

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ  
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE:  
FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 550.344.42

DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.8

ПРИМЕНЕНИЕ  
ДЕФОРМАЦИОННОГО МЕТОДА  
ПРИ АНАЛИЗЕ  
ЦУНАМИГЕННЫХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С.Г. Долгих

*Тихоокеанский океанологический институт  
имени В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток,  
Россия*

sdolgikh@poi.dvo.ru

APPLICATION OF THE  
DEFORMATION METHOD IN THE  
ANALYSIS OF TSUNAMIGENIC  
EARTHQUAKES

Stanislav G. Dolgikh

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute  
FEB RAS, Vladivostok, Russia*

sdolgikh@poi.dvo.ru

**Аннотация.** Деформационный метод определения степени цунамигенности землетрясений по данным неравноплечевого лазерного деформографа применялся при анализе цунами в период с 2010 по 2018 год. Сущность данного метода заключается в выявлении деформационной аномалии (скачка деформации), характерной для цунамигенного землетрясения. Присутствие деформационного скачка в момент или после землетрясения свидетельствует о смещении дна, характерном при возникновении цунами. При анализе многочисленных данных по вариациям микродеформаций земной коры, полученных с помощью неравноплечевого лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 метра и ориентацией «север-юг», были выявлены деформационные аномалии, возникающие при генерации цунами. Выделены цунамигенные землетрясения, произошедшие в трех районах – Индонезия, Чили и западное побережье Северной Америки. Для каждого района выбраны по три землетрясения, произошедшие в разные годы. Скачки деформации, выявленные при анализе данных лазерного деформографа, возникают в процессе относительного движения геоблоков (плит,

**Abstract.** The deformation method for determining the degree of tsunamigenic of earthquakes according to the data of a non-uniform laser strainmeter was used in the analysis of tsunamis in the period from 2010 to 2018. The essence of this method is to identify the deformation anomaly (deformation jump) characteristic of a tsunamigenic earthquake. The presence of a deformation jump at the moment or after an earthquake indicates a displacement of the bottom, characteristic of the occurrence of a tsunami. When analyzing numerous data on variations of micro-deformations of the Earth's crust obtained using an unequal-beam laser strainmeter with a measuring arm length of 52,5 meters and a north-south orientation, deformation anomalies that occur during tsunami generation were revealed. Tsunamigenic earthquakes that occurred in three areas were identified - Indonesia, Chile and the west coast of North America. As a result of the assessment of deformation anomalies, general patterns of their propagation in three seismically active zones have been established. The main regularity revealed as a result of processing is the general law of divergence, confirming the fact of the connection of these deformation anomalies with the process of tsunami generation. The obtained divergence coefficients allow not only to determine the degree of earthquake

отдельностей) и подводных оползней. В результате оценки деформационных аномалий установлены общие закономерности их распространения в трех сейсмоактивных зонах. Основной закономерностью, выявленной в результате обработки, является общий закон расходимости, подтверждающий факт связи данных деформационных аномалий с процессом генерации цунами. Полученные коэффициенты расходимости позволяют по выявленной деформационной аномалии на данных лазерного деформографа не только определить степень цунамигенности землетрясения, но и вычислить величину смещения в очаге землетрясения. Так как скорость распространения данной деформационной аномалии на  $V$  много больше скорости распространения цунами, то данный метод относится к одному из перспективных дистанционных методов по определению степени цунамигенности землетрясений. Деформационный метод определения степени цунамигенности подводных землетрясений является хорошим дополнением к уже существующим методам регистрации цунами ближней зоны действия.

**Ключевые слова:** цунами; деформационная аномалия; лазерный деформограф; коэффициент расходимости; землетрясение; упругая волна.

### Введение

Метод краткосрочного прогноза цунами, основанный только на сейсмической информации (магнитуде землетрясения, времени главного толчка и местоположении эпицентра), в последние годы дополнился различными системами раннего предупреждения цунами. В первую очередь к ним относятся системы Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (далее – DART), которые получили широкое распространение после мощного цунами в Индонезии в 2004 году [Percival et al., 2011]. Известны системы раннего предупреждения о цунами, разработанные в рамках германо-индонезийской программы (GITEWS) [Boebel et al., 2010]. Еще одна система раннего предупреждения цунами – береговая глобальная навигационная спутниковая система

tsunamigenic, but also to calculate the magnitude of displacement in the earthquake focus, based on the revealed deformation anomaly on the laser strainmeter data. The deformation method for determining the degree of tsunamigenic of underwater earthquakes is a good addition to the already existing methods for registering near-range tsunamis.

**Keywords:** tsunami; deformation anomaly; laser strainmeter; divergence coefficient; earthquake; elastic wave.

(далее – GNSS) [Tsushima et al., 2014]. После внедрения данной системы получила свое развитие рефлектометрия глобальной навигационной спутниковой системы (далее – GNSS-R), которая использует инновационный способ отраженных сигналов GNSS для дистанционного зондирования. Она позволяет измерять высоту поверхности моря с большой точностью, используя специальные спутники на низкой околоземной орбите, оснащенные GNSS-R [Stosius et al., 2010]. Большинство действующих систем раннего предупреждения цунами основаны на сейсмических данных. Так, Тихоокеанский центр предупреждения цунами (PTWC) использует сейсмические данные совместно с данными о длиннопериодных волнах (далее – W-фаза) для глобального предупреждения цунами Тихоокеанского

региона<sup>1</sup>. Еще одним центром предупреждения цунами является Японское метеорологическое агентство (JMA), которое предоставляет локальное предупреждение о цунами в течение 3 минут после землетрясений ближнего поля при анализе сейсмических данных [Tatehata, 1997], а затем обновляет предупреждение с использованием данных о форме сейсмических волн и данных цунами [Kamigaichi, 2015]. W-фаза появляется в записях сейсмических приборов между P-волнами и S-волнами и может использоваться для оценки сейсмического момента, местоположения эпицентра и механизма разлома. Эффективность инверсии W-фазы уже была продемонстрирована во многих работах и активно используется центрами предупреждения цунами [Kanamori, Rivera, 2008; Duputel et al., 2011]. Системы, основанные на сейсмических данных, начинают работать в активном режиме после превышения магнитуды землетрясения установленного порогового значения, которое различается для разных цунамигенных районов. Этот подход основан на «магнитудно-географическом принципе», он прост и довольно эффективен. Но даже при таком разнообразии методов и подходов от цунами страдает большое количество людей. Так, цунами 2018 года в Индонезии привело к крупным разрушениям и человеческим жертвам. Эпицентр землетрясения в Индонезии находился на суше и его толчки привели к отключению электроэнергии, тем самым выведя из строя системы раннего предупреждения цунами. Через несколько минут после землетрясения в заливе, находящимся в районе города Палу, произошел подводный оползень, который и привел к цунами [Зайцев и др., 2019]. Другие системы раннего предупреждения цунами в данном случае никакой угрозы цунами не зафиксировали.

Еще одним из методов, основанном на сейсмической информации, является деформационный метод, основанный на дистанционном определении характера и величины смещения дна, возникшего в результате

землетрясения [Долгих и др., 2007]. Сущность данного метода заключается в выявлении деформационной аномалии, которая регистрируется неравноплечим лазерным деформографом, установленным на морской экспериментальной станции «м. Шульца» Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук [Долгих и др., 2002]. Деформационные аномалии (деформационные скачки) возникают при различных геодинамических процессах, в большинстве случаев связанных с землетрясениями. Эти скачки деформации находятся в крайне левом частотном диапазоне, который находится за пределами рабочего диапазона широкополосных сейсмографов. Учитывая, что скорость распространения деформационной аномалии в упругой среде значительно выше скорости распространения цунами, деформационный метод является наиболее перспективным при регистрации цунамигенных землетрясений [Долгих, Долгих, 2020]. Для проверки данного метода рассмотрим цунамигенные землетрясения, произошедшие в период с 2010 по 2018 год в трех цунамиопасных районах: Индонезия, Чили, западное побережье Северной Америки. Для каждого из этих районов выберем по три землетрясения с магнитудой 7,5 и более и глубиной не более 50 км, после которых было зарегистрировано цунами, по которым имеются модельные расчеты и экспериментальные данные лазерных деформографов.

### **Обработка и анализ записей лазерного деформографа**

На записях горизонтального неравноплечевого лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 метра и ориентацией «север-юг» было выявлено несколько цунамигенных землетрясений. Вид записи цунамигенного землетрясения отличается от записей не цунамигенных землетрясений и

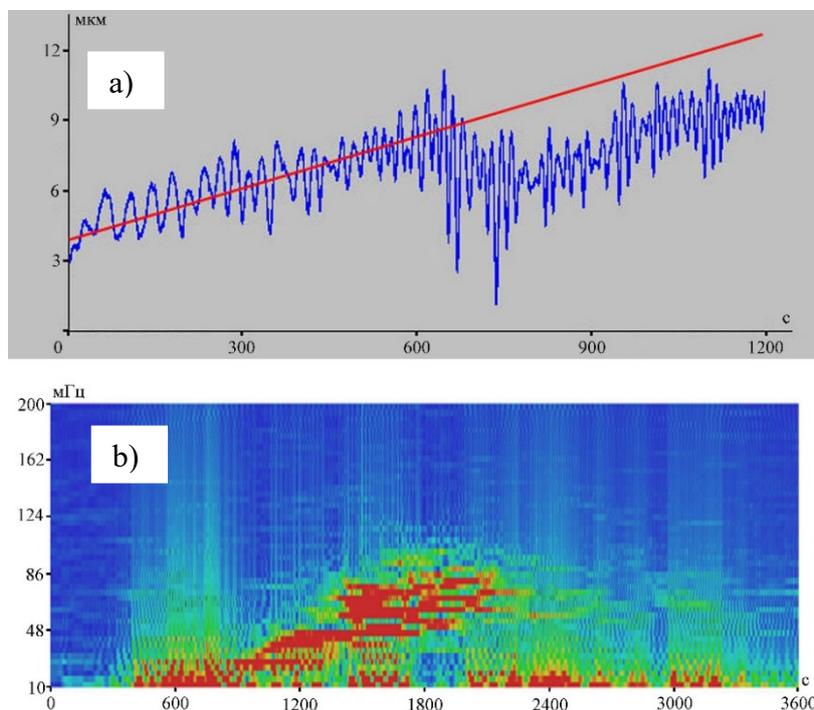
<sup>1</sup>User's guide for the Pacific Tsunami Warning Center enhanced products for the Pacific tsunami warning system. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series No 105, Revised Edition. UNESCO/IOC, Paris, 2014. URL: [http://itic.ioc-unesco.org/images/stories/about\\_warnings/what\\_are\\_they/ts105-Rev2\\_eo\\_220368E.pdf](http://itic.ioc-unesco.org/images/stories/about_warnings/what_are_they/ts105-Rev2_eo_220368E.pdf).

искусственных сигналов импульсного характера. Так же отличается и динамическая спектрограмма этих записей.

При изучении записей лазерного деформографа за апрель 2012 года было выявлено цунамигенное землетрясение с магнитудой 8,6 на западном побережье Северной Суматры, которое произошло в 08:38:36 GMT 11.04.2012 (рисунок 1). Эпицентр землетрясения находился на глубине 20 км в точке с координатами 2,327°N 93,063°E. В результате на берег пришла волна с максимальной высотой 1,08 м. На записях лазерного деформографа сигнал этого землетрясения был зарегистрирован через 17 минут в 08:55:39 GMT. Учитывая, что расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа около 5 800 км, то средняя скорость распространения упругой волны составил примерно 5,67 км/с. На рисунке 1а красным обозначена средняя линия направления записи лазерного деформографа при отсутствии скачка, но в момент землетрясения

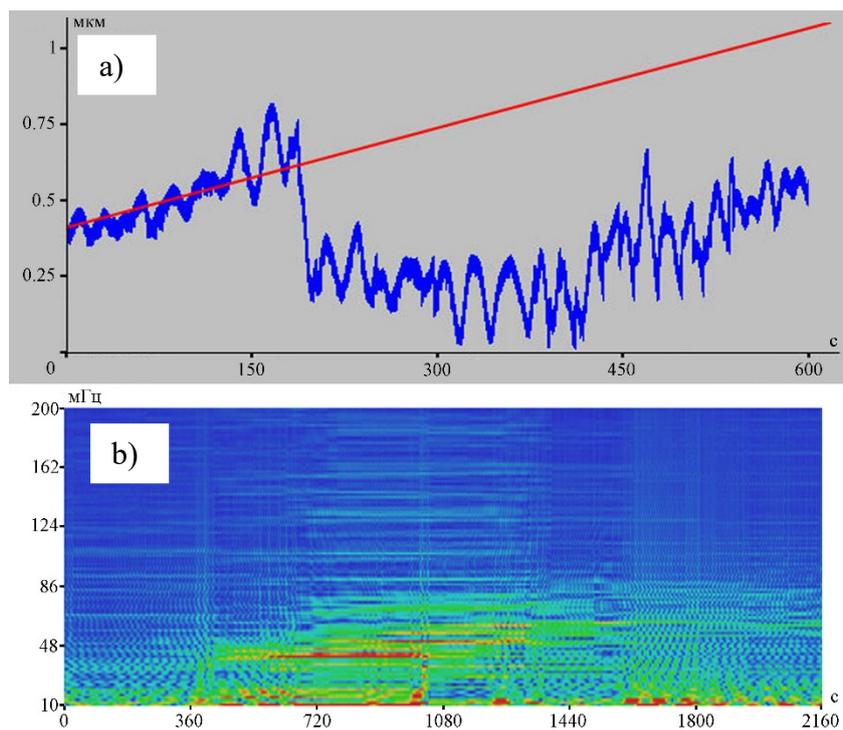
запись отклонилась от своего естественного поведения (наблюдается деформационная аномалия – скачок деформации), что и свидетельствует о цунамигенности землетрясения. На динамической спектрограмме (рисунок 1б) выделяются колебания с периодами от 30 до 14 с, характерные для землетрясения. Также присутствует сильное возмущение в более низкочастотной области.

Второе цунамигенное землетрясение, зарегистрированное лазерным деформографом, с магнитудой 7,6 произошло в 20:14:39 GMT 12.04.2014 вблизи Соломоновых островов. Эпицентр этого землетрясения находился на глубине 22,6 км в точке с координатами 11,270°S 162,148°E на расстоянии более 6 700 км от места установки лазерного деформографа. В прибрежной зоне высота цунами достигла 0,5 м. Сигнал цунамигенного землетрясения на записях лазерного деформографа был зарегистрирован в 20:33:58 GMT, при скорости распространения около 5,78 км/с. На рисунке 2 представлены



**Рисунок 1.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 11 апреля 2012 года (а), точка 0 соответствует времени 09:02:25 GMT, и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (б), точка 0 соответствует времени 08:47:35 GMT.

**Figure 1.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in April 11, 2012 (a), point 0 corresponds to the time 09:02:25 GMT, and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 08:47:35 GMT.



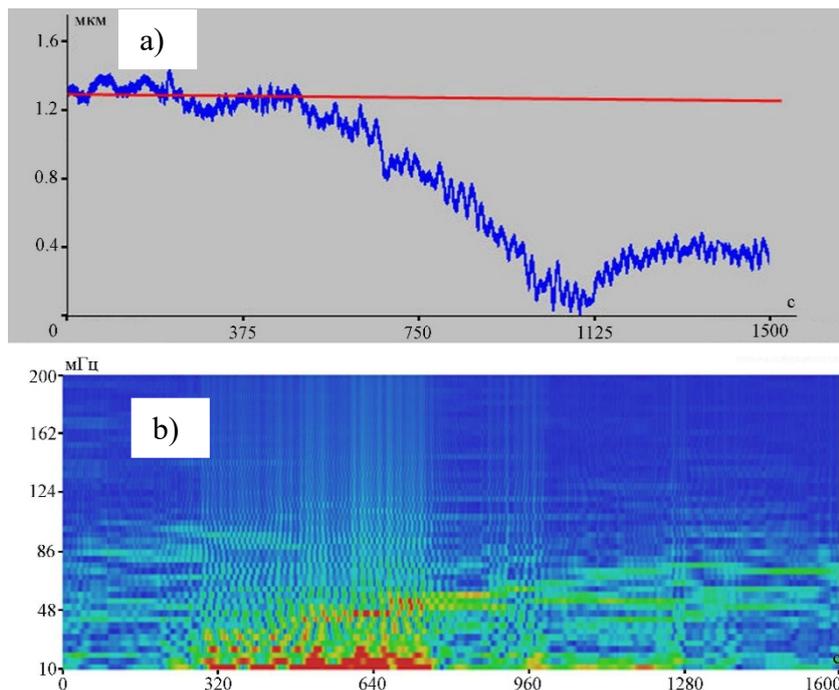
**Рисунок 2.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 12 апреля 2014 года (а), точка 0 соответствует времени 20:40:35 G MT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (b), точка 0 соответствует времени 20:31:30 GMT.

**Figure 2.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in April 12, 2014 (a), point 0 corresponds to the time 20:40:35 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 20:31:30 GMT.

фрагмент записи лазерного деформографа (2a) и динамическая спектрограмма (2b) этого цунамигенного землетрясения. На фрагменте записи неравноплечего лазерного деформографа (рисунок 2a) красным обозначена средняя линия направления записи, но в момент регистрации землетрясения запись отклонилась от тренда. На динамической спектрограмме записи лазерного деформографа, представленной на рисунке 2b, амплитуда сигнала землетрясения меньше, чем в предыдущем случае, но на ней так же присутствуют колебания в диапазоне периодов от 30 до 14 с.

Следующее из рассмотренных землетрясений – это землетрясение, которое произошло 28.09.2018 в 10:02:45 GMT 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 4 800 км от места установки лазерного деформографа. Расчетная средняя скорость поверхностной упругой волны равна 5,49 км/с. На записи лазерного деформографа (рисунок 3a) сигнал этого землетрясения был зарегистрирован почти через 15 минут в 10:17:19 GMT. Здесь красным так же обозначена средняя линия направления записи прибора при отсутствии скачка. На динамической спектрограмме (рисунок 3b) присутствуют колебания около 20 с, характерные для землетрясений такой магнитуды. Из анализа динамических спектрограмм трех землетрясений, произошедших в Индонезии, следует, что наряду с колебаниями самого землетрясения, которые просто «трясут» землю, проявляются возмущения в более низкочастотной области.

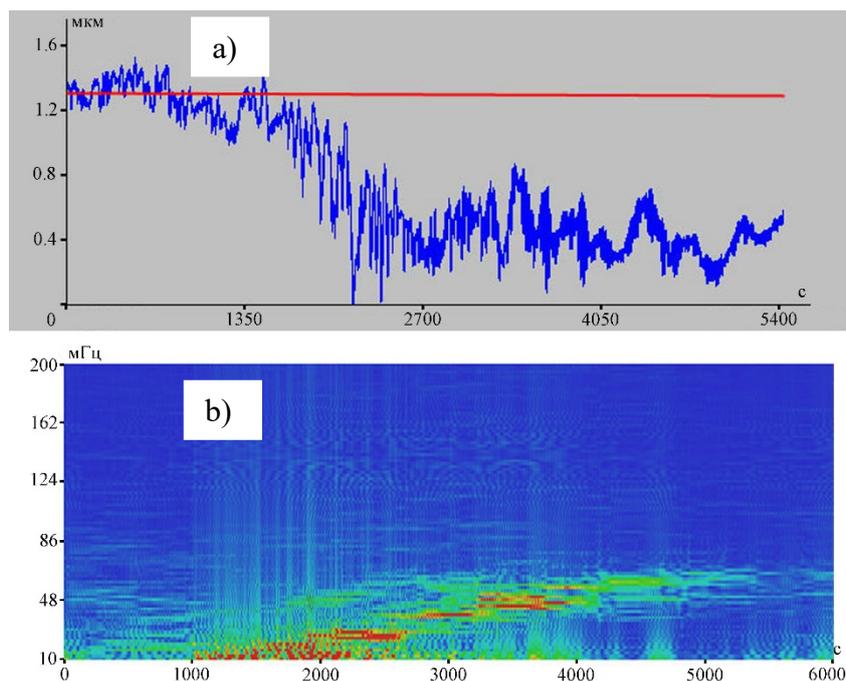


**Рисунок 3.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 28 сентября 2018 года (а), точка 0 соответствует времени 10:14:10 GMT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (б), точка 0 соответствует времени 10:18:25 GMT.

**Figure 3.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in September 28, 2018 (a), point 0 corresponds to the time 10:14:10 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 10:18:25 GMT.

Во втором цунамиопасном районе, Чили, также было выбрано три цунамигенных землетрясения, произошедших в 2010, 2014 и 2015 годах. На северо-западном побережье Чили 27.02.2010 в 06:34:11 GMT произошло землетрясение с магнитудой 8,7. Максимальная высота катастрофического волны составила 29 м. Эпицентр этого землетрясения находился в точке с координатами 36,122°S 72,898°W на глубине 22,9 км на расстоянии более 17 800 км от места установки лазерного деформографа. При анализе записей лазерного деформографа за февраль

2010 года сигнал землетрясения был зарегистрирован в 07:19:00 GMT при средней скорости распространения упругой волны 6,62 км/с. На рисунке 4а присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. При анализе динамической спектрограммы (рисунок 4б) записи прибора во время этого землетрясения были выявлены не только колебания, характерные для землетрясения, но и возмущения в более низкочастотной области.

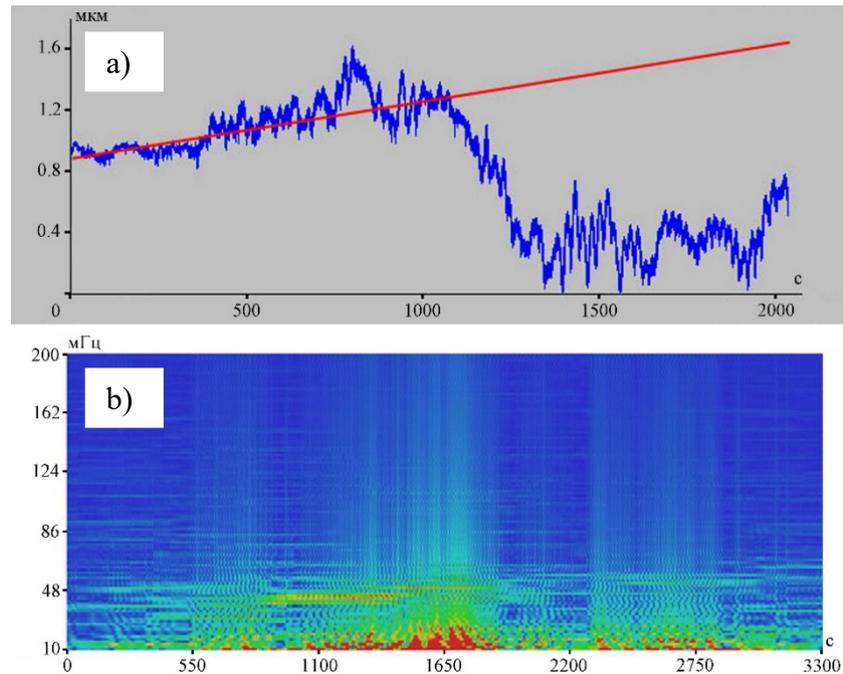


**Рисунок 4.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 27 февраля 2010 года (а), точка 0 соответствует времени 17:20:25 GMT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (б), точка 0 соответствует времени 17:20:35 GMT.

**Figure 4.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in February 27, 2010 (a), point 0 corresponds to the time 17:20:25 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 17:20:35 GMT.

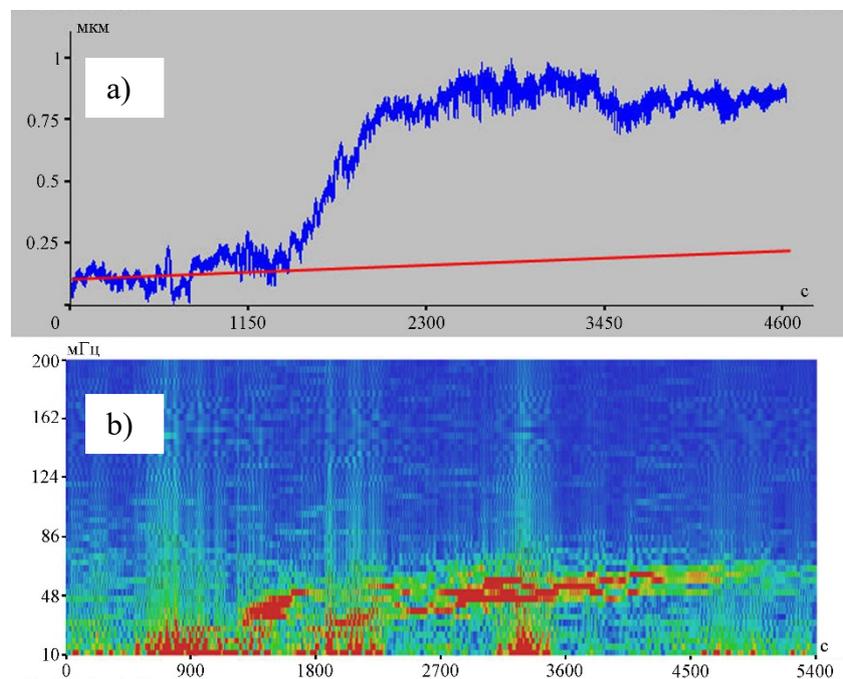
Проанализируем фрагменты записей неравноплечего лазерного деформографа и динамические спектрограммы за апрель 2014 года и сентябрь 2015 года. В это время произошли два сильных цунамигенных землетрясения вблизи северо-западного побережья Чили. 01.04.2014 в 23:46:47 GMT произошло сильное землетрясение в точке с координатами 19,610°S 70,769°W на глубине 25 км, с высотой волны у берега 4,6 м. Сигнал этого землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом, установленным на расстоянии более 16 700 км, 02.04.2014 в 00:24:10 GMT. А 16.09.2015 в 22:54:32 GMT произошло сильное землетрясение, эпицентр которого находился в точке с координатами 31,573°S 71,674°W на глубине 22,4 км. В результате происшедшего землетрясения образовалось цунами высотой 13,6 м. На записях лазерного деформографа, расположенного на расстоянии около 17 650 км, сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в

23:45:01 GMT. Для этих землетрясений средняя скорость распространения упругой волны составляет 7,44 и 5,83 км/с, соответственно. На рисунках 5а и 6а представлены участки записей лазерного деформографа в момент регистрации этих землетрясений. Деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений, присутствует на обоих записях. В момент регистрации землетрясений запись отклонилась от тренда, обозначенного красной линией. Отклонение от этой линии в момент регистрации сейсмических волн и свидетельствует о цунамигенности землетрясения (наличие деформационной аномалии или скачка деформации). На динамических спектрограммах записей лазерного деформографа этих землетрясений (рисунки 5б и 6б) присутствуют колебания с периодами около 20 с, характерные для землетрясений такой магнитуды. Кроме того, отмечены возмущения в более низкочастотной области.



**Рисунок 5.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 02 апреля 2014 года (а), точка 0 соответствует времени 02:04:15 GMT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (б), точка 0 соответствует времени 02:04:55 GMT.

**Figure 5.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in April 02, 2014 (a), point 0 corresponds to the time 02:04:15 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 02:04:55 GMT.



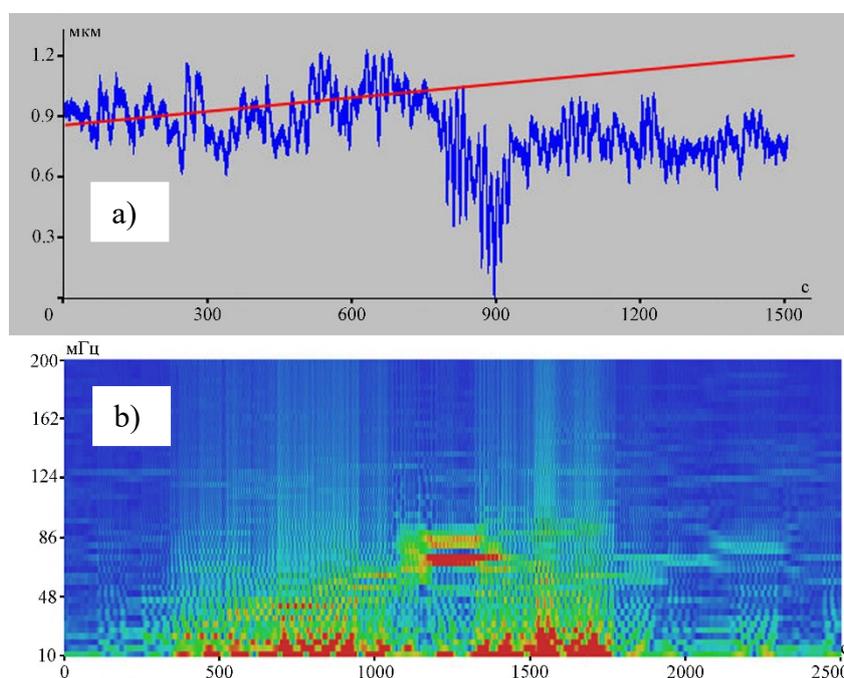
**Рисунок 6.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 16 и 17 сентября 2015 года (а), точка 0 соответствует времени 23:51:20 GMT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (б), точка 0 соответствует времени 23:46:40 GMT.

**Figure 6.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in September 16 and 17, 2015 (a), point 0 corresponds to the time 23:51:20 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 23:46:40 GMT.

Третий из рассматриваемых цунамиопасных районов – это район западного побережья Северной Америки. За рассматриваемый период времени на записях 52,5-метрового лазерного деформографа было зарегистрировано три цунамигенных землетрясения в 2012, 2013 и 2017 годах. Первое из рассматриваемых землетрясений произошло на юго-западном побережье Канады в 03:04:08 GMT 28.10.2012. Эпицентр этого землетрясения с магнитудой 7,8 был на глубине 14 км. В результате на берег пришла волна с максимальной высотой почти 13 м. Учитывая, что расстояние от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа – около 6 800 км, то средняя скорость распространения упругой волны составил примерно 5,94 км/с. На рисунке 7 представлены фрагмент записи лазерного деформографа и динамическая спектрограмма этого цунамигенного землетрясения. На динамической спектрограмме выделяются колебания с

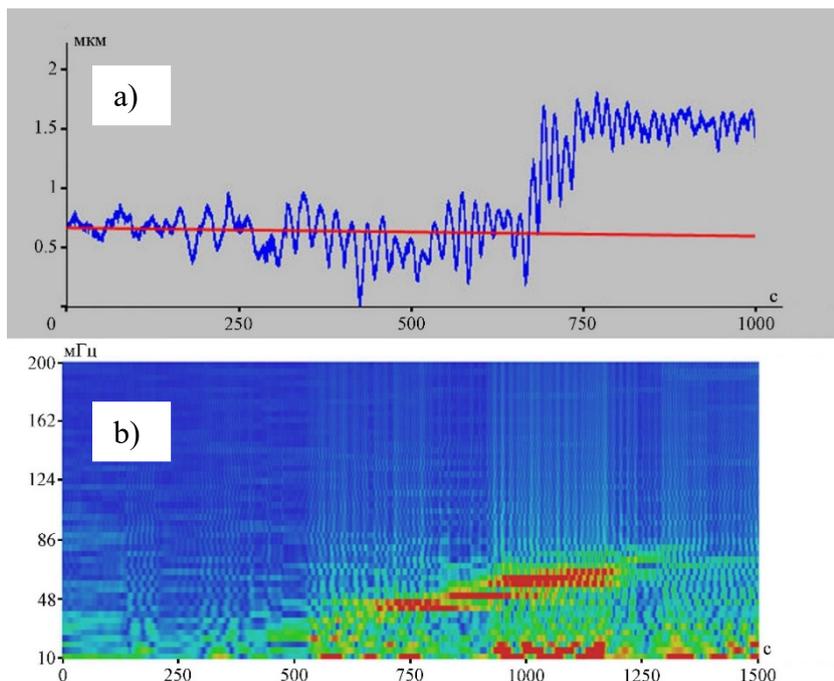
периодами от 30 до 14 с, характерные для землетрясения такой магнитуды, а также присутствует сильное возмущение в более низкочастотной области.

На рисунке 8 представлены фрагмент записи лазерного деформографа и динамическая спектрограмма за 05.01.2013, где выделяется цунамигенное землетрясение, произошедшее в 08:58:14 GMT 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 образовалась цунами с максимальной высотой 1,5 м. Сигнал этого землетрясения на записях лазерного деформографа был выявлен в 09:16:31 GMT. Лазерный деформограф расположен в 6 500 км от эпицентра. Средняя скорость распространения упругой волны составила 5,92 км/с. На динамической спектрограмме записи лазерного деформографа присутствуют как колебания в диапазоне периодов от 30 до 14 с, так и возмущения в более низкочастотной области.



**Рисунок 7.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 28 октября 2012 года (а), точка 0 соответствует времени 03:33:20 GMT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (б), точка 0 соответствует времени 03:26:45 GMT.

**Figure 7.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in October 28, 2012 (a), point 0 corresponds to the time 03:33:20 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 03:26:45 GMT.

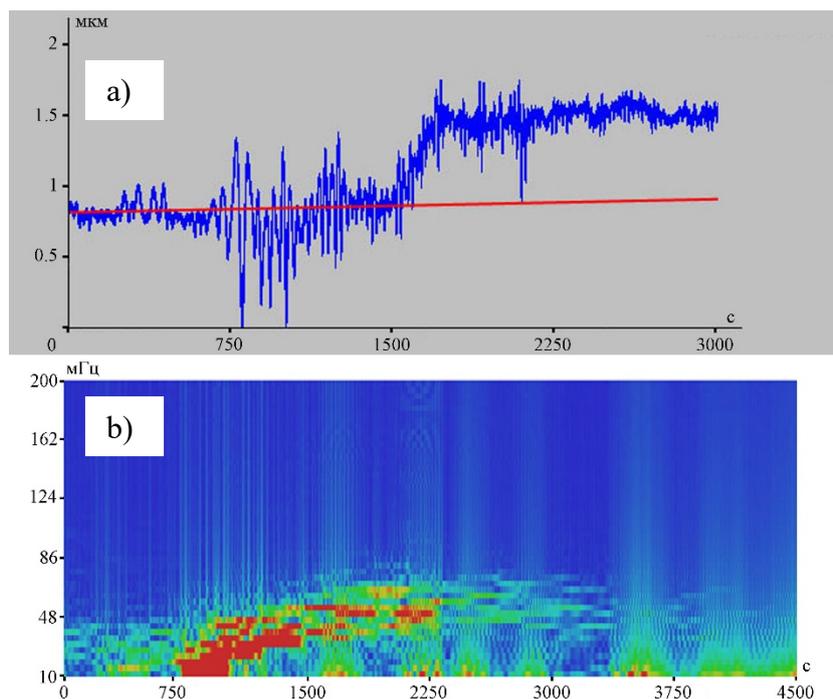


**Рисунок 8.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 05 января 2013 года (а), точка 0 соответствует времени 09:24:45 GMT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (b), точка 0 соответствует времени 09:18:35 GMT.

**Figure 8.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in January 05, 2013 (a), point 0 corresponds to the time 09:24:45 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 09:18:35 GMT.

Третье из рассматриваемых в этом районе цунамигенных землетрясений произошло возле берегов Мексики 08.09.2017 в 04:49:19 GMT с магнитудой 8,2. 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. После этого землетрясения возникла цунами высотой 2,7 м. На записях лазерного деформографа (рисунок 9а) сигнал этого землетрясения был зарегистрирован в 05:34:28 GMT при средней скорости распространения 4,48 км/с. На динамической спектрограмме записи лазерного деформографа (рисунок 9b) наряду с колебаниями от землетрясения с периодами от 30 до 14 с присутствуют возмущения в более

низкочастотной области. На всех рисунках записей лазерного деформографа в моменты регистрации землетрясений на западном побережье Северной Америки присутствует деформационный скачок, характерный для цунамигенных землетрясений. На рисунках 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. Анализ динамических спектрограмм записей лазерного деформографа всех землетрясений показал, что наряду с колебаниями самого землетрясения с периодами от 30 до 14 с присутствуют и возмущения в более низкочастотной области.



**Рисунок 9.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за 08 сентября 2017 года (а), точка 0 соответствует времени 05:30:40 GMT и динамическая спектрограмма цунамигенного землетрясения (b), точка 0 соответствует времени 05:29:35 GMT.

**Figure 9.** Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in September 08, 2017 (a), point 0 corresponds to the time 05:30:40 GMT and a dynamic spectrogram of a tsunamigenic earthquake (b), point 0 corresponds to the time 05:29:35 GMT.

### Анализ некоторых характеристик зарегистрированных деформационных аномалий

Большинство цунамигенных землетрясений происходят вблизи межплитовых границ разделов, тем самым провоцируя изменение этой границы между поддвигающейся океанической литосферой и перекрывающим ее островодужным выступом континентальной литосферы. Неравноплечий 52,5-метровый лазерный деформограф позволяет регистрировать данное смещение дистанционно, так как непосредственно в очаге это смещение зарегистрировать невозможно. Приборов, способных зарегистрировать эти медленные смещения на больших расстояниях, в службах предупреждения цунами нет, так как эти смещения очень малы и находятся за пределами рабочего диапазона измерительных приборов. Для оценки смещений, вызывающих цунами,

применяются различные модели, где используются натурные данные GPS-приемников с низкой частотой дискретизации, данные с буев DART и непрерывные сейсмические данные. Для сравнения характеристик деформационных аномалий, полученных из записей лазерного деформографа, воспользуемся методом конечных разломов, созданным национальным центром информации о землетрясениях Геологической службы США (USGS NEIC)<sup>2</sup>, который использует кинематический подход. В этом методе в качестве натурных данных применяются как объемные Р-волны и S-волны, так и поверхностные волны Лява и Рэлея [Ji, Wald, Helmberger, 2002]. Воспользуемся расчетными смещениями в очаге землетрясения и экспериментальными данными лазерного деформографа для оценки диссипативных характеристик деформационных аномалий. Рассчитаем степень расходимости для каждого из рассматриваемых цунамигенных землетрясений используя экспериментальные и

<sup>2</sup>USGS Earth Hazards Program. Search Earthquake Catalog. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

модельные данные. Под степенью расходимости понимается степень  $\alpha$  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;

$\alpha$  – степень.

При анализе данных, полученных в таблице 1, с учетом всех усреднений степень расходимости равна 0,951. Это свидетельствует о том, что расходимость близка к сферической, но не сферическая. Отличие в степени расходимости для разных землетрясений от среднего значения составляет 0,028 или 2,9%, из чего можно сделать вывод что с учетом небольших ошибок она практически совпадает. Это свидетельствует о хорошем совпадении модельных и экспериментальных значениях.

**Таблица 1.** Степень расходимости цунамигенных землетрясений.

**Table 1.** Degree of divergence of tsunamigenic earthquakes.

Дата	Расчетное смещение, м	Смещение на деформографе, мкм	Расстояние, км	Степень расходимости
11.04.2012	5,4	2,0	5 800	0,951
12.04.2014	0,8	0,4	6 700	0,923
28.09.2018	1,8	1,0	4 800	0,936
27.02.2010	10,5	1,11	17 800	0,962
01.04.2014	8,0	1,0	16 700	0,956
16.09.2015	3,2	0,6	17 650	0,928
28.10.2012	1,5	0,4	6 800	0,962
05.01.2013	3,0	0,8	6 500	0,965
08.09.2017	4,0	0,5	12 150	0,974

### Заключение

С использованием данных неравноплечего 52,5-метрового лазерного деформографа был апробирован деформационный метод определения степени цунамигенности подводных землетрясений. Присутствие деформационного скачка в момент или после землетрясения свидетельствует о смещении дна, характерном при возникновении цунами. Для всех рассмотренных землетрясений была рассчитана степень расходимости, которая показала, что во всех случаях, приведших к образованию цунами, зарегистрированные аномальные сигналы связаны со смещением участка земной коры в эпицентре землетрясения. Применение деформационного метода определения степени

цунамигенности землетрясений в совокупности с другими методами позволит существенно повысить вероятность определения цунами ближней зоны действия. А дальнейшее использование характеристик деформационных аномалий позволит оценить величину смещения в очаге образования цунами.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках выполнения темы государственного задания (№АААА-А20-120021990003-3) «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

## Литература

Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли. 2002. № 8. С. 69–73.

Долгих Г.И., Долгих С.Г. Деформационные признаки цунами // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. Т. 2. Вып. 3. С. 260–271. DOI: [10.34753/HS.2020.2.3.260](https://doi.org/10.34753/HS.2020.2.3.260).

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 // Доклады Академии наук. 2007. Т. 417. № 1. С. 109–112.

Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Ялченир А., Сусморо Н., Прасетья Г., Хидаят Р., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Куркин А.А., Доган Г., Заибо Н., Пронин П.И. Возникновение цунами 2018 года на острове Сулавеси: возможные очаги // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 3. С. 375–379. DOI: [10.31857/S0869-56524863375-379](https://doi.org/10.31857/S0869-56524863375-379).

Boebel O., Busack M., Flueh E.R., Gouretski V., Rohr H., Macrander A., Krabbenhoef A., Motz M., Radtke T. The GITEWS ocean bottom sensor packages // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010. Vol. 10. Iss. 8. Pp. 1759–1780. DOI: [10.5194/nhess-10-1759-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-1759-2010).

Duputel Z., Rivera L., Kanamori H., Hayes G.P., Hirshorn B., Weinstein S. Real-time W phase inversion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth, Planets and Space. 2011. Vol. 63. Pp. 535–539. DOI: [10.5047/eps.2011.05.032](https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.032).

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. Vol. 92. Iss. 4. Pp. 1192–1207. DOI: [10.1785/0120000916](https://doi.org/10.1785/0120000916).

## References

Boebel O., Busack M., Flueh E.R., Gouretski V., Rohr H., Macrander A., Krabbenhoef A., Motz M., Radtke T. The GITEWS ocean bottom sensor packages. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, vol. 10, iss. 8, pp. 1759–1780. DOI: [10.5194/nhess-10-1759-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-1759-2010).

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G. Deformatsionnye priznaki tsunami [Deformational features of tsunamis]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2020, vol. 2, iss. 3, pp. 260–271 (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2020.2.3.260](https://doi.org/10.34753/HS.2020.2.3.260).

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. A deformation method of tsunamigenic earthquakes definition. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 417, no. 1, pp. 1261–1264. DOI: [10.1134/S1028334X07080296](https://doi.org/10.1134/S1028334X07080296) (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Deformatsionnyi metod opredeleniya tsunamigennosti zemletryaseni. *Doklady Akademii nauk*, 2007, vol. 417, no. 1, pp. 109–112).

Dolgikh G.I., Valentin D.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V., Fishchenko V.K. Application of horizontally and vertically oriented strainmeters in geophysical studies of transitional zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2002, vol. 38, no. 8, pp. 686–689. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Valentin D.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V., Fishchenko V.K. Primenenie lazernykh deformografov vertikal'noi i gorizonta'noi orientatsii v geofizicheskikh issledovaniyakh perekhodnykh zon. *Fizika Zemli*, 2002, no. 8, pp. 69–73).

Duputel Z., Rivera L., Kanamori H., Hayes G.P., Hirshorn B., Weinstein S. Real-time W phase inversion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 2011, vol. 63, pp. 535–539. DOI: [10.5047/eps.2011.05.032](https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.032).

- Kamigaichi O.* Tsunami forecasting and warning // Encyclopedia of Complexity and Systems Science / Ed. Meyers R.A. Heidelberg: Springer Berlin, 2015. Pp. 1–38. DOI: [10.1007/978-3-642-27737-5\\_568-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_568-3).
- Kanamori H., Rivera L.* Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning // Geophysical Journal International. 2008. Vol. 175. Iss. 1. Pp. 222–238. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x).
- Percival D.B., Denbo D.W., Eble M.C., Gica E., Mofjeld H.O., Spillane M.C., Tang L., Titov V.V.* Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART® buoy data // Natural Hazards. 2011. Vol. 58. Iss. 1. Pp. 567–590. DOI: [10.1007/s11069-010-9688-1](https://doi.org/10.1007/s11069-010-9688-1).
- Stosius R., Beyerle G., Helm A., Hoechner A., Wickert J.* Simulation of space-borne tsunami detection using GNSS-Reflectometry applied to tsunamis in the Indian Ocean // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010. Vol. 10. Iss. 6. Pp. 1359–1372. DOI: [10.5194/nhess-10-1359-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-1359-2010).
- Tatehata H.* The New Tsunami Warning System of the Japan Meteorological Agency // Perspectives on Tsunami Hazard Reduction: Observations, Theory and Planning / Ed. Hebenstreit G. Dordrecht: Springer, 1997. P. 175–188. DOI: [10.1007/978-94-015-8859-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8859-1_12).
- Tsushima H., Hino R., Ohta Y., Iinuma T., Miura S.* tFISH/RAPiD: Rapid improvement of near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data by incorporating onshore GNSS data // Geophysical Research Letters. 2014. Vol. 41. Iss. 10. Pp. 3390–3397. DOI: [10.1002/2014GL059863](https://doi.org/10.1002/2014GL059863).
- 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, vol. 92, iss. 4, pp. 1192–1207. DOI: [10.1785/0120000916](https://doi.org/10.1785/0120000916).
- Kamigaichi O.* Tsunami forecasting and warning. In Meyers R.A. (ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Heidelberg, Springer Berlin, 2015, pp. 1–38. DOI: [10.1007/978-3-642-27737-5\\_568-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_568-3).
- Kanamori H., Rivera L.* Source inversion of W phase: speeding up seismic tsunami warning. *Geophysical Journal International*, 2008, vol. 175, iss. 1, pp. 222–238. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x).
- Percival D.B., Denbo D.W., Eble M.C., Gica E., Mofjeld H.O., Spillane M.C., Tang L., Titov V.V.* Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART® buoy data. *Natural Hazards*, 2011, vol. 58, iss. 1, pp. 567–590. DOI: [10.1007/s11069-010-9688-1](https://doi.org/10.1007/s11069-010-9688-1).
- Stosius R., Beyerle G., Helm A., Hoechner A., Wickert J.* Simulation of space-borne tsunami detection using GNSS-Reflectometry applied to tsunamis in the Indian Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, vol. 10, iss. 6, pp. 1359–1372. DOI: [10.5194/nhess-10-1359-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-1359-2010).
- Tatehata H.* The New Tsunami Warning System of the Japan Meteorological Agency. In Hebenstreit G. (ed.), *Perspectives on Tsunami Hazard Reduction: Observations, Theory and Planning*. Dordrecht, Springer, 1997, pp. 175–188. DOI: [10.1007/978-94-015-8859-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8859-1_12).
- Tsushima H., Hino R., Ohta Y., Iinuma T., Miura S.* tFISH/RAPiD: Rapid improvement of near-field tsunami forecasting based on offshore tsunami data by incorporating onshore GNSS data. *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, iss. 10, pp. 3390–3397. DOI: [10.1002/2014GL059863](https://doi.org/10.1002/2014GL059863).
- Zaytsev A.I., Pelinovsky E.N., Yalciiner A., Susmoro H., Prasetya G., Hidayat R., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kurkin A.A., Dogan G., Zahibo N., Pronin P.I.* Generation of the 2018 Tsunami on Sulawesi Island: Possible Sources. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, iss. 1, pp. 588–592. DOI: [10.1134/S1028334X19050295](https://doi.org/10.1134/S1028334X19050295) (Russ. ed.:

Zaitsev A.I., Pelinovskii E.N., Yalchenir A., Susmoro N., Praset'ya G., Khidayat R., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kurkin A.A., Dogan G., Zaibo N., Pronin P.I. Vozniknovenie tsunami 2018 goda na ostrove Sulavesi: vozmozhnye ochagi. *Doklady Akademii nauk*, 2019, vol. 486, no. 3, pp. 375–379. DOI: [10.31857/S0869-56524863375-379](https://doi.org/10.31857/S0869-56524863375-379)).