

УДК 550.348.436

ТИХООКЕАНСКИЕ ЦУНАМИГЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НАЧАЛА 2024 ГОДА

© 2024 г. Г. И. Долгих*, С. Г. Долгих**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,
ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041 Россия*

**e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru*

***e-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 07.05.2024 г.

После доработки 20.06.2024 г.

Принята к публикации 21.08.2024 г.

На примере двух цунамигенных землетрясений отрабатывается методика определения величины смещения морского дна, являющегося причиной возникновения цунами. Показано, что при усредненном коэффициенте расходимости зарегистрированных лазерным деформографом деформационных аномалий для всей планеты можно примерно оценить величину смещения морского дна в месте образования цунами. Для каждого региона, где произошло зарождение цунами, существуют более точные коэффициенты расходимости, которые можно оценить экспериментально и по которым можно более точно определить величины смещений морского дна.

Ключевые слова: землетрясение, деформационная аномалия, коэффициент расходимости, цунами

DOI: 10.31857/S0203030624060011, **EDN:** HZOOPV

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых катастрофических явлений Земли является цунами, которое приносит значительные беды человечеству. В качестве характерного примера можно привести цунами, которое возникло 26 декабря 2004 г. в Индийском океане в результате мощного землетрясения с максимальным значением магнитуды около 9.3 [Stein, Okal, 2005] и унесло жизни около 300 000 человек. От действия цунами страдают различные регионы планеты, но в наибольшей степени это касается Японии, Тайваня, Тихоокеанского побережья России, хотя задача обнаружения момента возникновения цунами кажется вполне решаемой. Японские острова и прилегаемые 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) [Wei et al., 2014]. Магнитуда землетрясения, превышающая установленное пороговое значение, которое различается 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 сейсмологическом принципе.

В последние годы получил развитие “деформационный метод определения момента возникновения и мощности цунами” по величине смещения морского дна в месте генерации цунами, удаленно регистрируемого лазерными деформографами [Dolgikh, Dolgikh, 2021, 2023].

Деформационный метод определения цунамигенности подводных землетрясений был апробирован на катастрофических цунами, произошедших после сильных землетрясений за последние двадцать лет. Присутствие деформационного скачка в момент землетрясения свидетельствует о смещении дна, характерном при возникновении цунами. Для всех рассмотренных землетрясений были рассчитаны коэффициенты затухания данных смещений. С помощью рассчитанных коэффициентов по данным лазерного деформографа можно не только определить относится землетрясение к цунамигенным или нет, но и вычислить величину смещения в очаге землетрясения. Учитывая то, что скорость распространения этих деформационных аномалий значительно больше скорости распространения цунами в океане/море, деформационный метод можно отнести к одним из самых перспективных методов по определению степени цунамиопасности конкретных землетрясений.

В работе [Долгих, Долгих, 2022] для каждого цунамигенного землетрясения, описанных в статье [Dolgikh, Dolgikh, 2021], по формуле

$$A = A_0 \frac{l(m)}{R^\alpha(m)},$$

где: A — смещение, зарегистрированное лазерным деформографом, A_0 — смещение в эпицент-

ре землетрясения, R — расстояние от места установки лазерного деформографа до эпицентра землетрясения, α — степень расходимости) была определена степень расходимости. В среднем она получилась равной 0.951. В работе [Dolgikh, Dolgikh, 2023] для двух землетрясений коэффициент степени расходимости получился равным 0.941 и 0.952. С учетом всех землетрясений, описанных в работах [Dolgikh, Dolgikh, 2021, 2023], средняя степень расходимости будет равна 0.950.

В данной статье рассмотрим материал, полученный при регистрации цунамигенных землетрясений в Японском море и вблизи Тайваня, по которым рассчитаем величины смещений морского дна для каждого землетрясения и уточним величины коэффициентов степени расходимости.

ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ

На мысе Шульца Японского моря на глубине 5 м от поверхности земли установлен лазерный деформограф неравноплечего типа с длинами измерительных плеч 52.5 м, который ориентирован под углом 18° относительно линии “север–юг”. На рис. 1 приведена фотография центрального интерференционного узла 52.5-метрового лазерного деформографа и подземного трубопровода диаметром 1.5 м с вакуумированной трубой из нержавеющей стали, в которой



Рис. 1. Горизонтальный лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 52.5 м.

а — центральный интерференционный узел лазерного деформографа; б — подземный трубопровод с вакуумированной трубой.

распространяется луч гелий-неонового лазера между интерференционным узлом и уголкового отражателем. Центральный интерференционный узел расположен на бетонном устое высотой около 3.5 м, который закреплен на твердых породах. Уголкового отражатель расположен на устое высотой около 1 м, который прочно соединён с гранитной скалой. Все элементы интерферометра находятся под землей на глубине 5 м в хороших гидротермоизолированных помещениях. Помещение, в котором находится центральный интерференционный узел, построено по принципу термостата с возможностью удалённого кондиционирования внешнего термостатного помещения, которое не контактирует с оптикой центрального интерференционного узла. Оптическая схема лазерного деформографа построена по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной рабочего (измерительного) плеча 52.5 м, что позволяет проводить измерение смещения на базе измерительного плеча лазерного деформографа с точностью 0.01 нм. Линейный рабочий диапазон частот данного деформографа простирается условно от 0 до 100 Гц, а на более высоких частотах амплитудно-частотная характеристика прибора изменяется по косинусоидальному закону [Dolgikh, 2011]. Учитывая длину измерительного плеча лазерного деформографа, можно утверждать, что его чувствительность равна $\Delta l/l = 0.01 \text{ нм}/52.5 \text{ м} \approx 0.2 \times 10^{-12}$.

ЯПОНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

В первый день 2024 г. произошло сильное землетрясение в одном из регионов Японии с повышенной сейсмичностью на северо-восточной оконечности полуострова Ното. В этом регионе в период с мая 2018 по декабрь 2023 г. произошло более 20 000 землетрясений. Причем более 60 с магнитудой свыше 4. При этом зона сейсмической активности расширилась в декабре 2020 года и еще больше в июле 2021 г. [Hirose et al., 2024]. Самое мощное землетрясение произошло в этом регионе 1 января 2024 г. в 07:10:09 UTC с магнитудой 7.6. Это было самое сильное землетрясение на западном побережье Японии более чем за столетие. После него Японским метеорологическим агентством (JMA) было зафиксировано более 140 небольших землетрясений, магнитуда одного из которых

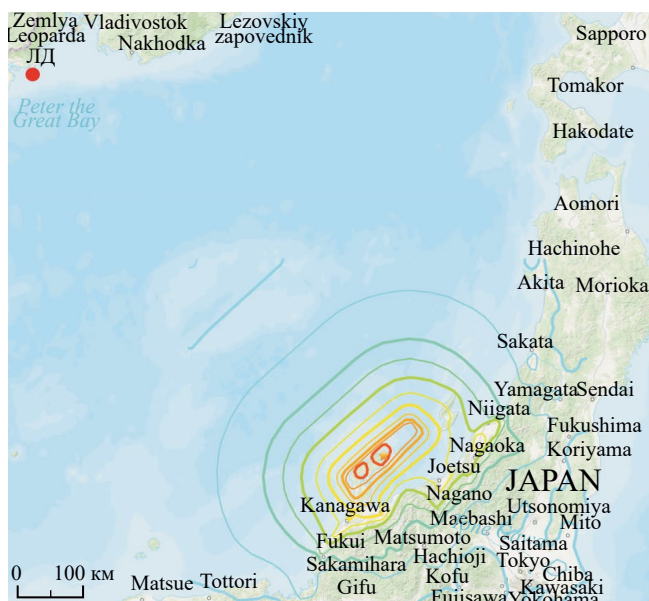


Рис. 2. Землетрясение в Японском море 01.01.2024 г.

составила 6.2. После землетрясения 1 января 2024 г. была объявлена тревога цунами. Океанические волны вдоль западного побережья Японии в некоторых районах достигали 1.2 м [Gemma..., 2024]. На Дальнем Востоке России также было объявлено предупреждение о цунами, высота которой у берегов Приморского края составила около 0.3 м. Краткосрочное прогнозирование цунами основано на сейсмологической информации (местоположении эпицентра и магнитуде землетрясения) [Wei et al., 2014]. Для различных цунамигенных зон установлено пороговое значение магнитуд, превышение которого приводит к выдаче предупреждения о цунами.

В 07:12:05 UTC 01 января 2024 г. на записях лазерного деформографа были зафиксированы первые колебания от землетрясения. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 37.487°N, 137.271°E на глубине 10 км (рис. 2). Расстояние от эпицентра землетрясения до места установки приборов составило около 770 км. Землетрясение проявилось и на записях широкополосного сейсмометра, установленного недалеко от лазерного деформографа. До обоих приборов сигнал дошел менее чем за 2 мин.

На рис. 3 приведены фрагменты записей лазерного деформографа и широкополосного сейсмометра. На рис. 3а представлен фрагмент записи лазерного деформографа длительностью

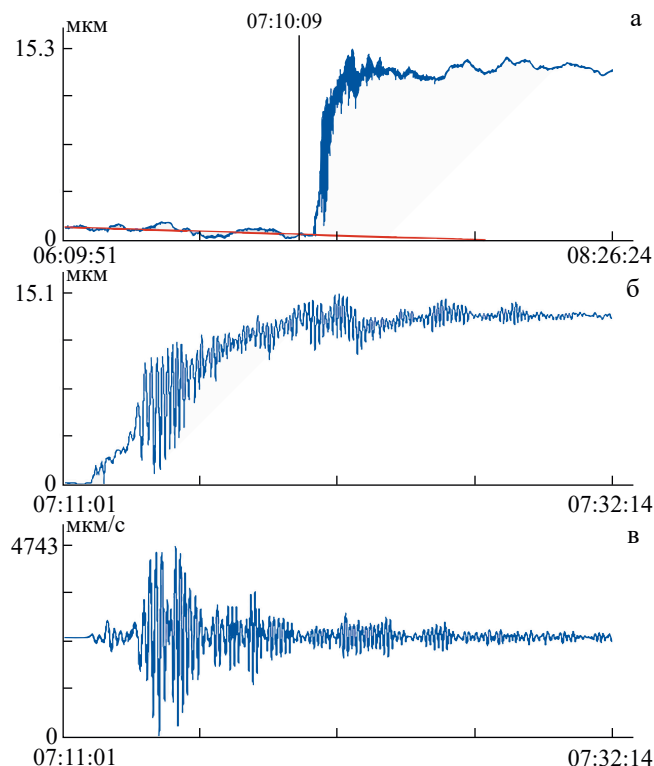


Рис. 3. Землетрясение в Японском море 01 января 2024 г. на записи лазерного деформографа и широкополосного сейсмометра (время UTC).

а – фрагмент записи лазерного деформографа длительно-стью 137 мин, б – увеличенный фрагмент записи регистрации землетрясения лазерным деформографом, в – фрагмент записи широкополосного сейсмометра.

137 мин, а на рис. 3б представлен увеличенный фрагмент записи лазерно-интерференционного прибора в момент регистрации землетрясения, а на рис. 3в фрагмент записи широкополосного сейсмометра за тот же промежуток времени. Вертикальная линия на рис. 3а соответствует времени начала землетрясения. При анализе записи лазерного деформографа была выявлена деформационная аномалия, характерная для цунамигенных землетрясений (см. рис. 3а). Причем на записи широкополосного сейсмометра данная деформационная аномалия отсутствует. Величина этой аномалии составила 13.5 мкм.

Смещение морского дна в месте возникновения цунами было рассчитано по формуле, приведенной выше. Учитывая то, что расстояние от места установки лазерного деформографа до эпицентра землетрясения составляет около 770 км, величина смещения на записи

горизонтального лазерного деформографа составляет 13.5 мкм, а среднее значение степени расходимости по расчетам равно 0.950, получаем, что максимальная величина смещения в эпицентре землетрясения составляет 5.3 м. На сайте американской геофизической службы (USGS) максимальное расчетное модельное смещение в очаге составляет 6 м [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>]. Разница между расчетным значением, полученным по данным лазерного деформографа и модельным смещением, обусловлена тем, что мы используем среднее значение степени расходимости, значение которого по проведенным ранее исследованиям колебалось в пределах от 0.923 до 0.974 [Долгих, Долгих, 2022], а для японских островов от 0.941 до 0.952 [Dolgikh, Dolgikh, 2023]. Среднее значение степени расходимости может быть откорректировано для каждого региона при анализе большего количества цунамигенных землетрясений, зарегистрированных лазерным деформографом. Для того, чтобы по нашим расчетам смещение земной коры в очаге совпадало с модельным расчетом, коэффициент степени расходимости должен быть равен 0.959.

Деформационная аномалия дошла до места расположения лазерного деформографа менее чем за 2 мин, а небольшая волна цунами подошла к Приморскому краю России значительно позже. Учитывая то, что она была небольшой, то практически никакой опасности для людей она не представляла. Но тем не менее мы можем констатировать, что при прогнозе цунами по данным лазерного деформографа можем добиться большего успеха при проведении противоцунамиопасных мероприятий.

ТАЙВАНЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ

02 апреля 2024 г. в 23:58:11 (UTC) на Тайване произошло мощное землетрясение, крупнейшее за последние 25 лет. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 23.819°N, 121.562°E на глубине 34.8 км (рис. 4). Магнитуда этого землетрясения составила 7.4. Сам эпицентр землетрясения располагался на суше, но угроза цунами с максимальной высотой 3 м была объявлена в Японии. После этого землетрясения было зарегистрировано более 40 афтершоков с магнитудой около 5. Самый мощный

из них произошел уже через 12 мин в 00:11:25 03 апреля 2024 г. Его эпицентр находился бухте вблизи города Xincheng Township в 6 км от берега в точке с координатами 24.064°N, 121.672°E, на глубине 12.6 км. После этого землетрясения по данным сайта Американской Геофизической службы не была объявлена тревога цунами.

На юге Приморского края России на МЭС ТОИ ДВО РАН “мыс Шульца” было зарегистрировано землетрясение, произошедшее на Тайване. Расстояние от эпицентра первого землетрясения до места установки лазерного деформографа составило около 2 264 км. Время прихода сигнала землетрясения на записи лазерно-интерференционного прибора составило 00:08:14 03.04.2024 г., т.е. лазерный деформограф записал данное землетрясение примерно через 10 мин после его начала. На рис. 5а представлен фрагмент записи лазерного деформографа длительностью 70 мин, на рис. 5б – увеличенный фрагмент записи землетрясения, и на рис. 5в –

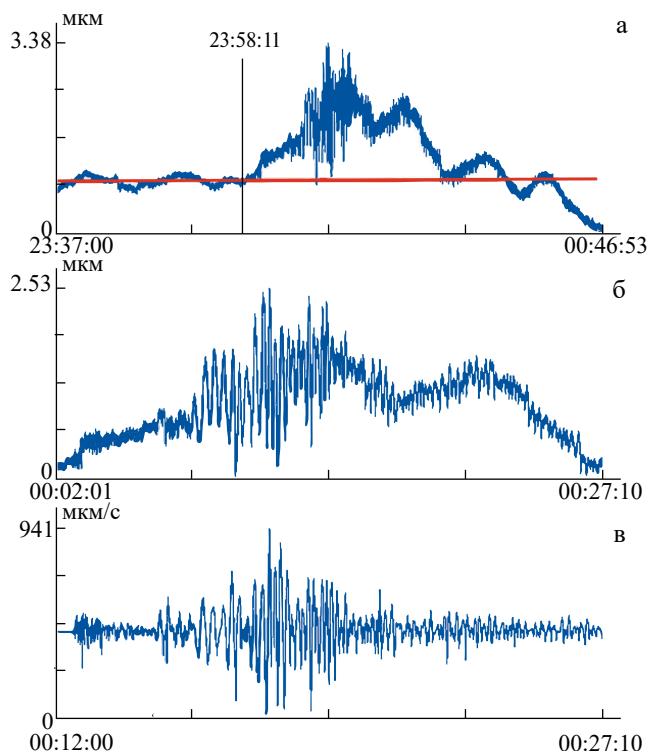


Рис. 5. Тайваньское землетрясение на записи лазерного деформографа (время UTC). а – фрагмент записи лазерного деформографа длительностью 70 мин, б – увеличенный фрагмент записи регистрации землетрясения, в – фрагмент записи широкополосного сейсмометра.

фрагмент записи широкополосного сейсмометра за тот же промежуток времени. Вертикальная линия на рис. 5а соответствует времени начала землетрясения. Красной линией на рис. 5а обозначена линия тренда, которая указывает как должна идти запись без регистрации землетрясения. Из поведения записи видно, что она отклонилась от тренда за несколько минут до регистрации землетрясения. И в момент прихода колебаний верхнего слоя земной коры, вызванных землетрясением, запись продолжала смещаться вверх.

Далее по вышеописанному выражению рассчитаем величину смещения морского дна в очаге цунами, которое при среднем коэффициенте степени расходимости, равном 0.951, равно 1.32 м. Что хорошо согласуется со значениями, приведенными на сайте американской геофизической службы <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>.



Рис. 4. Землетрясение на Тайване 02.04.2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционно по данным 52.5-метрового лазерного деформографа, установленного в Приморском крае России, было определено смещение морского дна величиной 1.32 м, возникшее в очаге землетрясения, происшедшего 2 апреля 2024 г. на Тайване, а также было определено смещение морского дна величиной 5.3 м, возникшее при Японском землетрясении. С использованием этих величин можно при дальнейших модельных расчетах определить высоты волн возможных цунами, возникших в результате смещений морского дна.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР № 124022100074-9 “Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Долгих Г.И., Долгих С.Г.* Деформационные аномалии как индикатор генерации цунами // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 77–82.
- Dolgikh G.I.* Principles of the designing single-coordinate laser strainmeters // Technical Physics Lett. 2011. V. 37(3). P. 204–206.
- Dolgikh G., Dolgikh S.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // J. Mar. Sci. Eng. 2021. V. 9. 1144.
- Dolgikh G., Dolgikh S.* Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origins near the Japanese Islands // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11(11). 2137.
- Gemma Conroy Japan earthquakes: the science behind the deadly tremors // Nature. 2024. Jan 3.
- Hirose F., Tamaribuchi K., Kobayashi A. et al.* Relation between earthquake swarm activity and tides in the Noto region, Japan // Earth Planets Space. 2024. V. 76. 37. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>
- Stein S., Okal E.A.* Speed and size of the Sumatra earthquake // Nature. 2005. V. 434. № 7033. P. 581–582.
- 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. V. 171. P. 3281–3305.

Pacific Tsunamigenic Earthquakes of Early 2024

G. I. Dolgikh*, S. G. Dolgikh**

*Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS,
Baltiyskaya str., 43, Vladivostok, 690041 Russia*

**e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru*

***e-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru*

Using the example of two tsunamigenic earthquakes, a method for determining the magnitude of the displacement of the seabed, which is the cause of the tsunami, is being worked out. It is shown that with an average coefficient of divergence of deformation anomalies recorded by a laser strainmeter for the entire planet, it is possible to approximately estimate the amount of displacement of the seabed at the site of tsunami formation. For each region where the tsunami originated, there are more accurate divergence coefficients that can be estimated experimentally and from which the values of seabed displacements can be more accurately determined.

Keywords: earthquake, deformation anomaly, coefficient of divergence, tsunami