УДК 550.344.42

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ КАК ИНДИКАТОР ГЕНЕРАЦИИ ЦУНАМИ

© 2022 г. Академик РАН Г. И. Долгих^{1,*}, С. Г. Долгих¹

Поступило 16.09.2021 г. После доработки 10.10.2021 г. Принято к публикации 13.10.2021 г.

Установлены общие закономерности распространения деформационных аномалий трех сейсмоактивных зон Земли, связанных с подвижками морского дна, приводящих к возникновению цунами. Выявленные закономерности, главной из которых является общий закон расходимости, подтверждают факт связи данных деформационных аномалий с процессом генерации цунами.

Ключевые слова: деформационные аномалии, цунами, лазерный деформограф, база данных **DOI:** 10.31857/S2686739722020050

Проблема регистрации момента возникновения цунами актуальна была всегда, да и в настоящее время остается острой. В настоящее время основной индикатор момента возникновения цунами строится на "магнитудно-географическом" принципе, связанном с фиксацией момента возникновения подводного землетрясения определенной магнитуды, величина которой берется различной для разных регионов Земли [1]. В последние годы значительно развилось направление, связанное с одновременным использованием приемных систем DART (Deep-OceanAssessmentandReportingofTsunamis) и GPS-приемников [2]. Подход GPS учитывает динамический процесс землетрясения, подход инверсии DART обеспечивает фактическую оценку энергии цунами, распространяющихся волн цунами. Указанные направления по определению момента возникновения цунами ориентированы на регистрацию разных признаков возникновения цунами, отличающиеся друг от друга. Мы исследуем связь величин смещений участков дна, приводящих в движение огромные массы воды, вызывающих генерации цунами, со скачками деформации, зарегистрированные лазерным деформографом на планетарных расстояниях. По данному направлению исследований нами в работах [3, 4] приведены некоторые результаты, анализ которых позволяет приблизить нас к решению задачи по точному определению момента генерации цунами.

В данной статье обсуждаются полученные экспериментальные результаты с привязкой к модели о конечных разломах, созданной USGS NEIC с использованием кинематического подхода, основанного на методе Ji [5]. Для расчета применяются как объемные волны Р и S, так и поверхностные волны Рэлея и Лява. Для оценки смещений, зарегистрированных 52.5-м неравноплечим лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН "Мыс Шульца" [6], будем пользоваться рассчитанными смещениями в очаге землетрясений по этой модели. С целью изучения общих закономерностей возникновения и развития смещений дна, приводящих к цунами, нами были выбраны цунамигенные землетрясения, происшедшие в различных регионах Земли, которые зарегистрированы лазерным деформографом и по которым есть результаты модельных расчетов.

Впервые лазерным деформографом, эпизодически работающим с 2000 г., 26 декабря 2004 г. была зарегистрирована деформационная аномалия, пришедшая в точку регистрации одновременно с волнами, сгенерированными в очаговой области [3]. Эпицентр цунамигенного землетрясения находился в точке с координатами 3.30° с.ш., 95.87° в.д. на расстоянии около 160 км к западу от Суматры, на глубине 30 км от уровня моря. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа составило примерно 5600 км. На участке записи выделена мощная деформационная аномалия, возникшая через небольшое время от начала землетрясения, зарегистрированная лазерным деформографом с амплитудой около 59.3 мкм. Амплитуда данной аномалии значительно больше амплитуды суточ-

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия *E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru



Рис. 1. Участки записей 52.5-м лазерного деформографа за апрель 2012 г. (а), апрель 2014 г. (б) и сентябрь 2018 года (в).

ного прилива, наблюдаемого в месте регистрации. Сигнал цунамигенного землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом через 19 мин 54 с после начала землетрясения. Данный сигнал распространялся со скоростью около 4.74 км/с, которая значительно больше скоростей поверхностных волн.

Ниже рассмотрим некоторые особенности появления и развития деформационных аномалий в момент генерации цунами по трем цунамиопасным регионам: Индонезия, Чили, западное побережье Северной Америки. По каждому региону возьмем по три цунамигенных землетрясения, по которым имеются экспериментальные данные и модельные расчеты.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ИНДОНЕЗИИ

Первое из рассматриваемых землетрясений произошло 11.04.2012 г. в 08:38:36 на западном побережье северной Суматры (Индонезия) в точке с координатами 2.327° с.ш., 93.063° в.д. 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 около 5800 км. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован на записях лазерного деформографа в 08:55:39 при скорости распространения около 5.67 км/с.

Второе землетрясение произошло 12.04.2014 г. в 20:14:39 в точке с координатами 11.270° ю.ш., 162.148° в.д. вблизи Соломоновых островов на



Рис. 2. Фрагменты записей 52.5-м лазерного деформографа за февраль 2010 г. (а), апрель 2014 г. (б) и сентябрь 2015 года (в).

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 в 20:33:58 при скорости распространения около 5.58 км/с.

Третье землетрясение произошло 28.09.2018 г. в 10:02:45 в точке с координатами 0.256° ю.ш., 119.846° в.д. на глубине 20 км с магнитудой 7.5. В прибрежной зоне высота цунами достигла около 11 м. Сигнал землетрясения на лазерном деформографе, установленном на расстоянии более 4800 км, был зарегистрирован в 10:17:19 при скорости распространения около 5.49 км/с.

На рис. 1 представлены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений в Индонезии. На всех рисунках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. На данном рисунке красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент регистрации землетрясения запись отклонилась от тренда. Произошел скачок деформации (деформационная ступенька).

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЧИЛИ

Первое из рассматриваемых землетрясений произошло 27.02.2010 г. в 06:34:11 в точке с координатами 36.122° ю.ш., 72.898° з.д. на глубине 22.9 км с магнитудой 8.7. Максимальная высота катастрофического цунами была 29 м. Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа более 17800 км. На записи



Рис. 3. Фрагменты записей 52.5-м лазерного деформографа за октябрь 2012 г. (а), январь 2013 г. (b) и сентябрь 2017 г. (c).

52.5-м лазерного деформографа сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 07:19:00 при скорости распространения около 6.62 км/с.

Второе землетрясение произошло 01.04.2014 г. в 23:46:47 в точке с координатами 19.610° ю.ш., 70.769° з.д. на глубине 25 км с магнитудой 8. В прибрежной зоне высота цунами достигла около 4.6 м. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом, установленным на расстоянии более 16700 км, 02.04.2014 г. в 00:24:10 при скорости распространения 7.44 км/с.

Третье землетрясение произошло 16.09.2015 г. в 22:54:32 в точке с координатами 31.573° ю.ш., 71.674° з.д. на глубине 22.4 км с магнитудой 8.3. В прибрежной зоне высота цунами достигла около 13.6 м. На записи лазерного деформографа, расположенного на расстоянии около 17650 км, сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 23:39:01 при скорости распространения около 6.47 км/с.

На рис. 2 представлены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений в Чили. На всех рисунках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. На данном рисунке красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент регистрации землетрясения запись отклонилась от тренда.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ

Первое из рассматриваемых землетрясений произошло 28.10.2012 г. в 03:04:08 на юго-запад-

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	17800	0.962
01.04.2014	8	1	16700	0.956
16.09.2015	3.2	0.6	17650	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	12150	0.974

Таблица 1. Расчетные смещения геоблоков (частей геоблоков и т.п.) и величины деформационных аномалий, зарегистрированные лазерным деформографом

ном побережье Канады в точке с координатами 52.788° с.ш., 132.101° з.д. 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 лазерным деформографом в 03:23:13 при скорости распространения 5.94 км/с.

Второе землетрясение произошло 05.01.2013 г. в 08:58:14 в точке с координатами 55.228° с.ш., 134.859° з.д. на глубине 8.7 км с магнитудой 7.5. В прибрежной зоне высота цунами достигла около 1.5 м. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом, установленным на расстоянии более 6500 км в 09:16:31 при скорости распространения 5.92 км/с.

Третье землетрясение произошло 08.09.2017 г. в 04:49:19 в точке с координатами 15.022° с.ш., 93.899° з.д. на глубине 47.4 км с магнитудой 8.2. В прибрежной зоне высота цунами достигла около 2.7 м. На записи лазерного деформографа, расположенного на расстоянии около 12150 км, сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 05:34:28 при скорости распространения около 4.48 км/с.

На рис. 3 представлены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации трех землетрясений на западном побережье Северной Америки. На всех рисунках присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. На данном рисунке красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент регистрации землетрясения запись отклонилась от тренда. Во всех случаях при регистрации деформационного скачка через некоторое время после землетрясения происходит возврат записи к тренду, наблюдаемому до скачка, но с вкладом других естественных деформационных процессов.

Землетрясение провоцирует разномасштабные смещения участков дна. Именно это движение, наряду с оползнями, становится причиной возникновения цунами. Непосредственно в очаге это смещение зарегистрировать невозможно. Его можно определить только дистанционно. Но на большом расстоянии амплитуды этих смещений очень малы. Приборов, использующихся в службах предупреждения цунами, способных зарегистрировать это смещение нет. В связи с чем для оценки смешений применяются различные модели. Преимущество имеют модели о конечных разломах, созданные USGS NEIC [5]. Для оценки диссипативных характеристик деформационных аномалий, зарегистрированных 52.5-м неравноплечим лазерным деформографом, воспользуемся рассчитанными смещениями по этой модели. В табл. 1 приведены расчетные смещения в очаге [7] и величины деформационных аномалий, зарегистрированные лазерным деформографом в момент регистрации землетрясений.

С учетом всех аномалий усредненная расходимость равна 0.951. Максимальное отклонение от средней величины составляет 0.028, т.е. 2.9%. 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. Величины степени расходимости для всех случаев с учетом небольших ошибок практически совпадают. Это свидетельствует об очень хорошем совпадении модельных и экспериментальных значений смешений. То есть для всех рассмотренных экспериментальных случаев можно с большой уверенностью утверждать, что зарегистрированные аномальные сигналы связаны со смещениями участков земной коры, приведших 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. Под степенью расходимости понимается степень при рас-

стоянии в формуле: $A = A_0 \frac{1 (M)}{R^{\alpha} (M)}$. Где: A – вели-

чина смещения, зарегистрированная лазерным деформографом, R – расстояния от места генерации землетрясения до лазерного деформографа, α – степень.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Министерства науки и высшего образования (тема госзадания "Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gusiakov V.K.* Relationship of Tsunami Intensity to Source Earthquake Magnitude as Retrieved from His-

torical Data // Pure Appl. Geophys. 2011. 16820332041.

- Titov V.V., Song Y.T., Tang L., Bernard E.N., Bar-Sever Y., Wei Y. Consistent Estimates of Tsunami Energy Show Promise for Improved Early Warning // Pure and Applied Geophysics. 2016. 173 (12). P. 3863–3880.
- 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.
- 4. 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.
- 5. 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. V. 92. № 4. P. 1192–1207.
- 6. Давыдов А.В., Долгих Г.И. Регистрация сверхнизкочастотных колебаний 52.5-м лазерным деформографом // Физика Земли. 1995. № 3. С. 64–67.
- 7. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

DEFORMATION ANOMALIES AS AN INDICATOR OF TSUNAMI GENERATION

Academician of the RAS G. I. Dolgikh^{*a*,#} and S. G. Dolgikh^{*a*}

^aIl'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation [#]E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru</sup>

The general regularities of the propagation of deformation anomalies in three seismically active zones of the Earth associated with the movements of the seabed, leading to the occurrence of a tsunami, are established. The revealed regularities, the main one of which is the general law of divergence, confirms the indisputable fact of the connection of these deformation anomalies with the process of tsunami generation.

Keywords: deformation anomalies, tsunami, laser strainmeter, database