

УДК 550.34; 550.344.33

ОСОБЕННОСТИ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМЛИ ПРИ ГЛУБОКОФОКУСНОМ ОХОТСКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ 24.05.2013 г.

И. П. Кузин*, член-корреспондент РАН Л. И. Лобковский, К. А. Дозорова

Поступило 19.03.2019 г.

Приведено описание процесса начального возбуждения сфероидальной моды ${}_0S_2$ при Охотском землетрясении 2013 г. ($M_w = 8,3$) на основе обнаруженного авторами неизвестного ранее факта возникновения стоячей P -волны в эпицентре Охотского землетрясения и возбуждения ею бегущих по поверхности Земли P -волн. Предложен новый вариант трактовки природы собственных сфероидальных колебаний Земли при сильных землетрясениях ($M \geq 7,5$). Сфероидальная мода ${}_0S_2$ рассматривается как сочетание стоячих и бегущих P -волн, переносящих энергию деформации Земли.

Ключевые слова: Охотское глубокофокусное землетрясение, собственные колебания Земли, сфероидальная мода, стоячая P -волна, бегущая P -волна.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524886651-654>

В настоящем сообщении приведено описание процесса начального возбуждения сфероидальной моды ${}_0S_2$ при Охотском землетрясении 2013 г. ($M_w = 8,3$). В предшествующих публикациях [5, 6] основное внимание было уделено выявлению природы сверхдальнего распространения ощутимых сотрясений. В процессе этих исследований был выявлен неизвестный ранее природный феномен в виде стоячей P -волны, образовавшейся в результате суперпозиции падающей (очаг – поверхность Земли) и отражённой от поверхности сферических P -волн в эпицентре Охотского землетрясения ($h = 630$ км) через 1,23 мин с момента его возникновения. Физический смысл этого события состоит в том, что оно определяет новую фундаментальную основу процесса возбуждения собственных сфероидальных колебаний Земли при сильных землетрясениях с $M > 7,5$. Его развитие при малых глубинах ($h < 50$ км) осложняется возникновением интенсивных остаточных деформаций, как, например, при Суматра-Андаманском землетрясении 2004 г. ($M_w = 9,2$) [9].

Предлагаемая трактовка сочетания стоячей P -волны и генерируемых ею бегущих поверхностных P -волн, переносящих энергию [3], меняет существующее представление о природе собственных сфероидальных колебаний планеты [4, 8]. При этом эпицентр является особой начальной точкой (полюсом) деформации на поверхности Земли. Исходя из таких особенностей бегущих волн, как постоянство фазы и конечной скорости её распространения, постоянной для данной среды [3], можно предпо-

лагать, что бегущие P -волны беспрепятственно движутся до апоцентра или второго полюса, аналогичного эпицентру на антиподной поверхности Земли.

Отличие механизма образования стоячей P -волны в эпицентре землетрясения состоит в том, что время её возникновения определяется временем пробега падающей P -волны на пути очаг–эпицентр, т.е. глубиной очага. Поэтому время образования начальных бегущих P -волн также зависит от глубины очага. В апоцентре вступают в интерференцию бегущие навстречу по “меридиональным” полушариям поверхностные P -волны, образующие вторичную стоячую P -волну, уже не зависящую от глубины. В свою очередь, они возвращаются в эпицентр, чтобы возбудить новую пару бегущих P -волн. Эта схема будет повторяться вплоть до затухания последующих стоячих и бегущих P -волн. Следует отметить, что приведённое описание для простоты привязано к одному из больших круговых сечений планеты, тогда как в реальности оно соответствует всем азимутам.

Для определения времён пробега бегущих P -волн при Охотском землетрясении по траекториям между эпицентром и апоцентром в качестве промежуточного варианта можно воспользоваться данными годографа Джеффриса–Буллена [2] при глубине 630 км для северного полушария Земли ($\Delta = 0^\circ \pm 90^\circ$). Согласно этому годографу, время пробега по каждой из полуокружностей ($0^\circ - 90^\circ$) составляет 11 мин 54,6 с (11,91 мин) при скорости 14,0 км/с, а для всего полушария в целом 23,82 мин, что соответствует начальной стадии сфероидальной деформации Земли.

Возвращаясь к вопросу о распространении бегущих P -волн по поверхности Земли, отметим, что колебание северного полушария является незавер-

Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва

*E-mail: ivkuzin2013@yandex.ru

шённым с точки зрения колебаний Земли в целом, поскольку его границы ($\pm 90^\circ$ от эпицентра) располагаются на половине пути между эпицентром и апоцентром, в которых меняются направления движения бегущих P -волн. Чтобы перейти к колебаниям Земли в целом, необходима экстраполяция колебаний северного полушария на восточное и западное полушария. Принимая во внимание сферическую симметрию (геоид по форме — практически шар), можно считать, что колебания “меридиональных” полушарий практически тождественны колебаниям северного полушария. К тому же восточная половина этого полушария является одновременно северной половиной восточного полушария, а западная — западного. Отсюда следует, что начальный период деформации Земли в целом между эпицентром и апоцентром при Охотском землетрясении составляет 47,64 мин. Это первый период сфероидального колебания Земли, который не фиксируется в спектральных оценках.

Как отмечалось выше, в апоцентре бегущие по встречным направлениям P -волны вступают в интерференцию и образуют вторую стоячую P -волну с последующим возбуждением бегущих по поверхности к эпицентру по западному и восточному полушарию P -волн. Времена их пробега не зависят от глубины очага и описываются теоретическим годографом P -волн Джеффриса—Буллена с $h=0$ км. При этом время пробега по каждому из полушарий составляет 26,09 мин при скорости 12,79 км/с, а для Земли в целом 52,18 мин. Это значение близко к минимальному периоду сфероидальной моды ${}_0S_2$ в спектре записей Охотского землетрясения на станциях “Обнинск” и “Курчатов” (рис. 1) [7]. Согласно рис. 1, минимальный период моды для первой станции равен 52,26 мин, т.е. практически совпадает с сейсмологической оценкой, а для второй — 50,36 мин, что на 1,83 мин меньше. Следовательно, начало образования сфероидальной моды при Охотском землетрясении на основе бегущих P -волн, фиксируемых в спектре, определяется временем 99,82 мин (1,66 ч) с момента его возникновения. В дальнейшем бегущие P -волны могут циркулировать между эпицентром и апоцентром, поскольку исходные (начальные) амплитуды бегущих P -волн есть амплитуды стоячих P -волн в этих точках. В промежутках между эпицентром и апоцентром распространение бегущих P -волн трассируется P -волнами по внутренним траекториям, которые накладываются на бегущую волну как несущую [5]. Таким образом, основная сфероидальная мода колебаний Земли ${}_0S_2$ при сильных землетрясениях ($M \geq 7,5$) есть совокупность стоячих и

бегущих P -волн, переносящих энергию деформации Земли.

К основной моде сфероидальных колебаний следует добавить поверхностные волны Релея в широком диапазоне частот, наложенные на бегущие P -волны. Они образуют многочисленные гармоники в спектре. При этом максимум деформации реальной фигуры Земли (расширение) наблюдается вдоль полярных радиусов попеременно, сначала в эпицентре (северное полушарие) в течение 26,09 мин, а затем в течение такого же времени в апоцентре (южное полушарие). Расширения вдоль экваториальных радиусов не происходит вследствие отсутствия источников. Поэтому при деформировании фигура Земли стремится скорее к геоиду, чем к “футбольному мячу” по [10]. Для Земли в целом пучности P -волны в эпицентре и апоцентре будут отмечаться сначала через 52,18 мин, а на стадии установившихся колебаний, примерно через 54 мин (подробнее см. ниже). Как видно из рис. 1, спектр колебаний сфероидальной моды подвержен расщеплению. Мультиплет для станции “Обнинск” состоит из трёх синглетов: центрального (основного) с периодом 53,89 мин и двух боковых с периодами 52,26 мин и 55,66 мин. Для станции “Курчатов” мультиплет наряду с центральным ($T=53,89$ мин) включает по два боковых синглета с периодами 50,35 мин и 52,03 мин слева и 56,1 мин и 57,2 мин справа [7].

Теоретически расщепление сфероидальной моды объясняется влиянием вращения Земли [11]. Однако практически, как отмечено выше, степень расщепления оказалась различной для станций Обнинск и Курчатов, расположенных на близких расстояниях и в близких азимутах. По этому единичному факту можно предполагать влияние неоднородностей среды на траекториях распространения сейсмических волн и условий установки приборов. Траектория к станции “Обнинск” при Охотском землетрясении пролегает в относительно более однородной среде (южная часть Сибирской платформы и центральная часть Русской). Кроме того, приборы этой станции установлены в шахте на глубине 30 м. В то же время траектория к станции “Курчатов” пересекает Байкальскую зону и Алтае—Саянскую горную область, а приборы установлены на поверхности Земли. В результате степень расщепления колебаний на записи станции “Обнинск” вдвое меньше (два боковых синглета), чем на записи станции “Курчатов” (четыре боковых синглета). Принимая во внимание меньшие амплитуды колебаний боковых синглетов по отношению к основному (0,3–0,4 для “Обнинск” и 0,3–0,4 для “Курчатов”), они затухают быстрее, и

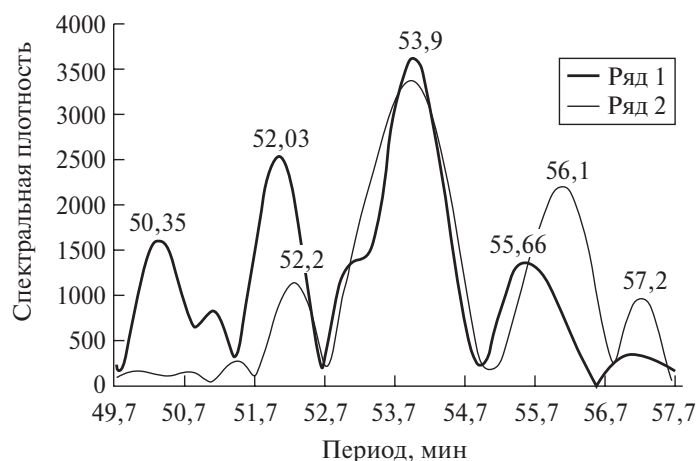


Рис. 1. Спектры записей Охотского землетрясения 24.05.2013 г. Ряд 1 – спектр моды ${}_0S_2$ на станции Обнинск, ряд 2 – на станции Курчатова по [7].

при установившихся колебаниях в спектре, как правило, фигурирует основной синглет с периодом около 54 мин (в нашем случае 53,89 мин).

Слабое затухание бегущих P -волн, отмеченное ранее по макросейсмическим данным качественно [5], можно оценить количественно. Согласно работе [1], затухание колебаний в сфере описывается уравнением $A_i = A_0 e^{-\beta t}$, где $\beta = \pi/(QT)$. При периоде $T = 53,89$ мин и добротности $Q = 620$ (из той же работы) величина коэффициента затухания β для сфероидальной моды составляет $1,57 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, что достаточно близко (в пределах 3%) к значению для радиальной моды ($1,62 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$) [7]. Эта оценка в ретроспективном плане позволила бы сразу определить природу сверхдальнего распространения ощутимых сотрясений при Охотском землетрясении. Однако на предшествующем этапе [5, 6] вследствие ограниченности исходных данных в пространстве ($160,6^\circ$) и времени (19,78 мин) мы не имели возможности для определения параметров бегущей поверхностной P -волны и были вынуждены принять паллиативную версию о близости её периода к периоду радиальной моды ${}_0S_0$.

Резюмируя содержание сообщения, можно сделать следующие выводы.

1. Основываясь на обнаружении неизвестного ранее факта возникновения стоячей P -волны в эпицентре Охотского землетрясения и возбуждения ею бегущих по поверхности Земли P -волн, мы представляем новый вариант трактовки природы собственных сфероидальных колебаний Земли при сильных землетрясениях. Однако для сопоставления полученных экспериментальных результатов с существующими теоретическими разработками требуется математическая обработка с учётом реальных

начальных условий, таких как положение источника на поверхности Земли (эпицентр), а также распространения возмущений вглубь планеты с соответствующим возрастанием параметров V_p , V_s , ρ , λ , μ .

2. Выявление природы сфероидальных колебаний позволяет также устранить существующее заблуждение в трактовке радиальной моды ${}_0S_0$ как вырожденной формы сфероидальной моды ${}_0S_2$. С учётом этого факта следует считать, что в природе существует три независимых типа собственных колебаний при землетрясениях – сфероидальные (${}_0S_2$), крутильные ${}_0T_2$ и радиальные ${}_0S_0$.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № 0149–2019–0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болт Б. В глубинах Земли. М.: Мир. 1984. 191 с.
2. Буллен К. Введение в теоретическую сейсмологию. М.: Мир. 1966. 460 с.
3. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. М.: Физматлит. 2007. 656 с.
4. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 1983. 416с.
5. Кузин И.П. Лобковский Л.И., Дозорова К.А. // ДАН. 2016. Т. 469. № 4. С. 483–487.
6. Кузин И.П. Лобковский Л.И., Дозорова К.А. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 61–72.
7. Молоденский С.М., Молоденский М.С., Молоденская М.С. // Физика Земли. 2014. № 5. С. 14–21.
8. Alterman Z., Jarosh H., Pekeris C.L. // Proc. Royal Soc. 1959. A 252. P. 80–95.
9. Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., et al. // Science. 2005. V. 308. P. 1127–1133.
10. Masters N.G., Widmer R. // Global Earth Physics, A Handbook of Physical Constants / Ed.: T. J. Ahrens.

Washington D.C.: American Geophysical Union, 1995. 11. *Pekeris C.L., Alterman Z., Jarosch H.* // Physical Review. C. 104–125. 1961. V. 122. № 6. P. 1692–1700.

SPECIFIC FEATURES OF EARTH'S FREE OSCILLATIONS AFTER DEEP-FOCUS SEA OF OKHOTSK EARTHQUAKE OF MAY 24, 2013

I. P. Kuzin, Corresponding Member of the RAS L. I. Lobkovsky, K. A. Dozorova

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received March 19, 2019

A description of initial excitation of spheroidal mode ${}_0S_2$ initiated by the 2013 Sea of Okhotsk earthquake ($M_w=8,3$) is presented. It is based on newly revealed fact of standing P -wave origination in the epicenter of the Sea of Okhotsk earthquake and excitation of traveling surface P -waves on the Earth's surface by this wave. A new interpretation of the nature of free spheroidal Earth's oscillations in case of strong earthquake ($M \geq 7,5$) is proposed. The spheroidal mode ${}_0S_2$ is interpreted as combination of standing and traveling P -waves, transferring the Earth's strain energy.

Keywords: deep-focus Sea of Okhotsk earthquake, free oscillations of the Earth, spheroidal mode, standing P -wave, traveling P -wave.