

О.А. ЛЕВОШКО, Г.И. ДОЛГИХ

Исследование динамики собственных колебаний Земли с периодом 20,5 мин лазерно-интерференционным методом

Произведен анализ записей лазерных деформографов, зарегистрировавших восемь цунамигенных землетрясений в различных районах Тихого океана, на предмет изучения динамики собственных колебаний Земли с периодом 20,46 мин. Установлено, что только на записи одного землетрясения с магнитудой 9,3 наблюдается иной ход максимумов для данного колебания.

Ключевые слова: лазерный деформограф, землетрясение, цунами, спектр, собственные колебания Земли.

Research of free oscillations of the Earth dynamics with a period of 20.5 minutes by laser interference method.
O.A. LEVOSHKO, G.I. DOLGIKH (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

We analyzed the records of laser strainmeters, containing information about eight tsunamigenic earthquakes which occurred in various areas of the Pacific Ocean to study the dynamics of the free oscillations of the Earth with a period of 20.46 minutes. It is established that only on the record of one earthquake with a magnitude of 9.3 there is a different course of maxima for this oscillation.

Key words: laser strainmeter; earthquake, tsunami, spectrum, free oscillations of the Earth.

Введение

Изучению собственных колебаний Земли, их появления после крупных землетрясений и изменчивости по истечении некоторого времени после него посвящено много исследований (например, работы [2–4]).

Мы рассмотрим регистрацию собственного колебания Земли ${}_0S_0$ (период около 20,46 мин) лазерными деформографами и вариации этого колебания после катастрофических и не катастрофических землетрясений.

Для анализа динамики собственных колебаний с периодом 20,46 мин были рассмотрены суточные и многосуточные записи, начальным моментом которых являются некоторые землетрясения 2015–2018 гг. магнитудой более 5 баллов и катастрофические землетрясения 2004 и 2010 гг. (табл. 1, рис. 1).

Оба типа геособытий повлекли за собой явление цунами. Данные предоставлены каталогом NOAA (<https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7>), из

ЛЕВОШКО Ольга Александровна – инженер, *ДОЛГИХ Григорий Иванович – доктор физико-математических наук, академик РАН, заведующий отделом (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке темы АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

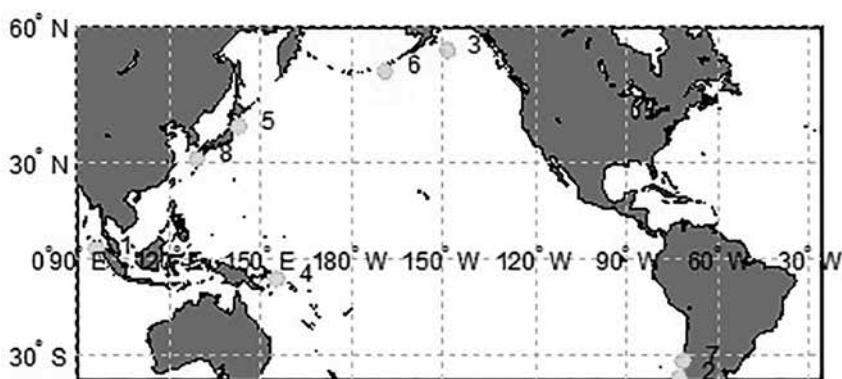


Рис.1. Расположение очагов геособытий

массива данных отбирались только те землетрясения, которые нашли свое отображение на записях лазерного деформографа.

Таблица 1

Перечень рассматриваемых землетрясений

№ п/п	Дата и время по UTC	Регион	Магнитуда
1	26 декабря 2004, 00:58	Суматра	9,3
2	27 февраля 2010, 06:34	Чили	8,8
3	23 января 2018, 9:31	США	7,9
4	22 января 2017, 4:31	Папуа–Новая Гвинея	7,9
5	16 февраля 2015, 23:06	Япония	6,7
6	27 июля 2015, 04:49	США	6,9
7	16 сентября 2015, 22:55	Чили	8,3
8	13 ноября 2015, 20:51	Япония	6,7

Методика

Исследование гармоник ${}_0S_0$ проводили с использованием 52,5- и 17,5-метровых деформографов, ориентированных по линиям «север–юг» и «запад–восток», оба прибора установлены на мысе Шульца (Приморский край) [1].

Все записи деформографов были очищены от скачков, продецимированы до 0,1 Гц и пропущены через полосовой фильтр с границами от 310 мкГц до 0,016 Гц, что соответствует 1–55 мин. Также была проведена полосовая фильтрация, включающая более точный граничный временной промежуток 18–23 мин. Для обеих фильтраций использовалось окно Хэмминга.

Динамика собственных колебаний после проведения фильтраций сигналов изображалась на спектрограмме. Шаг деления по периоду колебаний на оси Y равен 5 мин. Мы работали с периодом 17–22 мин, включающим искомое колебание с периодом 20,46 мин. Для вычленения именно этого периода был проведен спектральный анализ сигнала.

Наличие пиков подтверждалось по значениям гистограммы вероятностного пика (A_1) и максимального значения соседней с ней гистограммы (A_2), пик считался обозначенным при получении результата ≥ 3 :

$$10 \log_{10} \frac{A_1}{A_2}.$$

Результаты

Колебания с периодом 20:28 мин испытывают вариацию в больших пределах, проявляясь пиками на периодах от 20:13 до 21:45 мин.

Данные по найденным периодам представлены в табл. 2. Порядковый номер события соответствует номеру события из табл. 1. Меньшим кеглем выделены слабые пики, не превышающие значения 4.

Не во всех суточных записях обнаружены колебания. Сюда входит случай широкополосной фильтрации не катастрофического землетрясения 27.07.15 (регион США, событие под № 6), его пик приходится на 27:35 мин.

Сутки после катастрофического чилийского землетрясения (№ 2), в течение которых также не проявилось наличие колебания ${}_0S_0$, были представлены в разорванном виде: в силу технических причин в суточную запись не вошли два часа. На энергетическом спектре для чилийского катастрофического землетрясения хорошо выделяется период 19:30, свойственный ${}_0S_4$. Не катастрофическое чилийское землетрясение (№ 7), напротив, имеет хорошо выраженное колебание ${}_0S_0$.

Таблица 2

Периоды, характерные для пиков колебания 20,46 мин

№ п/п	Односуточная запись				Пятисуточная запись			
	Полоса 1–55 мин		Полоса 18–23 мин		Полоса 1–55 мин		Полоса 18–23 мин	
	Амплитудный спектр	Энергетический спектр	Амплитудный спектр	Энергетический спектр	Амплитудный спектр	Энергетический спектр	Амплитудный спектр	Энергетический спектр
1	–	20:41	–	20:41 20:13	21:58 20:20 20:13 20:09	21:58 21:45 20:43 20:20 20:13 20:09	21:58 20:09	21:58 21:45 21:10 20:27 20:20 20:13 20:09
2	–	–	–	–	21:19 21:10 20:55 20:00	21:19 21:10 20:55 20:13 20:00	21:19 21:10 20:55	21:19 21:10 20:55 20:13 20:00
3	–	21:19	–	21:19	21:45 21:40	21:45 21:40 21:35 21:30 21:19 20:50 20:22 20:04	21:45 21:40 21:35	21:45 21:40 21:35 21:30 21:10 21:19 20:50 20:22 20:04
4	–	20:41	–	21:40 20:41	20:31	21:40 21:30 21:19 21:00 20:31 21:45 21:15 20:45 20:31 20:13	21:00 20:31	21:45 21:30 21:15 21:00 20:31 20:13
5	–	21:30 20:13	–	20:13	21:40 21:30	21:40 21:30 20:41 20:00	21:40 21:30 20:00	21:50 21:40 21:30 20:13 20:00

№ п/п	Односуточная запись				Пятисуточная запись			
	Полоса 1–55 мин		Полоса 18–23 мин		Полоса 1–55 мин		Полоса 18–23 мин	
	Амплитудный спектр	Энергетический спектр	Амплитудный спектр	Энергетический спектр	Амплитудный спектр	Энергетический спектр	Амплитудный спектр	Энергетический спектр
6	–	–	–	21:10	21:12	21:58 21:40 21:12 20:45 20:35 20:31 20:11 20:06	21:40 21:12	21:40 21:17 21:12 21:10 20:31 20:11 20:06
7	20:13	20:41 20:13	20:13	20:41 20:13	20:27	21:50 20:27 21:19 20:13	20:27	21:50 20:27 20:13
8	21:19 21:00	21:19 21:00 20:22 20:04	21:19 21:00	21:19 21:00 20:22 20:04	–	21:10 21:00 20:50 20:18	–	21:19 20:18

Землетрясения № 5 и № 8 произошли в одном регионе у побережья Японии, достаточно близко к экспериментальной станции «м. Шульца» (рис. 2). В обоих случаях колебание 20,46 мин зарегистрировано на двух каналах изображения, однако более интенсивные пики соответствуют землетрясению, произошедшему южнее деформографов.

Северо-восточные случаи (№ 3 и № 6) Тихоокеанского региона показывают единичные пики даже при узкой полосе фильтрации (рис. 3).

В спектрограмме (рис. 4) для суточной записи катастрофического землетрясения под № 1 при высоком коэффициенте усиления спектрограммы (0,8) пакет колебаний 17–22 мин

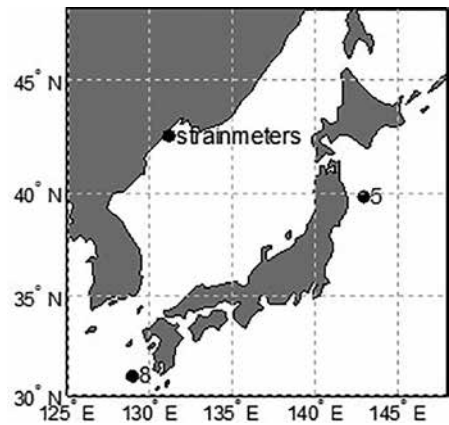


Рис. 2. Расположение очагов землетрясений № 5 и № 8 относительно деформографов

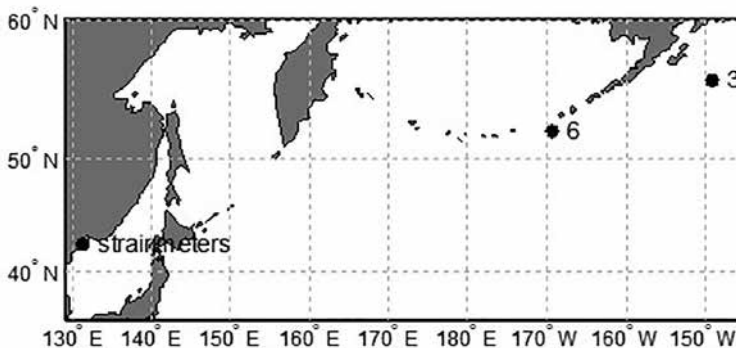


Рис. 3. Расположение очагов землетрясений № 3 и № 6 относительно деформографов

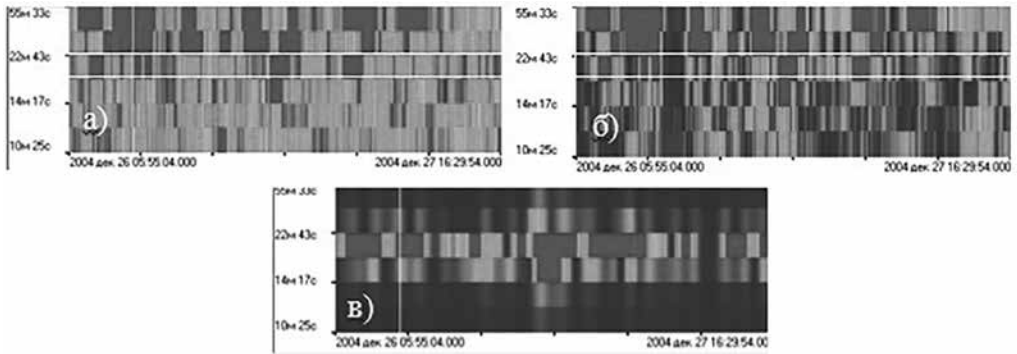


Рис. 4. Спектрограмма суточной записи события под № 1: *a* – спектрограмма амплитудного спектра широкой фильтрации, *б* – спектрограмма энергетического спектра широкой фильтрации, *в* – спектрограмма энергетического спектра узкой фильтрации

(выделен белой рамкой) демонстрировал максимумы в момент геособытия в перерасчете на местное время (белая линия) и через 11 ч после геособытия вторичный максимум является самым продолжительным, ему сопутствует полуторачасовой интервал с многочисленными максимумами.

При переходе на спектрограмму энергетического спектра узкой фильтрации становится виден другой вторичный максимум, зарегистрированный уже через 5 ч после события. Максимум, наступивший через 11 ч, теперь разделен на два промежутка – 3 ч 40 мин и 4 ч 50 мин.

Поскольку колебание гармоники ${}_0S_0$ лучше проявляет себя на узкой полосе фильтрации, для иллюстрации ее динамики (рис. 5) приводим изображения, полученные после полосового фильтра с границами 18–23 мин. Если землетрясение отобразилось на двух каналах, то их спектрограммы внесены в одну строку.

Максимумы на группе волн с периодами 17–22 мин обнаруживаются в каждой записи, но чилийское катастрофическое землетрясение не демонстрирует пиков для периода, свойственного колебанию 20,46 мин, поэтому мы пропустим случай под № 2, т.е. далее будут представлены только не катастрофические случаи.

Три из шести случаев показывают достаточно равномерное распределение максимумов на протяжении всей суточной записи. После землетрясения 22.01.17 (№ 4) максимумы на обоих каналах чередуются с 11-часовым периодом релаксации. Такой же период релаксации имеется на одном из каналов землетрясений 16.09.15 (№ 7) и 13.11.15 (№ 8). Все указанные события, соответствующие регионам Папуа–Новой Гвинеи, Чили и Японии, имели очаги, расположенные южнее деформографов. Землетрясение под № 1, тоже произошедшее южнее (Суматра), имеет равномерное распределение максимумов на спектрограмме, но, в отличие от предыдущих трех случаев, данное землетрясение было катастрофическим. Спектрограмма для него также показывает наличие самого большого числа максимумов для суточной записи: 10 против 7 для не катастрофических событий.

Вторичные всплески максимумов для всех событий появляются примерно через 2–5 ч после времени геособытия. Третья группа максимумов регистрируется через 6–15 ч.

На спектрограмме пяти последовательно соединенных суток (рис. 6) после землетрясения 26.12.04 (№ 1) видно, что пульсации максимумов имеют средний период около 4 ч на протяжении первых 2,7 сут от момента землетрясения. Далее появляются более длительные периоды релаксации, достигающие 14 ч. Первая половина записи за трое суток, кроме большей частоты регистрации максимумов, показывает и их большую продолжительность.

Поскольку динамика всплесков в первом случае с катастрофическим землетрясением в регионе Суматра имеет большое различие в первой и второй половине многосуточной

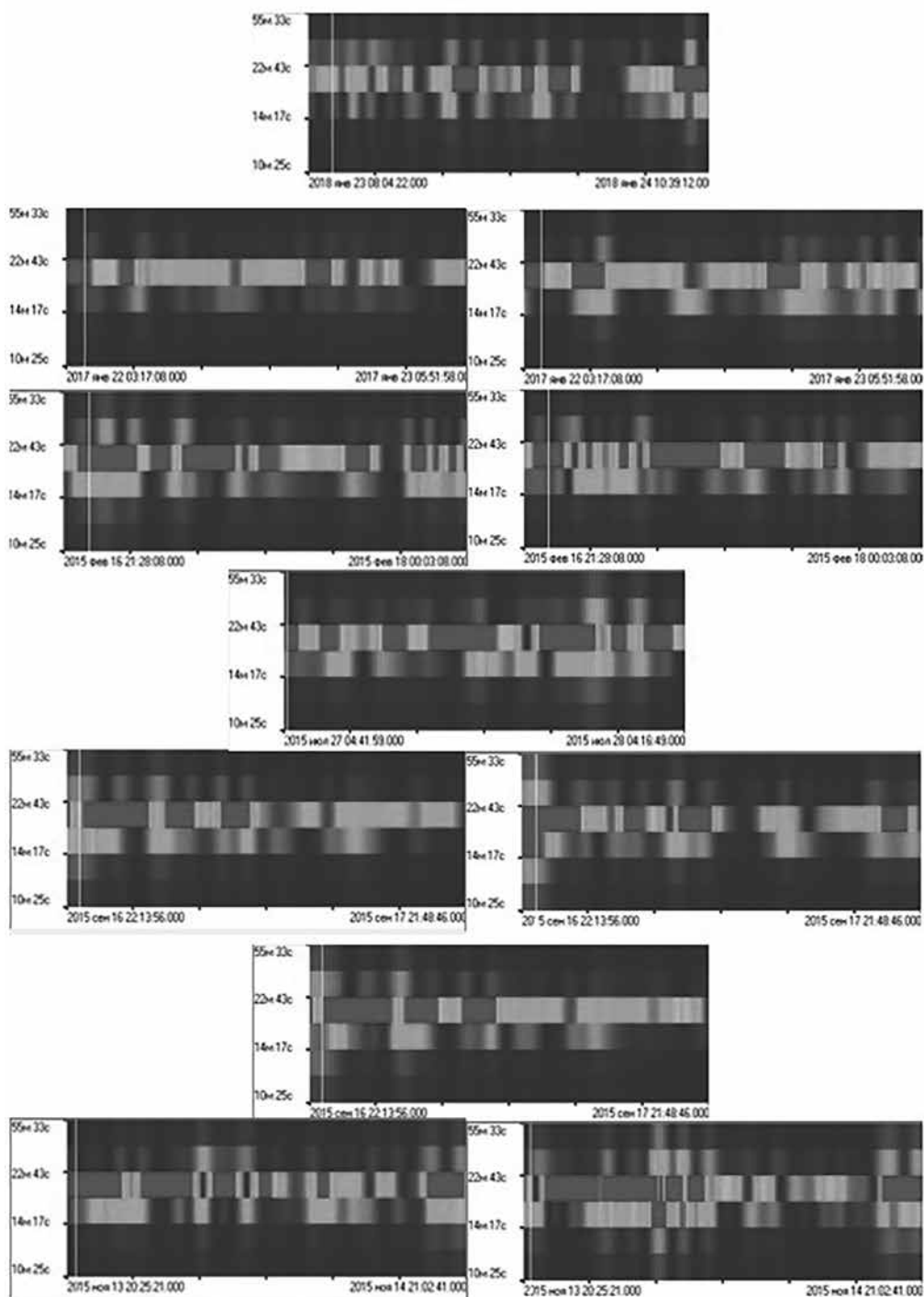


Рис. 5. Спектрограммы для не катастрофических случаев цунамигенных землетрясений

записи, мы постарались сохранить подобное деление на две половины для других землетрясений. Средние продолжительности и периоды максимумов представлены в табл. 3. При обработке многосуточных записей возникали сложности с получением единой непрерывной записи, почти все рассмотренные ниже случаи имели разрывы в несколько часов.

Характеристики максимумов на спектрограммах

№ п/п	Средний период максимумов, ч		Средняя продолжительность всплесков, ч	
	для первой половины записи	для второй половины записи	для первой половины записи	для второй половины записи
1	4,0	8,9	6,6	1,5
2	4,2	4,5	1,8	2,8
3	5,3	3,8	2,1	2,1
4	8,0	4,4	2,2	2,2
5	4,7	8,1	2	1,8
6	4,0	4,2	1,6	1,3
7	6,0	4,7	2,2	1,8
8	5,8	4,6	3,9	2,7

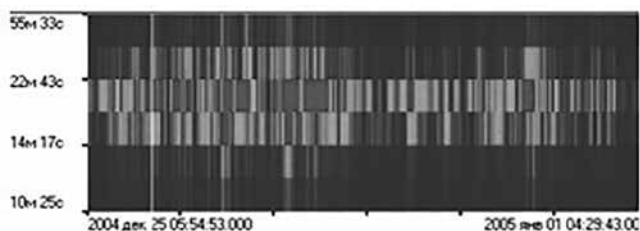


Рис. 6. Спектрограмма многосуточной записи катастрофического события под № 1

Динамика максимумов на спектрограмме многосуточных записей показывает, что их средний период имеет тенденцию к уменьшению во второй половине записи. Отношение периода второй половины записи к периоду первой половины не превышает значения 1,7. Средняя продолжительность максимумов в основном варьирует около значения 2 ч, отношение продолжительности пиков имеет максимальное значение 1,4.

Исключением является катастрофическое землетрясение под № 1. Средний период максимумов на спектрограмме здесь не убывает, а значительно возрастает, отношение периодов составляет 2,2, что больше, чем отношения периодов для прочих случаев. Увеличивается период между всплесками и для случая под № 5, произошедшего у берегов Японии, восточнее деформографов, хотя разница между средними значениями здесь уступает таковой в случае под № 1. Средняя продолжительность максимумов резко уменьшается, отношение продолжительности составляет 4,4, что также не имеет аналогов для других землетрясений.

Катастрофическое землетрясение под № 2 по данным параметрам неотлично от не катастрофических землетрясений. Его магнитуда меньше, чем у первого катастрофического землетрясения, но пропуск в записи позволил начать многострочную запись через 1,4 сут после момента землетрясения. Значительный по времени пробел может вносить искажение в анализ.

Заключение

В нашей выборке цунамигенных землетрясений колебание ${}_0S_0$ имеет много-часовой период релаксации при не катастрофических землетрясениях с максимальной магнитудой 8,3, очаг которых находится в южных районах Тихого океана. В остальных

случаях, в том числе для катастрофического Суматранского землетрясения с магнитудой 9,3, максимумы на спектрограмме были распределены относительно равномерно. Вторичные всплески после момента землетрясений регистрируются через 2–5 ч, следующие – через 6–11 ч.

В середине многосуточной записи Суматранского землетрясения наблюдается резкое изменение динамики колебания ${}_0S_0$: значительно уменьшается частота регистрации максимумов и уменьшается их средняя продолжительность. Остальные случаи подобного изменения не показывают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгих Г.И., Лешко О.А. Цунамигенные землетрясения, регистрация и интерпретация данных // Вестн. ДВО РАН. 2019. № 2. С. 62–70
2. Соболев Г.А. Возникновение колебаний 11-часового периода после землетрясения Тохоку // Докл. АН. 2018. Т. 480, № 3. С. 348–352.
3. Соболев Г.А. О некоторых свойствах возникновения и эволюции колебаний земли после землетрясений // Физика Земли. 2013. № 5. С. 12–27.
4. Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н. Пульсации собственных колебаний земли после землетрясений в часовом диапазоне периодов // Физика Земли. 2018. № 3. С. 3–17.