

Научная статья
УДК 551.466.62
DOI: 10.31857/S0869769824020013
EDN: ldxсct

Деформационный метод прогноза цунами

Г.И. Долгих[✉], С.Г. Долгих

Григорий Иванович Долгих

академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток,
Россия
dolgikh@poi.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

Станислав Григорьевич Долгих

доктор технических наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток,
Россия
sdolgikh@poi.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9828-5929>

Аннотация. На основе анализа многочисленных данных по вариациям деформаций земной коры, полученных с помощью лазерного деформографа, обнаружены деформационные аномалии (скачки деформации), возникающие при генерации цунами. Скачки деформации, зарегистрированные лазерным деформографом, вызваны подвижками дна, приводящими к образованию цунами. По данным многих зарегистрированных цунамигенных землетрясений рассчитаны коэффициенты затухания выделенных деформационных аномалий по четырем регионам планеты.

Ключевые слова: землетрясение, цунами, лазерный деформограф, скачок деформации

Для цитирования: Долгих Г.И., Долгих С.Г. Деформационный метод прогноза цунами // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 5–16. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020013>, EDN: ldxсct.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 22-27-00678 «Микродеформации земной коры, вызванные морскими инфрагравитационными волнами по данным лазерно-интерференционных приборов».

Deformation method of tsunami prediction

G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh

Grigory I. Dolgikh

Academician of RAS, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
dolgikh@poi.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2806-3834>

Stanislav G. Dolgikh

Doctor of Sciences in Technique
V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
sdolgikh@poi.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9828-5929>

Abstract. Based on the analysis of numerous data on variations of deformations of the Earth's crust obtained using a laser strainmeter, deformation anomalies (deformation jumps) that occur during tsunami generation have been detected. The deformation jumps recorded by the laser strainmeter are caused by bottom movements leading to the formation of a tsunami. According to the data of many registered tsunamigenic earthquakes, the attenuation coefficients of the identified deformation anomalies for four regions of the planet have been calculated.

Keywords: earthquake, tsunami, laser strainmeter, deformation jump

For citation: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G. Deformation method of tsunami prediction. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2): 5–16. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020013>, EDN: ldxctt.

Funding. The work was carried out with the financial support of the RGNF, grant N22-27-00678 «Micro-deformations of the earth's crust caused by marine infragravity waves according to laser interference devices».

Введение

Известно, что одним из самых опасных катастрофических явлений Земли является цунами, которое наносит значительный экономический ущерб и служит причиной больших человеческих жертв. В качестве характерного примера можно привести цунами, которое возникло 26 декабря 2004 г. в Индийском океане и унесло жизни более 283 000 человек. Оно было вызвано мощным землетрясением с максимальным значением магнитуды около 9,3 [1]. От действия цунами страдают различные регионы планеты, но в наибольшей степени это касается Японии. Учитывая, в какой степени Япония подвержена воздействию землетрясений и цунами, а также ее высокое научно-техническое развитие, можно ожидать, что в данном регионе планеты будут сосредоточены передовые научно-технические разработки, направленные на прогноз возникновения и развития землетрясений и цунами. Если проблема краткосрочного прогноза землетрясений далека от своего решения, то задача обнаружения момента возникновения цунами кажется вполне решаемой. Японские острова и окружающие их акватории «напичканы» различными сейсмостанциями, GPS-приемниками, донными сейсмостанциями и высокоточными измерителями уровня моря/океана. Но тем не менее события 2011 г. в еще большей степени «оголили» проблемы краткосрочного прогноза цунами.

В настоящее время традиционный метод краткосрочного прогнозирования цунами основан на сейсмологической информации (магнитуде землетрясения, времени главного толчка и местоположении эпицентра) [2]. Магнитуда землетрясения, превышающая установленное пороговое значение, различное для разных цунамигенных зон, обычно приводит к выдаче предупреждения о цунами. Такой подход, основанный на «магнитудно-географическом принципе», прост: он обеспечивает небольшое количество пропусков цунами, но и дает ложные тревоги. Большинство действующих систем раннего предупреждения о цунами основаны на сейсмических данных.

Недавно были предложены два независимых подхода для определения энергии источника цунами: один основан на данных Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) во время распространения цунами, а другой – на наземной прибрежной системе глобального позиционирования (GPS) при генерации цунами. Подход GPS учитывает динамический процесс землетрясения, подход инверсии DART обеспечивает фактическую оценку энергии цунами, распространяющихся волн цунами. Оба подхода приводят к согласованным энергетическим шкалам для изученных цунами. Исходя из этих многообещающих результатов, в работе [3] изучен подход к определению энергии источника цунами в реальном времени на основе объединения этих двух методов. На первой стадии определяется источник цунами по глобальной сети GPS сразу после землетрясения с целью раннего предупреждения в ближней зоне. Затем по ближайшим измерениям DART уточняется энергия цунами для повышения точности прогнозов или отмены тревоги. Комбинация этих двух сетей реального времени может предложить привлекательную возможность для раннего определения угрозы цунами с целью спасения большего числа жизней либо своевременной отмены предупреждений о цунами, чтобы избежать ненужных ложных тревог. За последнее десятилетие количество датчиков в открытом океане, способных анализировать информацию о проходящем цунами, неуклонно увеличивалось, особенно благодаря национальным кабельным сетям, а также международным усилиям, в частности системе DART. Полученная информация анализируется с целью предупреждения цунами. Большинство текущих предупреждений, которые включают оповещения о цунами, направлены на районы средней и дальней зоны. В работе [3] сформулированы основные направления выполнения исследований с использованием систем DART и GPS. Но сбой данной системы в Индийском океане, при котором было пропущено мощное цунами, вверг в уныние оптимистически настроенных ученых.

Необходимо отметить, что цунами могут быть вызваны не только землетрясениями, но и подводными оползнями, вулканической деятельностью, да и просто обрушением горных массивов в море [4].

Впервые при регистрации цунамигенного землетрясения была зафиксирована деформационная аномалия, которая на записи лазерного деформографа имела форму деформационного скачка, возникшего после начала землетрясения [5]. Далее этот результат был обобщен в работе [6], на основании чего заложены перспективы создания деформационного метода определения цунамигенности землетрясений. Перспективность данного метода связана с тем, что его развитие позволит, как мы предполагаем, на планетарных расстояниях дистанционно определять характер смещений отдельных частей морской земной коры, приводящих в движение огромные массы воды, вырождающиеся при своем развитии в цунами. Ясно, что колебания, зарождающиеся в очаге землетрясения, не вызывают цунами. Данные колебания связаны с параметрами разрыва сплошности, т. е. с его геометрическими размерами и упругопластичными деформациями. Как правило, эти колебания лежат в диапазоне от первых минут до десятка секунд. Они никогда цунами не вызовут. Только

быстрые перемещения огромных масс морской земной коры, которые, к сожалению, не регистрируются любыми широкополосными сейсмографами, приводят к генерации цунами.

В настоящей статье мы рассматриваем особенности появления деформационных аномалий, сопутствующих (сопровождающих) цунами, на нескольких примерах с описанием физических механизмов их возникновения и развития. Перспективность развития данного направления связана с тем, что скорости таких деформационных аномалий более чем на порядок больше скорости распространения цунами, что крайне важно для служб предупреждения.

1. Лазерный деформограф

Деформационная аномалия, описанная в работе [5] и больше соответствующая понятию «деформационный скачок», имела небольшую амплитуду, примерно 60 мкм, и была зафиксирована лазерным деформографом на расстоянии примерно 5600 км от места ее генерации. Понятно, что данная деформационная аномалия не может быть зарегистрирована любым широкополосным сейсмографом (велосиметром, акселерометром и т. п.), так как данные приборы неспособны реагировать на подобные возмущения. Можно было бы говорить о перспективности использования GPS-приемников для регистрации подобных аномалий, но на таких расстояниях от места возникновения деформационных аномалий это невозможно, поскольку основные образцы GPS-приемников могут обеспечить точность регистрации смещений около 1 мм, что значительно больше величины описанной аномалии.

В настоящее время для регистрации деформационных аномалий, связанных с процессом генерации цунами, лучше всего подходят лазерные деформографы, которые способны проводить измерения микросмещений земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с высокой точностью (до 1 пм) [7]. В нашей работе мы будем пользоваться данными по вариациям микросмещений земной коры, полученными с помощью горизонтального лазерного деформографа, созданного на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 52,5 м ориентацией север–юг. В нем в качестве источника света применяется частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер фирмы MellesGriott с долговременной стабильностью 10^{-9} . В последние годы проведена модернизация с установкой на деформографе частотно-стабилизированного лазера по линиям йода в одиннадцатом знаке и с усовершенствованной системой регистрации. После этой модернизации он способен регистрировать вариации микросмещений земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 0,03 нм. Лазерный деформограф установлен в термоизолированных подземных помещениях на глубине около 3–5 м от поверхности земли в точке с координатами 42°34,798'N131°9,400'E, на высоте около 60 м над ур. м. На рис. 1 приведены общий вид подземной части центрального интерференционного узла (слева) и подземный лучевод (справа). Экспериментальные данные по кабельной линии передаются на регистрирующий компьютер, где после предварительной обработки формируются файлы данных с частотой дискретизации 1 кГц и длительностью 1 ч. Лазерный деформограф входит в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, который относится к ТОИ ДВО РАН и расположен на юге Приморского края России в прибрежной зоне Японского моря на мысе Шульца. Основное назначение комплекса связано с задачами изучения природы вариаций микродеформаций земной коры, колебаний давления атмосферы и гидросферы в широком частотном и динамическом диапазонах, исследования закономерностей возникновения, развития и трансформации колебаний и волн звукового и инфразвукового диапазонов. Измерения на комплексе проводятся в непрерывном режиме, а все полученные данные формируются в базу данных (объемом около 10 ТБ),

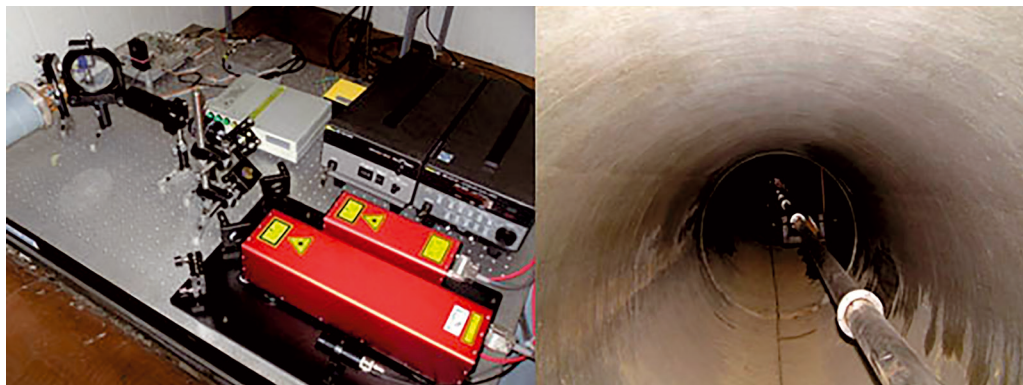


Рис. 1. Модернизированный 52,5-метровый лазерный деформограф. Центральный интерференционный узел с частотно-стабилизированным гелий-неоновым лазером по линиям йода (стабильность частоты 10^{-11}) (слева) и подземный лучевод (справа)

которая постоянно пополняется. Для синхронизации используются часы точного времени на основе применения GPS Trimble 5700.

2. Регистрация деформационных аномалий цунамигенных землетрясений

Лазерным деформографом, работающим с 2000 г., было зарегистрировано много подводных цунамигенных и нецунамигенных землетрясений. Основные характеристики (период и амплитуда) сейсмических волн, возникающих в очаге землетрясения, зависят от размеров разрыва в гипоцентре и от магнитуды – чем больше магнитуда землетрясения, тем больше первичные периоды волн и их амплитуды. Эти колебания и волны никогда не вызывают цунами. Цунами вызывают разнонаправленные поршневые движения дна, оползни и т.п., иногда сопутствующие землетрясениям. Чтобы понять, ждать ли цунами, надо зарегистрировать не само землетрясение, а эти подвижки. Высота цунами зависит от глубины моря. Если метровая подвижка произошла на глубине 5 м, то никакого цунами не возникнет. А вот если

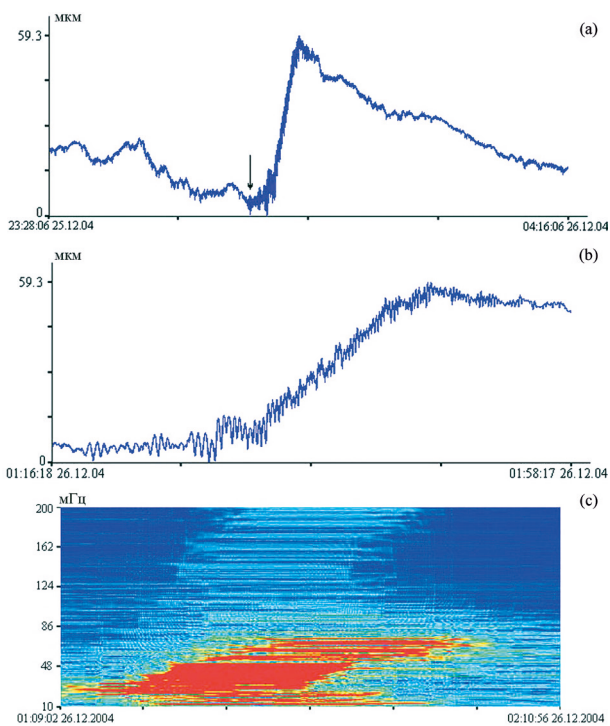


Рис. 2. Запись 52,5-метрового лазерного деформографа за декабрь 2004 г. (a), b – увеличенный фрагмент, c – динамическая спектрограмма. Стрелкой отмечено начало землетрясения. По оси абсцисс указано всемирное время

то же самое случилось на глубине 3 км, то при движении такой массы воды будет цунами огромной высоты!

Впервые одну из таких подвижек (скачок деформации) мы обнаружили в записи лазерного деформографа спустя почти два года после цунамигенного землетрясения 26 декабря 2004 г., эпицентр которого находился в точке с координатами $3,30^{\circ}$ N $95,87^{\circ}$ E на расстоянии около 160 км к западу от Суматры на глубине 30 км от ур. м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа составило примерно 5600 км. Запись лазерного деформографа с характерным сигналом от цунамигенного землетрясения приведена на рис. 2. На этой записи видна мощная деформационная аномалия, возникшая через небольшое время от начала землетрясения с амплитудой около 59,3 мкм. Амплитуда данной аномалии значительно больше амплитуды суточного прилива, наблюдаемого в месте расположения прибора. Сигнал цунамигенного землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом через 19 мин 54 с после начала землетрясения. При анализе динамической спектрограммы (рис. 2, с) установлено, что периоды основных колебаний, вызванных землетрясением, постепенно уменьшаются от 30 до 14 с. Зная соотношение, связывающее скорость распространения упругих волн с периодом колебаний, величину изменения периода основных колебаний и время, за которое это изменение произошло, можно определить расстояние до места землетрясения.

Анализ записей лазерного деформографа цунамигенного и нецунамигенного землетрясений показал, что регистрация деформационного скачка характерна только для цунамигенного землетрясения.

Далее рассмотрим некоторые особенности появления и развития деформационных аномалий в момент генерации цунами по четырем цунамиопасным регионам: Индонезия, Чили, западное побережье Северной Америки, Япония.

2.1. Землетрясения в Индонезии

Первое рассматриваемое мощное землетрясение произошло 11.04.2012 г. в 08:38:36 на западном побережье северной Суматры (Индонезия) в точке с координатами $2,327^{\circ}$ N, $93,063^{\circ}$ E, на глубине 20 км с магнитудой 8,6. Максимально зарегистрированная высота волны цунами составила 1,08 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа более 5800 км. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован на записях лазерного деформографа почти через 18 мин в 08:55:39. Средняя скорость распространения упругой волны составила 5,66 км/с. На динамической

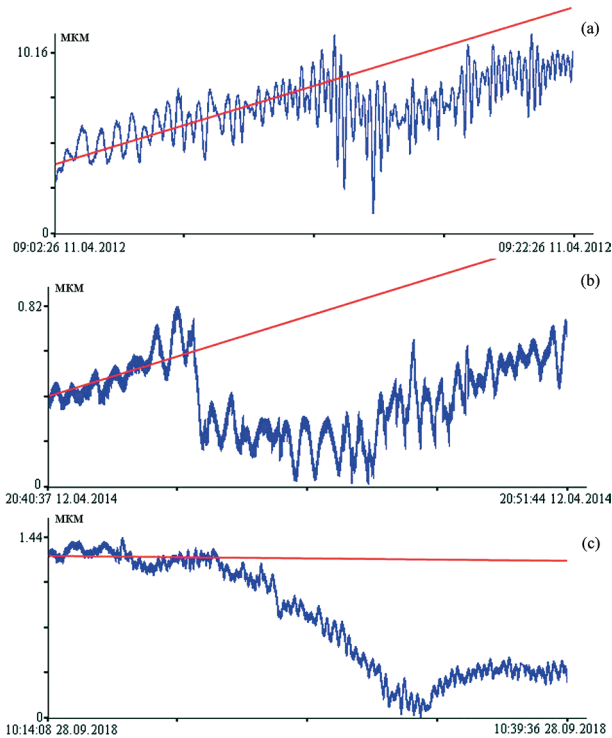


Рис. 3. Участки записей 52,5-метрового лазерного деформографа: *a* – апрель 2012 г., *b* – апрель 2014 г., *c* – сентябрь 2018 г.

спектрограмме выделяются колебания с периодами от 30 до 14 с, характерные для землетрясения.

Второе рассматриваемое землетрясение произошло 12.04.2014 г в 20:14:39 в точке с координатами 11,270°S, 162,148°E вблизи Соломоновых островов на глубине 22,6 км с магнитудой 7,6. В прибрежной зоне высота цунами достигла 0,5 м. Сигнал землетрясения на лазерном деформографе, установленном на расстоянии более 6700 км, был зарегистрирован почти через 20 мин в 20:33:58. Для этого землетрясения средняя скорость составила 5,58 км/с.

Следующее из рассмотренных землетрясений отмечено на о-ве Сулавеси 28.09.2018 г. в 10:02:45 с магнитудой 7,5 и с высотой волны цунами около 11 м. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 0,256°S, 119,846°E на глубине 20 км, на расстоянии более 4800 км от места установки лазерного деформографа. Расчетная средняя скорость поверхностной упругой волны равна 5,49 км/с.

На рис. 3 представлены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений в Индонезии. На всех графиках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. Красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент землетрясения запись отклонилась от своего естественного поведения (наблюдается деформационная аномалия – скачок деформации), что и свидетельствует о цунамигенности землетрясения.

2.2. Землетрясения в Чили

На записях 52,5-метрового лазерного деформографа было выделено три сильных землетрясения, произошедших вблизи побережья Чили в период с 2010 по 2018 г. Первое случилось 27.02.2010 г. в 06:34:11 на северо-западном побережье Чили в точке с координатами 36,122°S, 72,898°W на глубине 22,9 км, максимальная высота катастрофического цунами была 29 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа более 17800 км. На записи 52,5-метрового лазерного деформографа сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 07:19:00. Средняя скорость распространения упругой волны составила 6,77 км/с.

Следующие два сильных цунамигенных землетрясения состоялись в апреле 2014 г. и сентябре 2015 г. вблизи северо-западной части Чили. Сильное землетрясение произошло 01.04.2014 г. в 23:46:47 в точке с координатами 19,610°S, 70,769°W на глубине 25 км, высота волны цунами у берега достигла 4,6 м. Сигнал этого землетрясения был

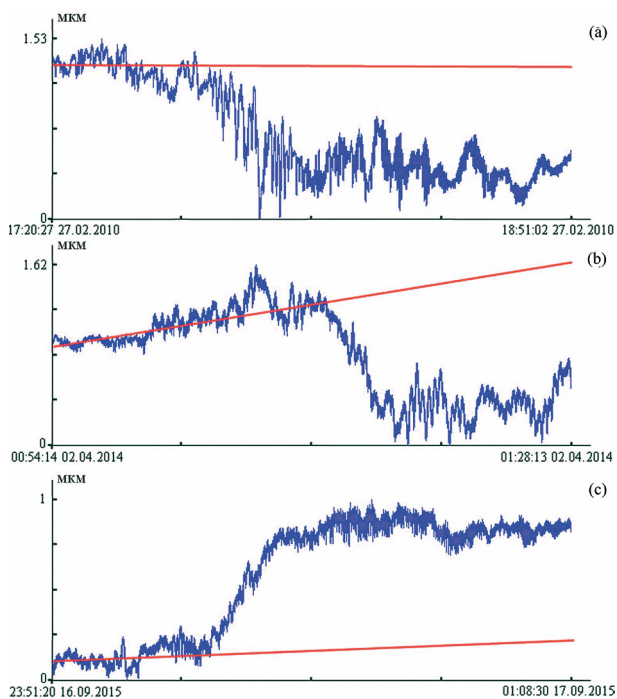


Рис. 4. Фрагменты записей 52,5-метрового лазерного деформографа: *a* – февраль 2010 г., *b* – апрель 2014 г., *c* – сентябрь 2015 г.

зарегистрирован лазерным деформографом, установленным на расстоянии более 16 700 км, 02.04.2014 г. в 00:24:10. 16.09.2015 г. в 22:54:32 произошло сильное землетрясение, эпицентр которого находился в точке с координатами 31,573°S, 71,674°W на глубине 22,4 км. В результате этого землетрясения образовалось цунами высотой 13,6 м. На записи лазерного деформографа, расположенного на расстоянии около 17 650 км, сигнал был зарегистрирован в 23:45:01. Для этих землетрясений средняя скорость распространения упругой волны составляет 7,44 и 6,47 км/с соответственно.

При анализе записей лазерного деформографа в момент регистрации трех вышеописанных землетрясений были выявлены деформационные скачки (рис. 4, *a–c*). Красной линией на графиках обозначено среднее направление записи, а отклонение от этой линии в момент регистрации сейсмических волн и свидетельствует о цунамигенности землетрясения (наличие деформационной аномалии – скачка деформации).

2.3. Землетрясения на западном побережье Северной Америки

Первое из рассматриваемых мощных землетрясений произошло 28.10.2012 г. в 03:04:08 на юго-западном побережье Канады в точке с координатами 52,788°N, 132,101°W на глубине 14 км с магнитудой 7,8 и высотой цунами на шельфе 12,98 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа около 6800 км. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован на записях лазерного деформографа почти через 19 мин в 03:23:13. Для этого землетрясения средняя скорость распространения упругой волны составляет 5,94 км/с.

Второе цунамигенное землетрясение отмечено 05.01.2013 г. в 08:58:14 у берегов Аляски, США. Землетрясение с магнитудой 7,5 произошло в точке с координатами 55,228°N, 134,859°W на глубине 8,7 км, в результате чего образовалось цунами

с максимальной высотой 1,5 м. Сигнал этого землетрясения на записях лазерного деформографа был выявлен 09:16:31. Лазерный деформограф расположен в 6500 км от эпицентра.

Еще одним из рассмотренных является землетрясение, произошедшее возле берегов Мексики 08.09.2017 г. в 04:49:19 с магнитудой 8,2. После него возникло цунами высотой 2,7 м. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 15,022°N, 93,899°W на глубине 47,4 км, на расстоянии 12 150 км от места установки лазерного деформографа. При расчете средней скорости распространения упругих волн для землетрясения 2013 г. она оказалась 5,92 км/с, а для землетрясения 2017 г. – 5,48 км/с.

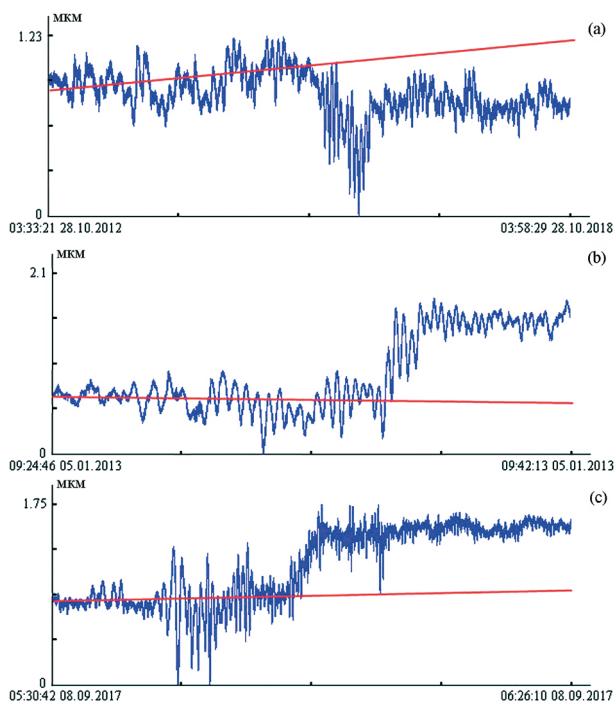


Рис. 5. Фрагменты записей 52,5-метрового лазерного деформографа: *a* – октябрь 2012 г., *b* – январь 2013 г., *c* – сентябрь 2017 г.

деформографа в момент регистрации трех землетрясений, происшедших на западном побережье Северной Америки. На всех графиках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений, красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент землетрясения запись отклонилась от своего естественного поведения, что и свидетельствует о цунамигенности землетрясения.

2.4. Японский регион

Первое из рассматриваемых землетрясений произошло в 16:25:06 (UTC) 15 апреля 2016 г. в 6 км от г. Кумамото в точке с координатами 32,791°N, 130,754°E. Магнитуда землетрясения составила 7, а его эпицентр располагался на глубине 10 км [8]. На рис. 6, а приведен фрагмент записи неравноплечего лазерного деформографа в момент регистрации цунамигенного землетрясения. Из графика видно, что через несколько секунд после начала землетрясения была зарегистрирована деформационная аномалия, отклонение от тренда. В данном случае деформационный скачок составил 8,4 мкм.

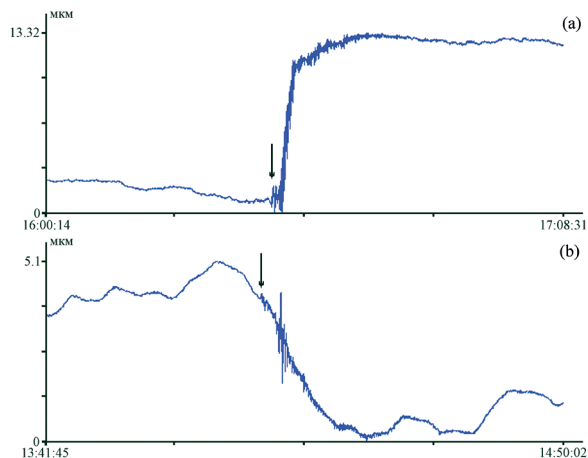


Рис. 6. Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа: *a* – 15 апреля 2016 г., *b* – 13 февраля 2021 г.

Следующее землетрясение, которое по деформационному методу можно отнести к цунамигенному, произошло в 14:07:49 (UTC) 13 февраля 2021 г. в 73 км от пос. Намие. В точке с координатами 37,727°N, 141,775°E. Магнитуда этого землетрясения составила 7,1, а глубина эпицентра 44 км (<https://www.volcanodiscovery.com/ru/zemletryaseniya/news.html>). Это землетрясение было зарегистрировано лазерным деформографом, фрагмент записи которого приведен на рис. 6, *b*. В этом случае зарегистрированная деформационная аномалия составила 4,1 мкм.

3. Анализ полученных результатов

Величину деформационной аномалии в месте регистрации будем брать из экспериментальных данных лазерного деформографа, а расчетную величину смещения морского дна – на сайте американской геофизической службы (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>), так как приборов, способных зарегистрировать это смещение на дне, нет. В расчете смещений дна используется кинематический подход, основанный на методе Ji [9]. В этом методе для расчета применяются как поверхностные волны Рэля и Лява, так и поверхностные волны Р и S.

Рассчитаем степень расходимости для каждого из рассматриваемых цунамигенных землетрясений, используя экспериментальные и модельные данные. Под степенью расходимости понимается степень α при расстоянии в формуле:

$$A = A_0 \frac{1(M)}{R^\alpha(M)},$$

где A – величина смещения, зарегистрированная лазерным деформографом; A_0 – величина расчетного смещения в эпицентре землетрясения; R – расстояние от места генерации землетрясения до лазерного деформографа; α – степень.

Полученные и модельные результаты приведены в таблице.

Расчетные смещения геоблоков (частей геоблоков и т.п.) и величины деформационных аномалий, зарегистрированных лазерным деформографом

Дата	Расчетное смещение, м	Смещение на деформографе, мкм	Расстояние, км	Степень расходимости
11.04.2012	5,4	2	5800	0,951
12.04.2014	0,8	0,4	6700	0,923
28.09.2018	1,8	1	4800	0,936
27.02.2010	10,5	1,11	17 800	0,962
01.04.2014	8	1	16 700	0,956
16.09.2015	3,2	0,6	17 650	0,928
28.10.2012	1,5	0,4	6800	0,962
05.01.2013	3	0,8	6500	0,965
08.09.2017	4	0,5	12 150	0,974
15.04.2016	4	8,4	1081	0,941
13.02.2021	1,9	4,1	893	0,952

С учетом всех аномалий усредненная расходимость равна 0,950. Максимальное отклонение от средней величины составляет 0,024, т.е. 2,5%. Для всех рассмотренных случаев расходимость близка к сферической, но не сферическая. Это связано с соотношением величины смещения и толщины земной коры, по которой распространяется сигнал от места генерации до места приема: амплитуда сигнала значительно меньше толщины земной коры на пути его распространения. Величины степени расходимости для всех случаев с учетом небольших ошибок практически совпадают. Это свидетельствует только об одном – очень хорошем совпадении модельных и экспериментальных значений смещений. То есть для всех рассмотренных экспериментальных случаев можно с большой уверенностью утверждать, что зарегистрированные аномальные сигналы связаны со смещениями участков земной коры, приведшими к образованию цунами. В дальнейшем по данным лазерных деформографов можно оценивать величины смещений в очаге образования цунами с учетом полученной степени расходимости и расстояния до места возникновения землетрясений.

Заключение

В процессе обработки экспериментальных данных лазерного деформографа установлено, что для всех цунамигенных землетрясений характерным является наличие в записях приборов деформационных аномалий – скачков деформаций. Эти аномалии, приводящие к образованию цунами в окрестности очаговой области землетрясений, возникают в процессе относительного движения геоблоков (плит, отдельностей) и подводных оползней. Такие движения могут быть описаны уравнением синус-Гордона, однокинковые и двухкинковые решения которых объясняют

появление наблюдаемых деформационных аномалий на записях лазерных деформографов. Поведение деформационных аномалий характерно для поведения солитонов в нелинейной среде. Учитывая то, что сигнал от цунамигенных землетрясений, содержащих деформационную аномалию, распространяется со скоростями, значительно превышающими скорости для поверхностных волн (от 5,48 до 7,44 км/с), можно предположить, что сигнал распространяется в основном не по поверхности Земли и по закону, находящемуся в пределах от цилиндрической до сферической расходимостей.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на экспериментальное изучение пространственного поведения деформационных аномалий цунамигенных землетрясений. Для этого необходимо расположить несколько лазерных деформографов далеко друг от друга по предполагаемому направлению движения деформационных аномалий – деформационных скачков – кинков – антикинков – бризеров. Данные экспериментальные исследования позволят изучить все основные параметры наблюдаемых возмущений. Особый интерес вызывает задача по изучению сохранения формы солитона при его уменьшающейся величине вследствие расходимости в пространстве при движении. Развитие данного направления исследований, наряду с применением классического «магнитудно-географического принципа» определения цунамиопасности подводных землетрясений, позволит приблизить нас к краткосрочному прогнозу цунами.

С учетом вышесказанного при сферической расходимости в соответствии с таблицей можно рассчитать условия применимости для расчетных смещений GPS-приемников, способных регистрировать смещение с точностью 1 мм. Так, при среднем смещении в 4,2 м GPS-приемник сможет зафиксировать смещение величиной 2 мм на расстоянии 2100 м при условии сферической расходимости. Понятно, что ни о каких перспективах применения GPS-приемников для регистрации смещений геоблоков (плит, отдельностей), приводящих к образованию цунами, говорить не приходится. Цилиндрическая расходимость сигнала не спасает ситуации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stein S., Okal E. A. Speed and size of the Sumatra earthquake // *Nature*. 2005. Vol. 434. N7033. P. 581–582.
2. Wei Y., Newman A. V., Hayes G. P., Titov V. V., Tang L. Tsunami forecast by joint inversion of real-time tsunami waveforms and seismic or GPS Data: Application to the Tohoku 2011 tsunami // *Pure Appl. Geophys.* 2014. Vol. 171. P. 3281–3305. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0777-z>.
3. Pacific Tsunami Warning Center/International Tsunami Information Center (PTWC/ITIC). User's guide for the Pacific Tsunami Warning Center enhanced products for the Pacific tsunami warning system. Revised Edition. Paris, France: UNESCO/IOC, 2014. Vol. 105. (IOC Technical Series).
4. Perez del Postigo Prieto N., Raby A., Whittaker C., Boulton S. J. Parametric Study of Tsunamis Generated by Earthquakes and Landslides // *J. Mar. Sci. Eng.* 2019. Vol. 7 (5). P. 154.
5. 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 // *Докл. АН.* 2007. Т. 412, № 1. С. 104–106.
6. 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 // *Докл. АН.* 2007. Т. 417, № 1. С. 109–112.
7. Долгих Г.И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // *Письма в ЖТФ.* 2011. Т. 37, вып. 5. С. 24–30.
8. Hashimoto M., Savage M., Nishimura T., Horikawa H., Tsutsumi H. 2016 Kumamoto earthquake sequence and its impact on earthquake science and hazard assessment // *Earth, Planets and Space.* 2017. Vol. 69. P. 98. DOI: 10.1186/s40623-017-0682-7.
9. Ji C., Wald D. J., Helmberger D. V. Source description of the 1999 Hector Mine, California earthquake. Part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2002. Vol. 92, N4. P. 1192–1207.

REFERENCES

1. Stein S., Okal E. A. Speed and size of the Sumatra earthquake. *Nature*. 2005;434(7033);581–582.
2. Wei Y., Newman A. V., Hayes G. P., Titov V. V., Tang L. Tsunami forecast by joint inversion of real-time tsunami waveforms and seismic or GPS Data: Application to the Tohoku 2011 tsunami. *Pure and Applied Geophysics*. 2014;171:3281–3305. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0777-z>.
3. Pacific Tsunami Warning Center/International Tsunami Information Center (PTWC/ITIC). User's guide for the Pacific Tsunami Warning Center enhanced products for the Pacific tsunami warning system. Revised Edition. Paris, France: UNESCO/IOC; 2014. Vol. 105. (IOC Technical Series).
4. Perez del Postigo Prieto N., Raby A., Whittaker C., Boulton S. J. Parametric Study of Tsunamis Generated by Earthquakes and Landslides. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019;7(5):154.
5. Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev, S. N., Koren I. A., Ovcharenko V. V., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V. Recording of deformation anomaly of a tsunamigenous earthquake using a laser strainmeter. *Doklady Earth Sciences*. 2007;412(1):74–76.
6. Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Ovcharenko V. V., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V. A deformation method for determining the tsunami potential of earthquakes. *Doklady Earth Sciences*. 2007;417(1):1261–1264.
7. Dolgikh G. I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters. *Technical Physics Letters*. 2011;37(3):204–206.
8. Hashimoto M., Savage M., Nishimura T., Horikawa H., Tsutsumi H. 2016 Kumamoto earthquake sequence and its impact on earthquake science and hazard assessment. *Earth, Planets and Space*. 2017;69:98. DOI: 10.1186/s40623-017-0682-7.
9. Ji C., Wald D. J., Helmberger D. V. Source description of the 1999 Hector Mine, California earthquake. Part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2002;92(4):1192–1207.