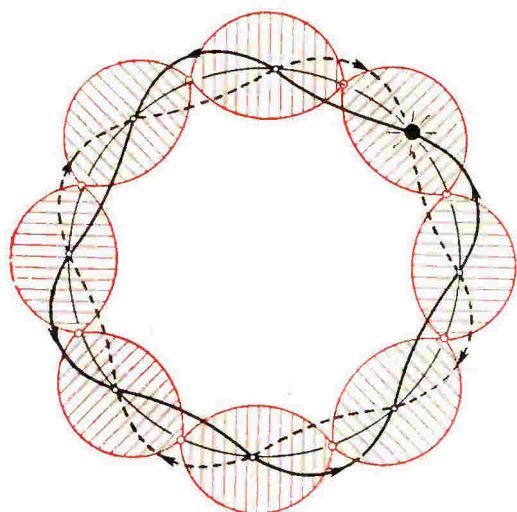


Рис. 5. Образование стоячей волны из двух поверхностных, распространяющихся из очага землетрясения в противоположных направлениях. 1 — очаг землетрясения, 2 — бегущие волны, 3 — стоячая волна

к поверхности Земли). Подобные колебания испытывает обод колеса, если он прикреплен к оси упругими спицами. Эти колебания называются **крутильными**, **сдвиговыми**, или **торсионными**.

Ко второму типу относятся колебания, образовавшиеся в результате наложения поверхностных волн Рэлея. Здесь частицы испытывают движение в вертикальной плоскости по двум направлениям: радиальном (вдоль радиуса Земли) и горизонтальном (эпицентр — точка наблюдения). Этот тип колебаний называется **сфероидальным**, потому что при колебаниях основного тона Земля попеременно принимает форму вытянутого и сплющенного сфероида. Подобную форму она приобретает под действием лунного и солнечного притяжения.

Период основного тона сфероидальных колебаний порядка 53 мин. Вдоль любого большого круга Земли, проходящего через очаг землетрясения, укладываются две волны. В результате появляются две узловые окружности (малые круги) с центром в эпицентре землетрясения. Это — след от пересечения с поверхностью Земли двух ко-

нусов узловых поверхностей с вершинами в центре Земли (рис. 6 а, б).

Первый обертон сфероидальных колебаний описывается такой стоячей волной, которая сформировалась из трех длин волн, укладывающихся на длине большого круга (рис. 6, в); второй обертон описывается стоячей волной, сформированной из четырех длин волн, и т. д. Это значит, что если основной тон имел две узловые линии на поверхности Земли, то первый обертон имеет три, второй — четыре, и т. д. (рис. 6, а, б, в). Чем выше обертон, тем больше узловых линий появляется на поверхности Земли. Собственные колебания Земли имеют и другой тип узловых поверхностей, образующих внутренние сферические поверхности. Такие обертоны называются **радиальными** (рис. 6, г). Первый радиальный обертон образует од-

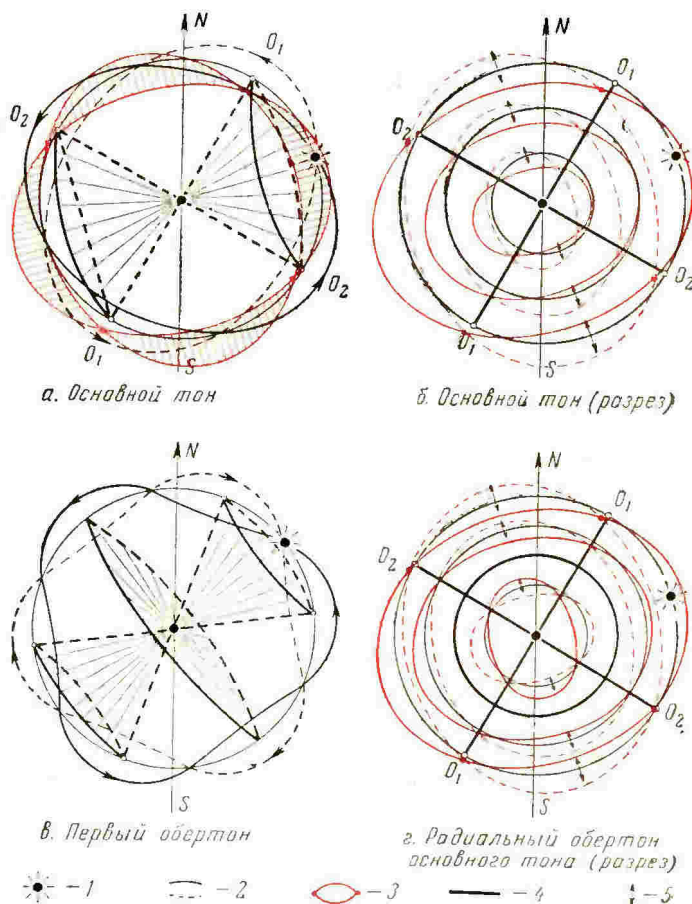


Рис. 6. Сфероидальные колебания Земли. 1 — очаг землетрясения, 2 — поверхностные волны Рэлея, 3 — стоячая волна, 4 — узловая линия, 5 — амплитуда сфероидальных колебаний

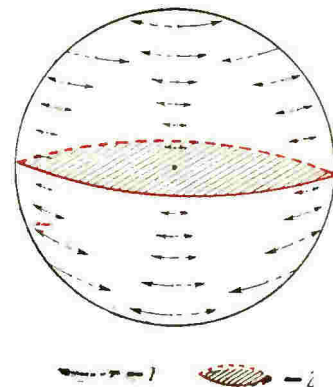
ну узловую сферическую поверхность, второй—две и т. д. Естественно, что все это действительно как для сфероидальных колебаний, так и для крутильных. Основной тон крутильных колебаний имеет период порядка 44 мин. и одну узловую линию. Такое колебание легко представить, если взять упругий шар, закрепить неподвижно узловую плоскость и вращать полушария в разные стороны (рис. 7).

Какие же сведения о внутреннем строении Земли дает нам изучение ее собственных колебаний?

При рассмотрении собственных колебаний стержня было показано, что их период зависит от скорости распространения волн в стержне, и, следовательно, от упругих свойств и плотности того материала, из которого он изготовлен. Аналогично этому, изучая периоды обоих типов собственных колебаний Земли, мы получаем сведения о плотности и упругих параметрах в ее оболочке и ядре.

Интересно отметить, что если бы Земля была однородным стальным шаром, то период основного тона сфероидальных колебаний был бы не 53, а 78 мин. Это различие в значительной мере вызвано существованием ядра. Если допустить, что ядро Земли такое же твердое, как и оболочка, то период основного тона крутильных колебаний должен был бы составить 32 мин., а наблюдаемый период порядка 44 мин. Заметим, что в колебаниях крутильного типа ядро Земли почти не принимает участия, так как его состояние близко к жидкому, а в жидкости сдвиговые или крутильные колебания отсутствуют. Поэтому период крутильных колебаний определяется распределением упругих пара-

Рис. 7. Крутильные колебания Земли основного тона. 1 — траектория колебания частиц, 2 — узловая плоскость



метров и плотности только в оболочке Земли.

Наблюдения над временами пробега продольных и поперечных волн через Землю позволяют определять структуру ее внутренних частей. Именно таким путем получены сведения о слоистости Земли, о законах распределения плотности и скорости распространения волн в глубинных частях. Однако эти наблюдения не позволяют выявлять, например, слои с малыми скоростями распространения волн. Создавая гипотезы о строении Земли и вычисляя периоды собственных колебаний, а затем сопоставляя их с наблюдениями, можно более полно изучать структуру земного шара. Уже сейчас наблюдения над периодами дают достаточно достоверные данные о распределении скоростей в оболочке и существовании на глубине 100—200 км слоя сравнительно малых скоростей распространения волн.

В настоящее время построены различные модели внутреннего строения Земли и при помощи электронных вычислительных машин определены периоды собственных колебаний земного шара, исходя из различных

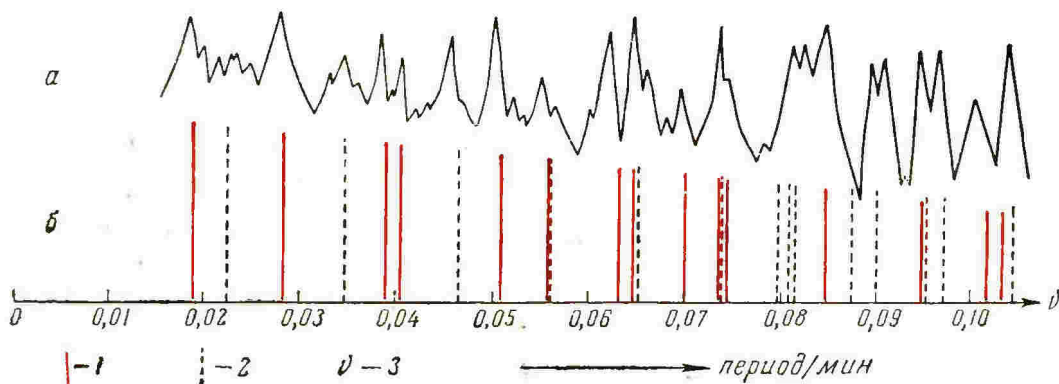


Рис. 8. Спектр собственных колебаний: наблюдаемый (а), теоретический (б). 1 — сфероидальные колебания, 2 — крутильные колебания, 3 — частота

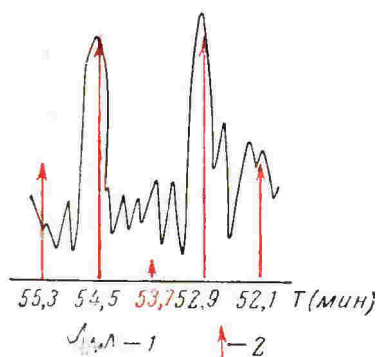


Рис. 9. Расщепление основного тона сфероидальных колебаний (53,7 мин.) на пять спектральных линий. 1 — данные наблюдений, 2 — результат теоретических расчетов

данных о распределении плотности и упругости. Перед сейсмологами стоит задача получить как можно больше точных наблюдений над периодами собственных колебаний Земли, что поможет выбрать наиболее достоверную модель.

Большой интерес представляет изучение спектра собственных колебаний Земли. На рис. 8, б мы привели частоты различных сфероидальных и крутильных колебаний, ограничившись периодами более 10 мин. Однако в действительности такой линейчатый спектр не наблюдается. Вместо дискретных линий существует сплошной спектр с максимумами на частотах, соответствующих основному тону и обертонам обоих типов колебаний (рис. 8, а). Это объясняется тем, что Земля неоднородна и не идеально упруга, что приводит к поглощению энергии колебаний. Чем сильнее поглощение, тем шире максимумы кривой сплошного спектра. Таким образом, изучение сплошного спектра собственных колебаний Земли позволяет получать дополнительные данные о механических свойствах вещества, слагающего нашу планету.

Исследование спектра собственных колебаний Земли показало, что на величину периодов влияет суточное вращение, которое приводит к расщеплению спектральных полос. При тонком спектральном анализе обнаружено, что максимумы сплошного спектра разделяются на несколько новых максимумов (рис. 9). Это напоминает известный эффект Зеемана — изменение частоты колебания заряженной частицы и расщепление соответствующей спектральной линии под влиянием внешнего магнитного поля. Возникновение колебаний Земли происходит под действием сил упругости среды и сил инерции. В этом случае силы инерции в свою очередь состоят из инерционных сил движения при колебании и дополнительных ко-

риолисовых, возникающих при вращении Земли. В Северном полушарии кориолисова сила направлена вправо по ходу движения частицы, в Южном — влево. Читателям, видимо, известен закон о подмывании правого берега рек, текущих в Северном полушарии, и левого — в Южном; о более сильном износе правого рельса на железнодорожных линиях Северного полушария и левого — в Южном; об отклонении морских и океанических течений и т. д., — все это проявление сил Кориолиса. Аналогичное явление происходит при собственном колебании Земли. В Северном полушарии траектория движения частицы при колебании будет все время отклоняться вправо. Следовательно, путь, по которому двигалась частица в одном направлении, не совпадает с движением в обратном направлении. Это приводит к тому, что на частоту колебания частицы накладывается другой периодический процесс — вращение Земли. Такое сложное колебание можно разложить на простые гармонические колебания. Одно из них будет иметь частоту большую, чем частота колебания частицы в отсутствие вращения Земли, а второе — меньшую.

Соотношения между интенсивностями колебаний зависят от величины и направления сил, действующих в очаге землетрясения. Принимаются различные модели источника, проводятся расчеты интенсивности спектральных линий, результаты сопоставляются с наблюдениями. При помощи такого анализа получены интересные данные о механизме очага Чилийского землетрясения 1960 г. Отсюда вытекает, что детальное изучение спектра собственных колебаний Земли позволяет охарактеризовать и тип их источника.

Следует подчеркнуть исключительно важное значение регистрации собственных колебаний Земли для многих разделов геофизики. В настоящее время удалось записать собственные колебания не только сейсмической аппаратурой (сейсмографы маятниковые и деформационные). В Японии, например, амплитуда сфероидальных колебаний во время Чилийского землетрясения достигала нескольких миллиметров и была зафиксирована при помощи гравиметров, предназначенных для изучения лунно-солнечных приливов. В Европе зарегистрированы также обертоны собственных колебаний Земли наклономерами — приборами, измеряющими малые наклоны земной поверхности при деформациях.