

Г.И. ДОЛГИХ, О.А. ЛЕВОШКО

Цунамигенные землетрясения, регистрация и интерпретация данных

Анализируются записи лазерных деформографов, содержащих информацию о четырех цунамигенных землетрясениях в различных районах Тихого океана. Установлено, что только на записи одного землетрясения наблюдается скачок деформации, вызванный подвижками морского дна, которые привели к образованию цунами. Отсутствие таких же сигналов на записях других землетрясений объясняется преобладанием дисперсии над нелинейностью в ходе распространения сигналов от мест их возникновения до мыса Шульца. По дисперсионным кривым данных землетрясений анализируются некоторые возможные источники зарегистрированных сигналов и отдельные характеристики землетрясений. Предложен новый метод учета влияния вариаций атмосферного давления на уровень микродеформаций земной коры зоны расположения лазерных деформографов. Применение данного метода позволило уверенно выделить отдельные тона и обертона собственных колебаний Земли после одного из землетрясений.

Ключевые слова: лазерный деформограф, лазерный нанобарограф, землетрясение, цунами, скачок деформации, дисперсия, нелинейность, спектр, собственные колебания Земли.

Tsunamigenic earthquakes, registration and interpretation of the data. G.I. DOLGIKH, O.A. LEVOSHKO (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

The records of laser strainmeters, containing information about four tsunamigenic earthquakes which occurred in various areas of the Pacific ocean are analyzed. It is established that only on record of one earthquake the deformation jump, caused by seabed motions which led to formation of a tsunami is observed. The absence of the same signals on records of other earthquakes is explained by the predominance of dispersion over nonlinearity during distribution of signals from their origin places to cape Schultz. According to dispersive curves of these earthquakes, some possible sources of the recorded signals and individual earthquake characteristics are analyzed. A new method is proposed of studying the influence of the atmosphere pressure variations on the level of micro deformation of the earth's crust in the location area of the laser strainmeters. Application of this method allowed allocating surely separate tone and an overtone of natural oscillations of Earth after one of earthquakes.

Keywords: laser strainmeter, laser nanobarograph, earthquake, tsunami, deformation jump, dispersion, nonlinearity, spectrum, free oscillations of the Earth.

Введение

Проблема прогноза землетрясений, особенно цунамигенных, захватила умы исследователей много десятилетий назад. Ученые посвятили этому массу времени и сил, достигнув определенных результатов (некоторые из них приведены в работах [9, 12–15]). На основе полученных результатов экспериментального и теоретического характера построены различные модели физики подготовки и развития землетрясений (например, [1,

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

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (Проект № 18-05-80011. Опасные явления. Анализ цунамигенных землетрясений) и ДВО РАН.

11]), основные идеи которых нашли отражение в последующих экспериментальных работах. Тем не менее, несмотря на большое количество работ этого направления, данная задача решена лишь частично, главным образом для долгосрочного прогноза, построенного на основе статистического подхода, подробной исторической хронологии и некоторых геолого-геофизических данных исследуемых районов. В качестве примера такого прогноза можно привести работу дальневосточников, которые предсказали землетрясение на Сахалине в августе 2006 г. [10]. Что касается среднесрочного и особенно краткосрочного прогнозов, то эти задачи далеки от своего решения. Определенные перспективы имеются для краткосрочного прогноза [7], но реализовать их сложно из-за больших финансовых затрат на выполнение необходимых исследований. Прогнозирование цунамигенных землетрясений также пока невозможно. В настоящее время тревога цунами объявляется при фиксации подводного землетрясения определенной магнитуды с дальнейшим наблюдением за морским возмущением. Современные службы мониторинга не позволяют отслеживать данную ситуацию, что было подтверждено в 2018 г. во время цунами в Индийском океане. Установленная там после цунами 2004 г. современная система мониторинга слежения пропустила цунами, что привело к гибели людей и существенным разрушениям.

В работах [3, 4, 8] указано, что цунами можно прогнозировать по фиксации скачка деформации, который возникает в земной коре в результате смещений морского дна, вызывающих цунами, и распространяется со скоростью, значительно превышающей скорость цунами. Данный вывод был сделан после анализа записей катастрофических цунамигенных землетрясений. Остаются открытыми и вопросы: при всех ли землетрясениях может наблюдаться этот эффект, как он связан с характером подвижек дна и т.п.?

В данной статье на основе анализа записей четырех цунамигенных землетрясений, полученных на двухкоординатном лазерном деформографе [2], установленном на Морской экспериментальной станции Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН «Мыс Шулца», рассмотрим эти вопросы и отдельные геофизические процессы, сопутствующие землетрясениям.

Аппаратно-программный комплекс

Двухкоординатный лазерный деформограф состоит из 52,5- и 17,5-метрового деформографов. Рабочее плечо первого ориентировано относительно линии «север–юг» под углом 18° (198°). Он создан на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона и частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, находится на глубине 3–5 м под землей. В 70 м от первого деформографа на глубине 3–4 м под землей смонтирован второй лазерный деформограф «запад–восток», рабочее плечо которого ориентировано относительно линии «север–юг» под углом 110° (290°). Угол между рабочими осями лазерных деформографов составляет 92° . Применяемые методы интерферометрии позволяют регистрировать изменения длины рабочего плеча каждого деформографа с точностью 0,01 нм. При этом чувствительность лазерного деформографа с длиной рабочего плеча 52,5 м равна $1,9 \times 10^{-13}$ (0,01 нм/52,5 м), а деформографа с длиной рабочего плеча 17,5 м – $5,7 \times 10^{-13}$.

Таким образом, при воздействии на каждый прибор какой-либо крупномасштабной динамической нагрузки (приливы, изменения температуры, атмосферного давления и т.п.) амплитуда деформаций 52,5-метрового лазерного деформографа должна быть в 3 раза больше амплитуды деформаций 17,5-метрового лазерного деформографа при условии, что они расположены на одинаковых породах. На практике это не выполняется, поэтому для определения величины данного коэффициента были проведены дополнительные исследования по оценке воздействия крупномасштабных атмосферных процессов на показания двух лазерных деформографов. Основными динамическими нагрузками, которые равномерно влияют на изменение длин измерительных плеч обоих лазерных деформографов, являются крупномасштабные вариации атмосферного давления, не имеющие

поляризационных свойств. Поэтому они одинаково влияют на деформации обеих установок, несмотря на то что они расположены практически взаимно-перпендикулярно. Для оценки данного воздействия на показания лазерных деформографов были обработаны отдельные показатели 52,5- и 17,5-метрового деформографов и лазерного нанобарографа [5]. При этом надо учесть, что чувствительность лазерного нанобарографа зависит от упругих свойств анероидной коробки, на которую прикреплено отражающее зеркало рабочего плеча равноплечего интерферометра Майкельсона. Поэтому перед выполнением работы электронно-оптическая часть лазерного нанобарографа вместе с механической частью была откалибрована сертифицированным барометром. Для нанобарографа установлено, что изменение напряжения на 1 В на выходе системы регистрации соответствует изменению атмосферного давления на величину, равную 2,7 Па.

Кроме указанных выше деформографов проводили испытания третьего лазерного деформографа, ориентированного аналогично деформографу «север–юг» с длиной измерительного плеча 52,5 м.

Опишем расположение устоев всех лазерных деформографов. Первый лазерный деформограф «север–юг»: бетонный блок, на котором расположен угловый отражатель, стоит на скальном выходе (гранит); мощный бетонный блок, на котором размещена основная часть интерферометра Майкельсона вместе с частотно-стабилизированным лазером и системой регистрации, находится на суглинке. Второй лазерный деформограф «север–юг»: основная часть интерферометра Майкельсона с частотно-стабилизированным лазером и системой регистрации поставлен на тот же бетонный блок; угловый отражатель расположен на бетонном блоке, стоящем на песчаной подушке с подстилающим слоем суглинки. Бетонные блоки лазерного деформографа с длинами плеч 17,5 м стоят примерно на таких же породах, что и второй лазерный деформограф «север–юг».

Полученные экспериментальные данные со всех установок аппаратно-программного комплекса после предварительной обработки (фильтрации и децимации) записываются на твердый носитель вычислительного комплекса, расположенного в лабораторном помещении станции «Мыс Шульца». Эпизодически информация передается во Владивосток и вносится в ранее созданную базу экспериментальных данных, которые доступны для их дальнейшей обработки научными сотрудниками ТОИ ДВО РАН.

Обработка и анализ экспериментальных данных

При обработке данных за 2015 г. были выбраны относительно средние по мощности цунамигенные землетрясения: 1) землетрясение в Тихом океане восточнее Японии (координаты 39°85,6′ с.ш., 142°88,1′ в.д.), произошло 16.02.2015 г. в 23:06:27.0 по UTC, магнитуда 6,7–6,8 Mw, на глубине 15 км; 2) землетрясение в Тихом океане вблизи Лисьих и Алеутских островов (52°21,4′ с.ш., 169°39,9′ з.д.), произошло 27.07.2015 г. в 04:49:00 по UTC, магнитуда 6,9 Mw, на глубине 20 км. Рядом зарегистрированы нецунамигенные землетрясения с магнитудами около 5 Mw (максимум 5,6 Mw); 3) землетрясение в Тихом океане вблизи Чили (31°57,3′ ю.ш., 71°67,4′ з.д.), произошло 16.09.2015 г. в 22:54:32.0 по UTC, магнитуда 8,3 Mw, на глубине 20 км; 4) землетрясение в Восточно-Китайском море (31°00,1′ с.ш., 128°87,3′ в.д.), произошло 13.11.2015 г. в 20:51:03.0 по UTC, магнитуда 6,7 Mw, на глубине 10 км. Места локализации указанных землетрясений показаны на рис. 1.

При рассмотрении записей землетрясений на лазерных деформографах можно отметить, что только на записи одного землетрясения, произошедшего в Восточно-Китайском море, наблюдается скачок деформации земной коры (рис. 2), названный деформационным проявлением цунамигенного землетрясения, который регистрировался нами ранее [3, 8]. Скачок деформации земной коры проявился только на лазерном деформографе «север–юг», на деформографе «запад–восток» он отсутствовал. Это может указывать на то, что

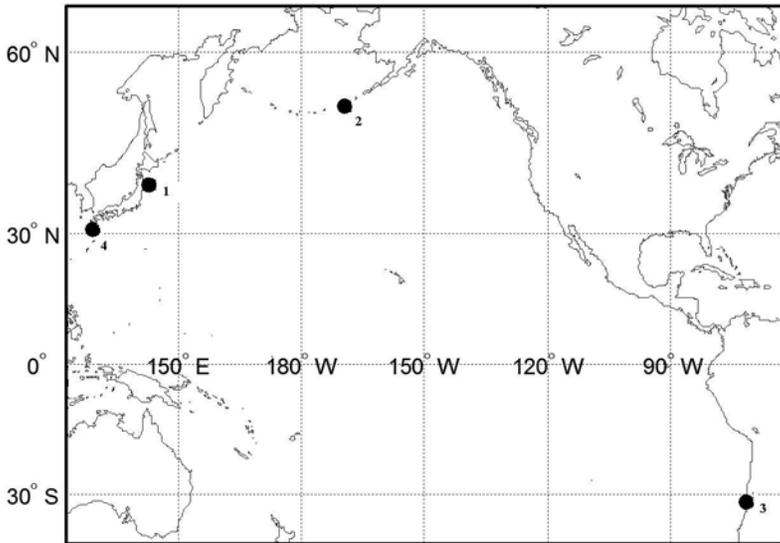


Рис. 1. Карта расположения цунамигенных землетрясений, изученных по записям лазерных деформографов (описание см. в тексте)

данный сигнал обладает поляризационными свойствами. При рассмотрении динамической спектрограммы записей лазерных деформографов установлено, что в каждой записи присутствуют колебания в диапазоне периодов от 9 до 25 с, но только в динамической спектрограмме записи землетрясения лазерного деформографа «север–юг» присутствует сигнал с периодами от 30 с до 1,5 мин. Отсутствие деформационного скачка на записях других землетрясений можно объяснить тем, что он не всегда формируется. При его формировании нелинейность должна компенсировать дисперсию, и тогда деформационный скачок в виде солитоноподобного сигнала (сигнал типа синус Гордона) может пройти значительные расстояния. Если дисперсия будет преобладать над нелинейностью, то на каком-то расстоянии этот сигнал расплывется, при преобладании нелинейности он схлопнется, превратившись в дельта-функцию, которую тяжело обнаружить на записи лазерных деформографов.

Проанализируем дисперсионные кривые для каждого землетрясения, полученные при спектральной обработке записей лазерных деформографов, отфильтрованных в полосе 1–0,01 Гц. Для первого землетрясения период и скорость уменьшаются почти по линейному закону: период от 18 до 10 с, а скорость от 2,7 до 1,8 м/с. Для второго землетрясения наблюдается немного другая картина: в начале период меняется примерно от 23 до 13 с при изменении скорости от 3,55 до 2,55 м/с; далее наблюдается изменение периода от 26 до 12 с при уменьшении скорости от 2,5 до 2,2 м/с; затем период меняется от 22 до 12 с при изменении скорости от 2,15 до 2,1 м/с. Скорее всего, второй и третий

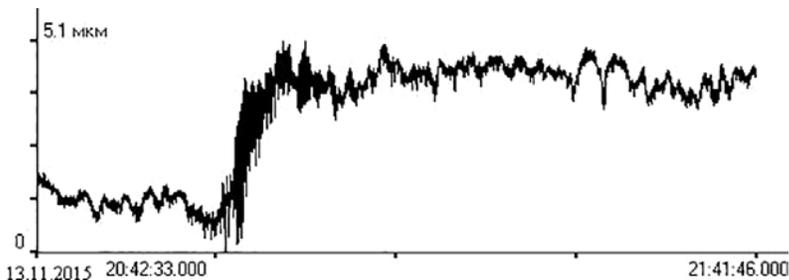


Рис. 2. Запись лазерного деформографа «север–юг» цунамигенного землетрясения, произошедшего 13.11.2015 г. в Восточно-Китайском море

скачки в дисперсионной кривой вызваны произошедшими рядом землетрясениями, которые внесли свой вклад в запись лазерного деформографа. Можно предположить, что они вызваны повторными толчками в очаге разгрузки, но тогда сложно объяснить другое – более крутое изменение дисперсионной кривой. Как видим, для всех трех случаев скорость уменьшается последовательно, а изменение периода для второго и третьего случаев происходит значительно быстрее. Если ввести соответствующий коэффициент, равный отношению изменения периода к изменению скорости, то можно получить для первого случая $10 \text{ с}^2/\text{м}$, для второго – $46,7 \text{ с}^2/\text{м}$, для третьего – $200 \text{ с}^2/\text{м}$. Заметим, что для первого землетрясения этот коэффициент равен около $9 \text{ с}^2/\text{м}$. Для третьего землетрясения дисперсионная кривая меняется по линейному закону, за исключением некоторых случайных выбросов: период – от 29 до 21 с, скорость – от 3,95 до 3,5 м/с. Указанный выше коэффициент имеет значение около $18 \text{ с}^2/\text{м}$. Для четвертого землетрясения изменение дисперсионной кривой также соответствует линейному закону: период снижается от 19 до 9 с, скорость – от 3,35 до 2,45 м/с. Коэффициент отношения изменения периода к изменению скорости составляет около $11 \text{ с}^2/\text{м}$.

Как видно из расчетов, введенный нами коэффициент зависит от мощности землетрясения: для первого, второго и четвертого землетрясений мощности примерно одинаковые, соответственно и коэффициенты тоже очень близки. Третье землетрясение по мощности значительно больше остальных, и коэффициент тоже выше. Небольшие вариации коэффициента могут быть связаны с глубиной гипоцентра, но для окончательного вывода необходимы дополнительные исследования.

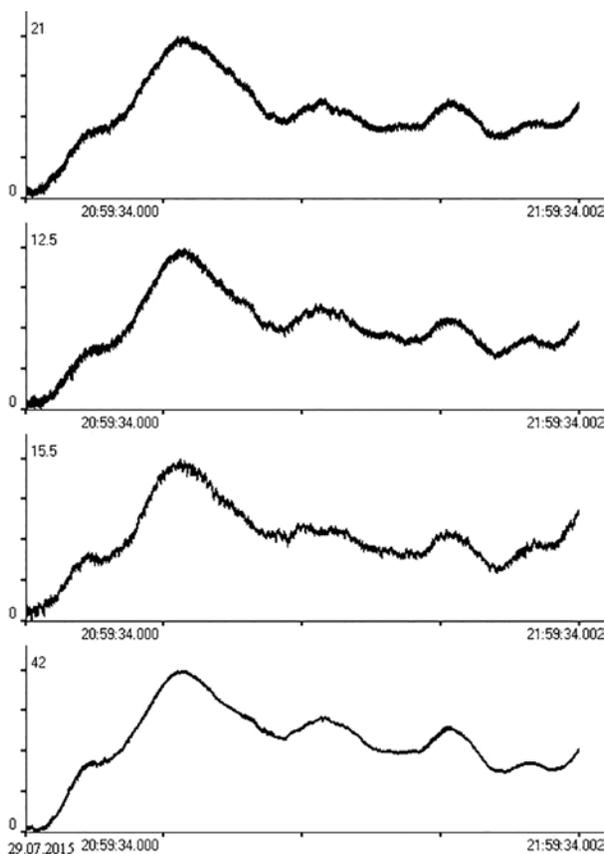


Рис. 3. Синхронные участки записей первого лазерного деформографа «север–юг», лазерного нанобарографа, лазерного деформографа «запад–восток», второго лазерного деформографа «север–юг» (сверху вниз). По оси ординат – всемирное время, по оси абсцисс – относительные единицы

необходимы дополнительные исследования.

Ранее мы высказали предположение, что существует фон собственных колебаний Земли, который поддерживается часто происходящими землетрясениями на минимальном уровне [6]. К аналогичным выводам пришли и авторы работ [16, 17], которые выделяли тона и обертона собственных колебаний Земли после различных землетрясений. В работе [17] утверждается, что если вычесть из данных широкополосного сейсмоприемника влияние вариаций атмосферного давления, то тона и обертона собственных колебаний Земли выделяются более четко. Для этого предложена формула, связывающая вариации атмосферного давления с деформацией земной коры на базе сейсмоприемника с учетом упругих характеристик земной коры, на которой расположен сейсмоприемник. По нашему мнению, применение этой формулы не в полной мере позволяет учитывать влияние атмосферного давления на вариации деформаций, записанные

прибором, так как невозможно точно знать (в нашем случае) строение верхнего слоя земной коры на базе лазерных деформографов длиной 52,5 и 17,5 м. Для более реального учета влияния атмосферного давления на деформацию участка земной коры был обработан значительный объем синхронных экспериментальных данных лазерного нанобарографа и всех лазерных деформографов, установленных на мысе Шульца, при которых прослеживается почти идеальная корреляция в записях приборов. На рис. 3 в качестве примера приведены синхронные участки записей лазерных нанобарографа и деформографов, где прослеживается явное влияние вариаций атмосферного давления на уровень деформаций земной коры.

В результате обработки 20 участков синхронных записей приборов, на которых фиксируется явное влияние вариаций атмосферного давления на деформации, записанные лазерными деформографами, с дальнейшим усреднением были получены следующие оценки: изменение на одну относительную единицу показаний лазерного нанобарографа вызывает изменение на 1,61 ед. показаний первого лазерного деформографа «север–юг», на 1,16 ед. показаний деформографа «запад–восток», на 3,38 ед. показаний второго лазерного деформографа «север–юг». Учитывая длину лазерных деформографов (52,5, 17,5 и 52,5 м), можно рассчитать соотношение относительных смещений, зарегистрированных первым и вторым лазерными деформографами «север–юг», к смещению, зарегистрированному деформографом «запад–восток». Эти оценки можно делать

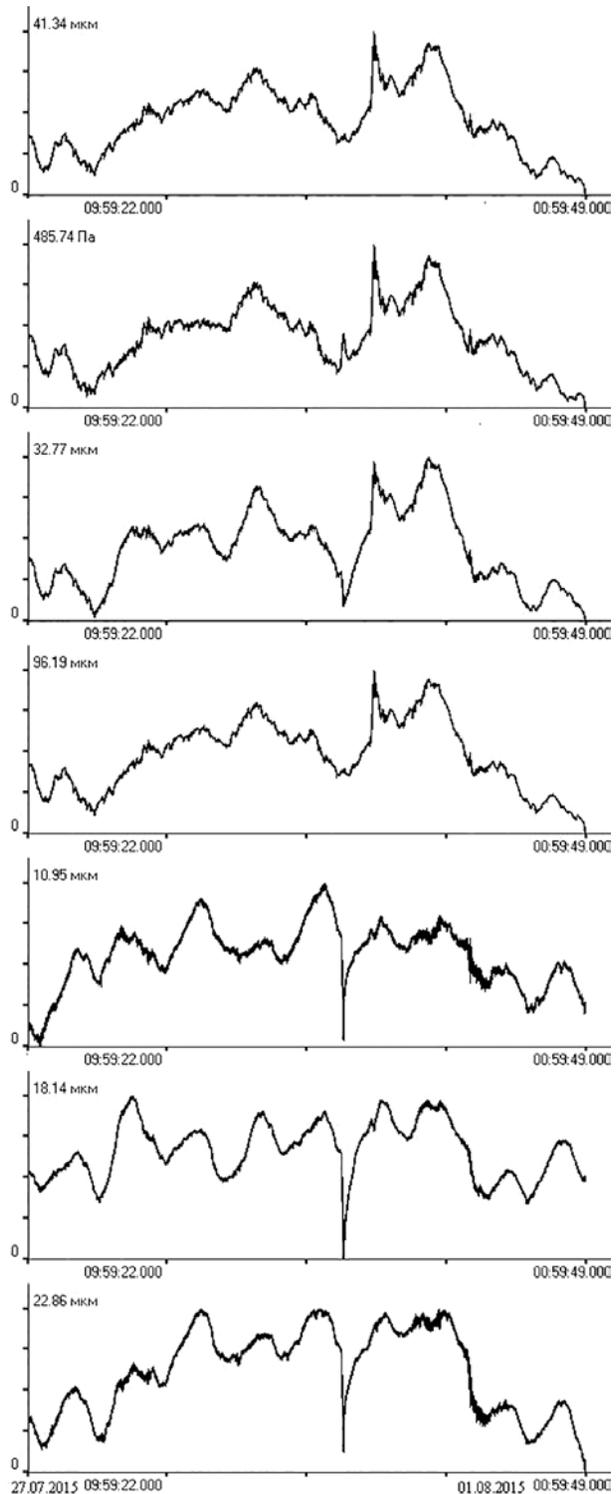


Рис. 4. Синхронные участки записей первого лазерного деформографа «север–юг», лазерного нанобарографа, лазерного деформографа «запад–восток», второго лазерного деформографа «север–юг», скорректированные участки записей первого лазерного деформографа «север–юг», лазерного деформографа «запад–восток», второго лазерного деформографа «север–юг» (сверху вниз)

несмотря на разную направленность главных осей приборов, так как влияние вариаций атмосферного давления не носит поляризационного характера. Мы получаем следующие оценки: $1,61 : 1,16 = 1,39$; $3,38 : 1,16 = 2,91$ при отношении длин плеч $52,5 : 17,5 = 3$. Из этих оценок можно сделать вывод, что второй лазерный деформограф «север–юг» стоит на участке земной коры с породами, близкими по своим характеристикам к породам участка земной коры, на которой находится лазерный деформограф «запад–восток». Первый лазерный деформограф «север–юг» расположен иначе, что приводит к уменьшению его чувствительности к изменению вариаций атмосферного давления. Способ учета влияния вариаций атмосферного давления на показания лазерных деформографов, предложенный нами, значительно лучше способа, описанного в работе [17], так как такой способ позволяет учесть не только влияние вариаций атмосферного давления на деформацию земной коры, зарегистрированную деформографом, но и возможное влияние вариаций атмосферного давления на параметры оптического пути лазерного луча в интерферометре Майкельсона, на базе которого созданы лазерные деформографы.

Применим полученные оценки в дальнейшей обработке данных. На рис. 4 последовательно приведены синхронные участки записей первого лазерного деформографа «север–юг», лазерного нанобарографа, деформографа «запад–восток», второго лазерного деформографа «север–юг», а также скорректированные участки записей первого лазерного деформографа «север–юг», деформографа «запад–восток» и второго лазерного деформографа «север–юг». Скорректированные участки записей были получены при вычитании из данных соответствующих лазерных деформографов данных лазерного нанобарографа, умноженных на коэффициент, который для первого лазерного деформографа «север–юг» равен 1,61, для деформографа «запад–восток» – 1,16, для второго лазерного деформографа «север–юг» – 3,38.

Для наглядного представления ценности указанных поправок рассмотрим спектры, полученные при обработке участка записи лазерного нанобарографа, синхронных с ним участка записи лазерного деформографа «запад–восток» и откорректированного участка записи того же деформографа в области основного сфероидального тона Земли ${}_0S_0$ (рис. 5).

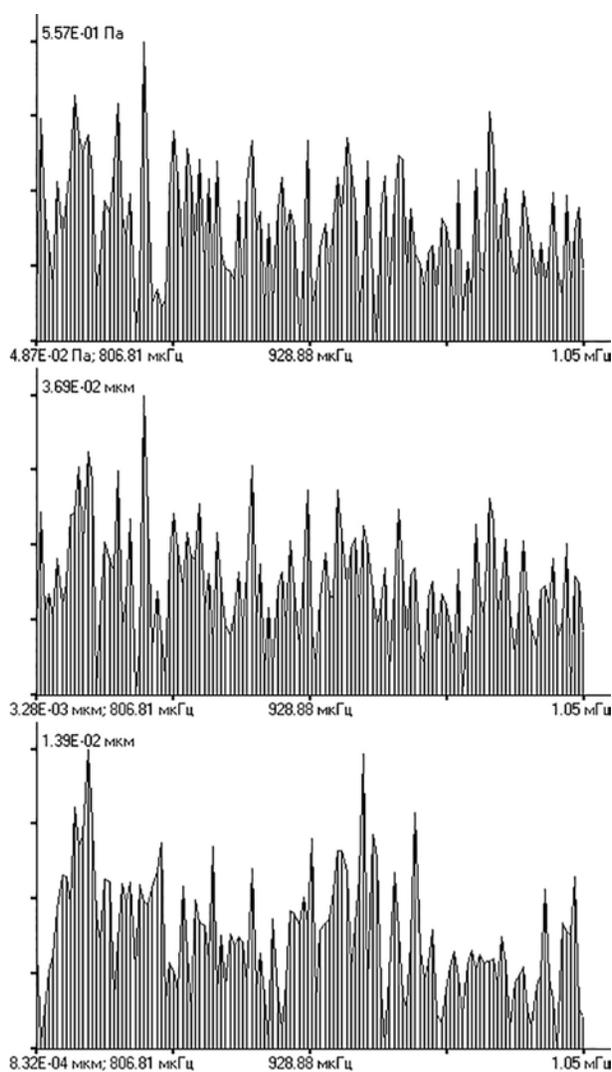


Рис. 5. Спектры участков записей лазерного нанобарографа, лазерного деформографа «запад–восток», скорректированного участка записи лазерного деформографа «запад–восток» (сверху вниз)

При сравнении данных спектров можно видеть, что спектр неоткорректированной записи лазерного деформографа «запад–восток» имеет максимумы существенной амплитуды, вызванные вариациями атмосферного давления, которые присутствуют в спектре записи лазерного нанобарографа. В спектре откорректированной записи деформографа «запад–восток» таких максимумов нет. Более того, при обработке данной записи выделены мощные пики, обусловленные собственными колебаниями Земли. Первый значительный пик соответствует основному сфероидальному тону ${}_0S_0$ (экспериментально определенный период 20 мин 5,3 с), а второй по значимости пик – сфероидальному обертоном ${}_1S_3$ (экспериментально определенный период 17 мин 30,7 с). Основной сфероидальный тон ${}_0S_5$ (период 19 мин 50,1 с) не проявился из-за плохого частотного разрешения, в результате которого боковые лепестки максимума на периоде 20 мин 5,3 с «поглотили» спектральный пик основного сфероидального тона ${}_0S_5$. Как и авторы работы [17], мы считаем важным учитывать влияние вариаций атмосферного давления на уровень деформаций земной коры в зоне расположения приборов. К такому заключению можно прийти при сравнении двух последних спектров на рис. 5: только после вычета деформации земной коры, вызванной вариациями атмосферного давления, удалось выделить сфероидальные колебания Земли в рассматриваемом диапазоне периодов, которые были «замаскированы» более мощными атмосферными процессами.

Заключение

При анализе записей четырех цунамигенных землетрясений средней мощности, зарегистрированных лазерными деформографами, расположенными на Морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца», установлено, что только на записи одного землетрясения наблюдается скачок деформации, вызванный подвижками морского дна, приведшими к образованию цунами. Отсутствие таких скачков деформации при других цунамигенных землетрясениях может быть связано с тем, что при своем распространении от места возникновения до места регистрации скачок деформации, который относится к солитоноподобным сигналам, не сохранился ввиду преобладания дисперсии над нелинейностью.

Предложен новый метод учета влияния вариаций атмосферного давления на уровень микродеформаций земной коры в зоне расположения лазерных деформографов, основанный на применении записей лазерного нанобарографа. Данный метод позволяет повысить надежность выделения из записей лазерных деформографов различных мало-мощных геосферных сигналов, например тонов и обертонов собственных колебаний Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. 1991. 217 с.
2. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.
3. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // ДАН. 2007. Т. 417, № 1. С. 109–112.
4. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Инфразвуковые колебания Японского моря // ДАН. 2011. Т. 441, № 1. С. 98–102.
5. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении баро-деформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90.
6. Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н. Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформометром // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 2. С. 15–20.
7. Долгих Г.И., Мишаков А.В. О возможности прогноза коровых землетрясений по вариациям напряженно-деформационного поля Земли // ДАН. 2011. Т. 437, № 5. С. 691–694.

8. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом // ДАН. 2007. Т. 412, № 1. С. 104–106.
9. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
10. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Ким Ч.У., Коровин М.Е., Малашенко А.Е., Савочкин П.В., Тихонов И.Н. Землетрясение 17(18) августа 2006 г. на Сахалине и реализация комплексного прогноза // ДАН. 2007. Т. 412, № 3. С. 396–400.
11. Магницкий В.А. Модели Земли. М.: Знание, 1978. 64 с.
12. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
13. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Зависимость времени проявления предвестников от силы землетрясения // ДАН СССР. 1985. Т. 285, № 6. С. 1359–1361.
14. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. О зависимости времени подготовки землетрясения от его энергии // ДАН СССР. 1983. Т. 271, № 2. С. 330–333.
15. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясения от объема сейсмического очага // ДАН СССР. 1983. Т. 271, № 3. С. 598–602.
16. Соболев Г.А. О некоторых свойствах возникновения и эволюции колебаний Земли после землетрясений // Физика Земли. 2013. № 5. С. 12–27.
17. Zürn W., Ferreira A.M.G., Widmer-Schmidrig R., Lentas K., Rivera L., Clevede E. High-quality lowest-frequency normal mode strain observation at the Black Forest Observatory (SW-Germany) and comparison with horizontal broad-band seismometer data and synthetics // Geophys. J. Int. 2015. Vol. 203. P. 1787–1803.