



# Лазерно-интерференционные системы исследования цунамигенных землетрясений

Г. И. Долгих, С. Г. Долгих  
Тихоокеанский океанологический институт  
им. В. И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

Описаны особенности применения лазерных деформографов и лазерных измерителей вариаций гидросферного давления при регистрации цунамигенных землетрясений и ими порождаемых сигналов. При анализе записей различных цунамигенных землетрясений лазерных деформографов рассматриваются перспективы создания систем предупреждения цунами.

**Ключевые слова:** лазерные деформографы, лазерные измерители вариаций гидросферного давления, цунами, система предупреждения

Статья получена: 19.10.2020

Статья принята к публикации: 10.11.2020

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых технологий краткосрочного прогноза опасных гидродинамических процессов Земли (волны цунами, «волны-убийцы» и др.), их пеленгации и идентификации на стадии зарождения и развития имеет громадное значение. На данный момент практически нет достаточно надежных методов регистрации возникновения опасных гидродинамических процессов Земли, на что указывают катастрофические события последних лет. В качестве характерного примера можно привести два события, которые связаны с землетрясениями, происшедшими в земной коре под морским дном. Так в декабре 2004 года произошло мощное землетрясение в Индийском океане, в результате чего образовалась цунами, унесшая жизни более 283 000 человек [1-4]. При

# Laser Interference Systems Research on Tsunamigenic Earthquakes

G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh  
V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch  
of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

The features of using laser strainmeters and laser meters of hydrospheric pressure variations for recording tsunamigenic earthquakes and their generated signals are described. When analyzing the records of various tsunamigenic earthquakes using laser strainmeters, the prospects for creating tsunami warning systems are considered.

**Keywords:** laser strainmeter, laser meters of hydrosphere pressure variations, tsunami, warning system

Received: 19.10.2020

Accepted: 10.11.2020

## INTRODUCTION

The development of new technologies for short-term forecasting of dangerous hydrodynamic processes of the Earth (tsunami waves, “rogue waves”, etc.), their direction finding and identification at the stage of origin and development is of great importance. At the moment, there are practically no sufficiently reliable methods for registering the occurrence of dangerous hydrodynamic processes on the Earth, as indicated by the catastrophic events of recent years. As a typical example, two events can be cited that are associated with earthquakes that occurred in the earth's crust under the seabed. Thus, in December 2004, a powerful earthquake occurred in the Indian Ocean, resulting in a tsunami that killed more than 283,000 people [1-4]. At the same time, no alarm was announced in connection with the formation of a tsunami. In January 2007, there was a powerful earthquake in the Pacific Ocean, as a result, the danger of a tsunami was declared on the Kuril Islands and on the island of Hokkaido. There was no tsunami. These examples indicate that tsunami warning services are not work-



этом не была объявлена тревога в связи с образованием цунами. А в январе 2007 года произошло мощное землетрясение в Тихом океане, в результате была объявлена опасность цунами на Курильских островах и на острове Хоккайдо. Цунами не было. Данные примеры говорят о том, что службы предупреждения, связанные с опасностью возникновения цунами, работают не эффективно. Если в первом случае погибла масса людей и нанесен большой экономический и социально-политический ущерб, то во втором случае нанесен большой экономический ущерб хозяйствующим объектам в зоне, где была объявлена тревога, в связи с прекращением их функционирования и проведением противоцунамиопасных мероприятий, эвакуацией людей из предполагаемых районов затопления.

Деформационные аномалии, вызывающие цунами, возникают при различных геодинамических процессах. Подавляющее их большинство связано с землетрясениями. Сами землетрясения всего лишь «трясут» дно в диапазоне периодов от нескольких секунд до нескольких десятков секунд и не могут вызвать цунами. А деформационные аномалии, вызванные землетрясениями, находятся в крайне левом частотном диапазоне и не могут быть зарегистрированы любыми, даже широкополосными сейсмографами. Наиболее эффективными для регистрации цунами являются установки, способные регистрировать деформационные подвижки, приводящие к возникновению волны. Скорость распространения деформационной подвижки в упругой среде на порядок больше скорости распространения цунами. Наиболее перспективными для их регистрации и пеленгации являются лазерные деформографы горизонтального типа благодаря своим основным характеристикам: точности измерения микросмещений земной коры 0,1 нм, частотному диапазону от 0 (условно) до 1000 Гц, динамический диапазон практически не ограничен при измерении естественных процессов инфразвукового диапазона. Регистрация деформационной аномалии лазерным деформографом [5], расположенным на м. Шульца, находящемся на значительном расстоянии от места генерации цунами, позволила сформулировать основы деформационного метода определения цунамигенности землетрясений [6].

В настоящей статье исследуем записи двух рядом происшедших землетрясений, одно из которых было цунамигенным, а другое не было цунамигенным. В дальнейшем при описании возможностей лазерных измерителей вариаций

ing effectively. If in the first case, a lot of people died and great economic and socio-political damage was caused, then in the second case, great economic damage was caused to economic facilities in the zone where the alarm was announced, due to the termination of their functioning and the implementation of anti-tsunami hazardous measures, the evacuation of people from the alleged flooded areas.

Strain anomalies that cause tsunamis occur during various geodynamic processes. The overwhelming majority of them are associated with earthquakes. The earthquakes themselves only “shake” the bottom in the range of periods from several seconds to several tens of seconds and cannot cause a tsunami. Alternatively, the strain anomalies caused by earthquakes are in the extreme left frequency range and cannot be recorded by any, even broadband seismographs. The most efficient devices for tsunami registration are those capable of registering strain slips leading to the appearance of a wave. The rate of propagation of the strain slip in an elastic medium is an order of magnitude higher than the rate of propagation of a tsunami. The most promising for their registration and direction finding are horizontal laser strainmeters due to their main characteristics: the accuracy of measuring the microdisplacements of the Earth’s crust is 0.1 nm, the frequency range is from 0 (conventionally) to 1000 Hz, the dynamic range is practically unlimited when measuring natural processes in the infrasonic range. Registration of the strain anomaly by a laser strainmeter [5] at Cape Schultz, located at a considerable distance from the place of tsunami generation, made it possible to formulate the foundations of the strain method for determining the tsunamigenicity of earthquakes [6].

In this article, we investigate the records of two side-by-side earthquakes, one of which was tsunamigenic, and the other was not tsunamigenic. In the future, when describing the capabilities of laser meters for hydrospheric pressure variations, we will substantiate the foundations of creating new tsunami warning systems.

## EXPERIMENTAL DATA AND THEIR PROCESSING RESULTS

Since the beginning of the operation of a horizontal laser strainmeter with a north-south orientation and with a measuring arm length of 52.5 m, created in accordance with [7], a large amount of data of a wide frequency range of artificial and natural origin has been obtained, including data on various tsunamigenic and not tsunamigenic earthquakes. In this section, we will analyze the records of two earth-

гидросферного давления обоснуем основы создания новых систем предупреждения цунами.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ОБРАБОТКИ

С момента начала работы лазерного деформографа горизонтального типа ориентацией север-юг и с длиной измерительного плеча 52,5 м, созданного в соответствии с [7], был получен большой объем данных широкого диапазона частот искусственного и естественного происхождения, в том числе данные по различным цунамигенным и не цунамигенным землетрясениям. В данном разделе мы проанализируем записи двух рядом происшедших землетрясений, после каждого из которых была объявлена тревога цунами, хотя одно из них не привело к образованию цунами, а второе привело к образованию цунами.

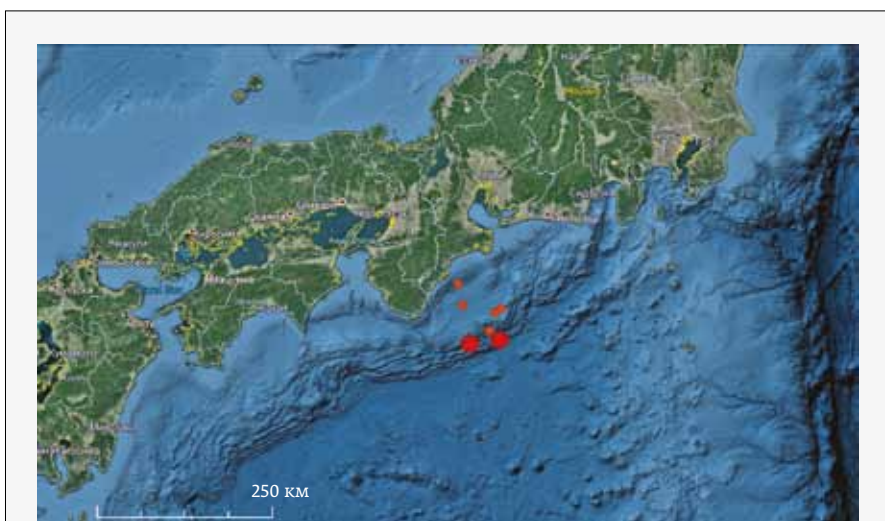
5 сентября 2004 года на южном побережье острова Хонсю, Япония, произошло два мощных землетрясения. Первое землетрясение с магнитудой 7,2 произошло в 10:07:07 в точке с координатами 33.14°N, 136.62°E, на расстоянии около 75 км к востоку от о. Хонсю, на глубине 20 км от уровня моря. Второе землетрясение с магнитудой 7,5 произошло в 14:57:16. Его гипоцентр находился в точке с координатами 33.19°N, 137.05°E, на расстоянии около 130 км к востоку от южной части о. Хонсю, на глубине 10 км от уровня моря. На рис. 1 приведена карта-схема расположения эпицентров двух сильных землетрясений (красный круг) и череды землетрясений с магнитудой около 5 (оранжевые круги). Землетрясения с магнитудой около 5 были зарегистрированы на южном побережье о. Хонсю после второго сильного землетрясения.

Оба сильных землетрясения были зарегистрированы лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», в точке с координатами 42.58°N, 131.13°E. Расстояние от эпицентров землетрясений до лазерного деформографа составляет около 1162 км. На рис. 2 (верхний), приведена запись первого не цунамигенного землетрясения. Сигнал от землетрясения

quakes that occurred side by side, after each of which a tsunami alert was declared, although one of them did not lead to the formation of a tsunami, and the second led to the formation of a tsunami.

On September 5, 2004, two powerful earthquakes struck the southern coast of Honshu Island, Japan. The first earthquake with a magnitude of 7.2 occurred at 10:07:07 at the point with coordinates 33.14°N, 136.62°E, at a distance of about 75 km east of Honshu Island, at a depth of 20 km from sea level. The second earthquake with a magnitude of 7.5 occurred at 14:57:16. Its hypocenter was located at the point with coordinates 33.19°N, 137.05°E, at a distance of about 130 km east of the southern part of Honshu Island, at a depth of 10 km from sea level. Fig. 1 shows a schematic map of the location of the epicenters of two strong earthquakes (red circle) and a series of earthquakes with a magnitude of about 5 (orange circles). Earthquakes with a magnitude of about 5 were recorded on the southern coast of Honshu Island after the second strong earthquake.

Both strong earthquakes were recorded by a laser strainmeter installed at the Marine Experimental Station of the Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences “Cape Schulz”, at the point with coordinates 42.58°N, 131.13°E. The distance from the epicenters of earthquakes to the laser strainmeter is about 1,162 km. The record of the first non-tsunamigenic earthquake is shown in Fig. 2 (top). The signal from the earthquake was recorded by a laser strainmeter at 10:13:46 on Sep-



**Рис. 1.** Карта-схема расположения эпицентров землетрясений в районе южного побережья Хонсю 5 сентября 2004 года

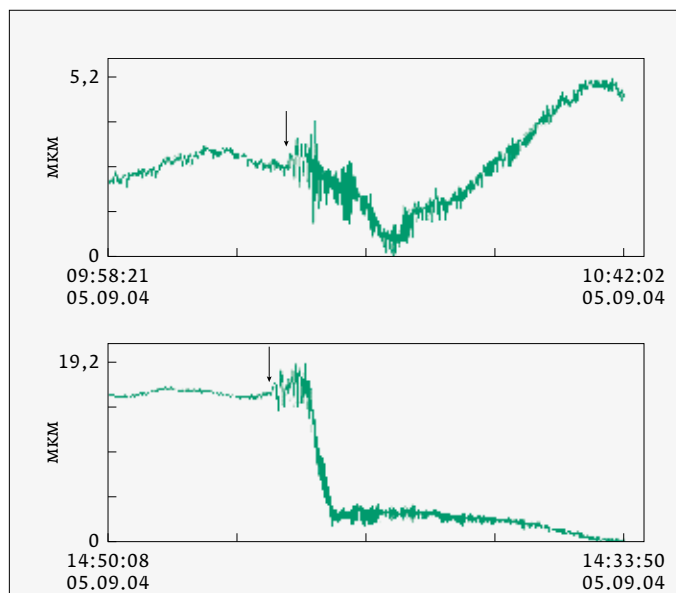
**Fig. 1.** Schematic map of the location of earthquake epicenters in the area of the southern coast of Honshu on September 5, 2004

был зарегистрирован лазерным деформографом в 10:13:46 5 сентября 2004 года. Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа, скорость их распространения примерно равна 2,909 км/с. На рис. 2 (нижний) приведена запись второго, цунамигенного, землетрясения. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом в 15:03:52 5 сентября 2004 года. Расстояние от эпицентра землетрясения до лазерного деформографа составляет около 1152 км. Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа, скорость их распространения примерно равна 2,909 км/с.

На рис. 3 приведена увеличенная запись лазерного деформографа горизонтального типа первого, не цунамигенного, землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний). Начало землетрясения отмечено стрелкой. На записи нет деформационной аномалии, характерной для цунамигенного землетрясения, а на динамической спектрограмме

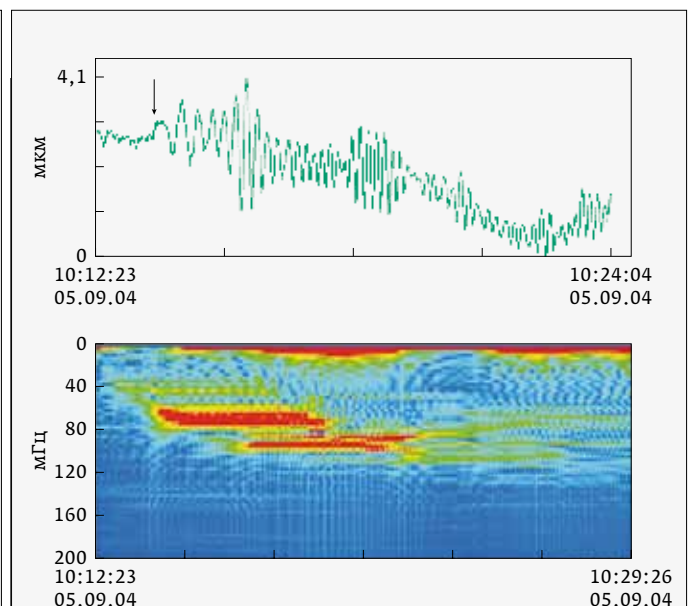
темпер 5, 2004. Taking into account the propagation time of oscillations from the epicenter of the earthquake to the place where the laser strainmeter is installed, their propagation velocity is approximately 2.909 km/s. Fig. 2 (bottom) shows a record of the second earthquake, tsunamigenic one. The signal from the earthquake was recorded by a laser strainmeter at 15:03:52 on September 5, 2004. The distance from the epicenter of the earthquake to the laser strainmeter is about 1,152 km. Taking into account the time of propagation of oscillations from the epicenter of the earthquake to the place where the laser strainmeter is installed, the velocity of their propagation is approximately 2.909 km/s.

Fig. 3 shows an enlarged record of a horizontal-type laser strainmeter of the first non-tsunamigenic earthquake (top) and a dynamic spectrogram of this earthquake (bottom). The beginning of the earthquake is marked with an arrow. The record does not show a strain anomaly characteristic of a tsunamigenic earthquake, and the dynamic spectrogram clearly shows oscillations with periods of about 10 and 16 s.



**Рис. 2.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за сентябрь 2004 года: запись нецунамигенного землетрясения (верхний) и запись цунамигенного землетрясения (нижний) на юге западного побережья Хонсю

**Fig. 2.** Fragment of a record of a 52.5-meter laser strainmeter for September 2004: a record of a non-tsunamigenic earthquake (top) and a record of a tsunamigenic earthquake (bottom) in the south of the west coast of Honshu



**Рис. 3.** Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа: не цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний)

**Fig. 3.** Fragment of a recording of a 52.5-meter laser strainmeter: a non-tsunamigenic earthquake (top) and a dynamic spectrogram of this earthquake (bottom)



ярко выражены колебания с периодами около 10 и 16 с.

На рис. 4 приведена запись цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма записи этого землетрясения (нижний). Начало землетрясения отмечено стрелкой. Видно, что после начала землетрясения произошло изменение характера записи. Деформационная аномалия возникла примерно через 2,5 мин после начала землетрясения. На базе лазерного деформографа с длиной плеча 52,5 м деформационная аномалия составляет величину 19,2 мкм. На динамической спектрограмме присутствуют колебания с периодами 10 и 16 с, но наиболее сильные колебания выделяются в более низкочастотной области.

Цунамигенное землетрясение произошло в месте, где глубина моря составляет 2700 м, при этом скорость цунами может составлять 0,16 км/с. Учитывая, что до ближайшего побережья около 130 км, то волна цунами достигнет берега через 812 с. Лазерный деформограф, установленный на юге Приморского края, зарегистрировал деформационную аномалию, которая привела к образованию цунами, на 9 мин раньше, чем самая большая волна дошла до ближайшего побережья.

Оценку максимального значения вертикального смещения дна в эпицентре можно сделать по формуле [8]:

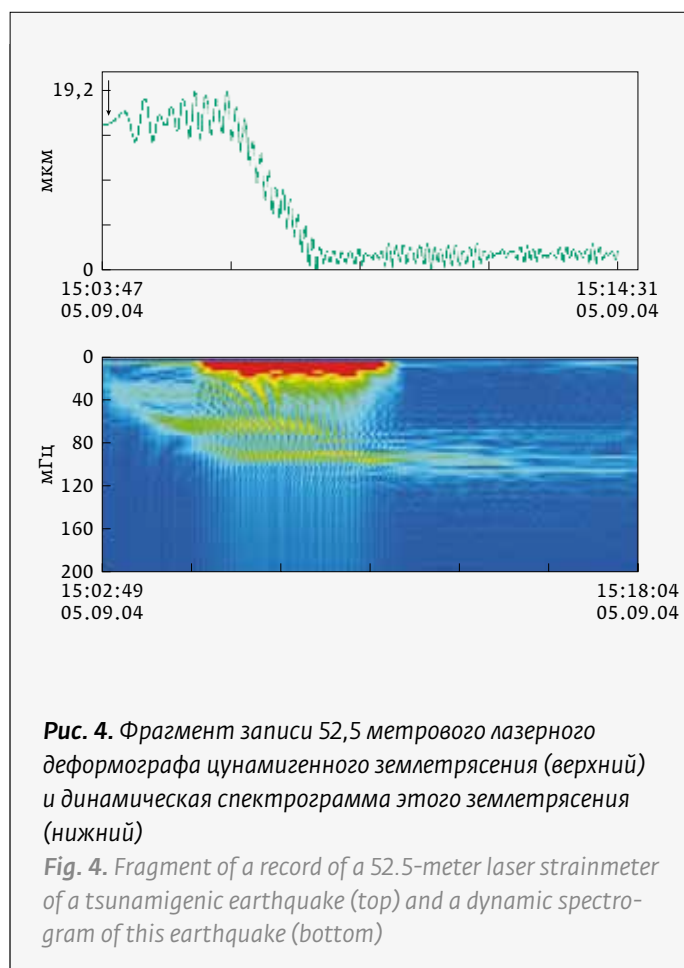
$$H[\text{см}] = 1,5M_w - 21gh[\text{км}],$$

где:  $M_w$  – магнитуда землетрясения,  $H$  – максимальная высота смещения дна в эпицентре и  $h$  – глубина фокуса. Подстановка сюда магнитуды  $M_w = 7,5$  и глубины фокуса  $h = 10$  км приводит к оценке  $H \sim 3,3$  см.

По данным местных СМИ эпицентр землетрясения находился рядом с полуостровом Кии, выходящим в Тихий океан. Толчки землетрясения ощущались на большой территории, вплоть до г. Токио, удаленного на 600 км от эпицентра. Колебания пришились и на древнюю столицу Японии г. Нара. После первого и второго землетрясения была объявлена тревога цунами. Но после первого землетрясения наблюдалась только приливная волна высотой около 0,5 м. А после второго землетрясения наблюдалось небольшое цунами с высотой волны около одного метра. После первого толчка было прекращено движение электричек и скоростных поездов. В результате воздействия цунами пострадали 14 человек, в префектуре Вакаяма произошла авария, приведшая к прекра-

Fig. 4 shows a record of a tsunamigenic earthquake (top) and a dynamic spectrogram of the record of this earthquake (bottom). The beginning of the earthquake is marked with an arrow. It can be seen that after the beginning of the earthquake, the character of the recording changed. The strain anomaly occurred approximately 2.5 minutes after the onset of the earthquake. Based on a laser strainmeter with an arm length of 52.5 m, the strain anomaly is 19.2  $\mu\text{m}$ . On the dynamic spectrogram there are oscillations with periods of 10 and 16 s, but the strongest oscillations stand out in the lower frequency region.

Tsunamigenic earthquake occurred in a place where the sea depth is 2700 m, while the tsunami velocity can be 0.16 km/s. Considering that the nearest coast is about 130 km away, the tsunami wave will reach the coast in 812 s. A laser strainmeter, installed in the south of Primorsky Krai, registered a strain anomaly 9 minutes earlier, which led to the formation of a tsunami, than the largest wave reached the nearest coast.



**Рис. 4.** Фрагмент записи 52,5 метрового лазерного деформографа цунамигенного землетрясения (верхний) и динамическая спектрограмма этого землетрясения (нижний)

**Fig. 4.** Fragment of a record of a 52.5-meter laser strainmeter of a tsunamigenic earthquake (top) and a dynamic spectrogram of this earthquake (bottom)

щению подачи электроэнергии, у побережья префектуры Миэ перевернулись 4 небольших судна. Небольшая волна цунами нанесла незначительный ущерб экономике Японии.

В настоящее время в службе предупреждения цунами для регистрации колебаний уровня моря используются донные датчики системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis), которые обеспечивают достаточно хороший уровень измерений для решения прикладных задач, но недостаточный для решения ряда фундаментальных задач, связанных с точным прогнозом цунами по полученным записям. Для решения данных фундаментальных задач предлагается использовать лазерные измерители вариаций гидросферного давления [9], но оснащенные другой системой компенсации гидросферного давления, применяемой при погружении прибора на дно или его поднятии, обеспечивающей его работоспособность при больших глубинах. Внешний вид и оптическая схема лазерного измерителя вариаций давления гидросферы представлены на рис. 5.

Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления (рис. 5 а) представляет собой цилиндрический корпус (1), который закреплен в защитной решетке (2). Одна сторона корпуса герметично заглушена и имеет отверстие под кабель. Другая сторона герметично закрывается съемной крышкой (3). Снаружи прибора расположена эластичная емкость (4) с воздухом, выходное отверстие которой с помощью трубки соединено с компенсационной камерой, расположенной в съемной крышке. Чувствительным элементом лазерного гидрофона является круглая мембрана, закрепленная в его съемной крышке таким образом, что одна ее сторона контактирует с водой, а другая обращена внутрь прибора и является частью интерферометра Майкельсона. Все оптические элементы лазерного измерителя вариаций гидросферного давления (рис. 5 б) жестко закреплены на оптической базе (8). Луч лазера (11) через коллиматор (10) попадает на плоскопараллельную делительную пластину (7), которая делит его на два отдельных луча, измерительный и опорный. Первый

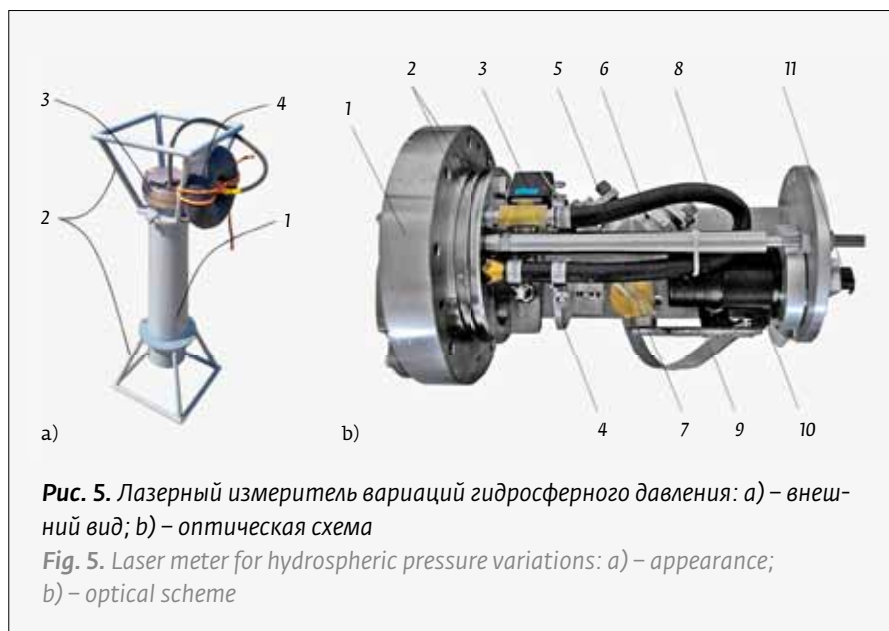
The maximum value of the vertical displacement of the bottom at the epicenter can be estimated by the formula [8]:

$$H[\text{cm}] = 1.5 M_w - 21gh[\text{km}],$$

where:  $M_w$  is the magnitude of the earthquake,  $H$  is the maximum height of the bottom displacement at the epicenter, and  $h$  is the depth of focus. Substituting here the magnitude  $M_w = 7.5$  and the depth of focus  $h = 10$  km leads to an estimate of  $H \sim 3.3$  cm.

According to local media reports, the epicenter of the earthquake was located near the Kii Peninsula, overlooking the Pacific Ocean. The earthquake shocks were felt over a large area, up to the city of Tokyo, located 600 km from the epicenter. Oscillations also fell on the ancient capital of Japan, Nara. After the first and second earthquakes, the tsunami alert was announced. However, after the first earthquake, only a tidal wave with a height of about 0.5 m was observed. After the second earthquake, a small tsunami with a wave height of about one meter was observed. After the first push, the movement of electric trains and high-speed trains was stopped. Because of the tsunami, 14 people were injured, an accident occurred in Wakayama prefecture that led to a power outage, and 4 small ships capsized off the coast of Mie Prefecture. A small tsunami wave caused minor damage to the Japanese economy.

Currently, the tsunami warning service uses bottom sensors of the DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) system to register sea level fluctuations, which provide a sufficiently good level



**Рис. 5.** Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления: а) – внешний вид; б) – оптическая схема

**Fig. 5.** Laser meter for hydrospheric pressure variations: а) – appearance; б) – optical scheme



луч (измерительный) направлен в линзу (4), далее через оптическое окно на мембрану с зеркальным напылением, находящуюся в крышке (1). После отражения от мембраны луч снова попадает сначала на линзу, а потом на делительную пластину (7), отражением от которой он направляется на фотодиод резонансного усилителя (9). Второй луч (опорный) после делительной пластины проходит через систему управляющих зеркал (5) и (6), установленных на пьезокерамических основаниях. Далее он, как и измерительный луч, попадает на фотодиод резонансного усилителя. С помощью этих двух лучей настраивается интерференционная картина, изменение которой будет соответствовать вариациям гидросферного давления, воздействующих на мембрану.

Вариации гидросферного давления приводят к смещению центра мембраны, которое и регистрирует лазерный измеритель вариаций гидросферного давления. Предельная точность измерения смещения мембраны определяется стабильностью частоты применяемого гелий-неонового лазера:

$$\Delta l = L \frac{\Delta \nu}{\nu},$$

где:  $L$  – разность оптического хода в плечах интерферометра в начальный момент измерения,  $\frac{\Delta \nu}{\nu}$  – нестабильность частоты,  $\nu$  – частота и  $\Delta \nu$  – ширина полосы лазерного излучения. В лазерном измерителе вариаций гидросферного давления используется равноплечий интерферометр Майкельсона, рабочий и эталонные плечи которого уравнены с точностью не хуже 1 см. При стабильности частоты рабочего лазера, равной  $10^{-9}$ , предельная точность измерения смещения центра мембраны равна 10 пм. Эта предельная величина измерения смещения центра мембраны позволяет измерять вариации внешнего давления с точностью

$$\Delta P = \frac{16 \cdot \Delta l \cdot h^3 \cdot E}{3 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot R^4},$$

где:  $\Delta l$  – смещение центра мембраны,  $h$  – толщина мембраны,  $E$  – модуль Юнга,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона,  $R$  – диаметр мембраны.

В лазерном гидрофоне можно использовать мембраны разной толщины, изготовленные из нержавеющей стали. При  $R=5$  см,  $h=1$  мм,  $E=2,1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\sigma=0,25$ , имеем:

$$\Delta P = 1,9 \cdot 10^8 \cdot \Delta l.$$

of measurements for solving applied problems, but insufficient for solving a number of fundamental problems associated with accurate tsunami forecast based on the records received. To solve these fundamental problems, it is proposed to use laser meters for hydrospheric pressure variations [9], but equipped with a different hydrospheric pressure compensation system used when the device is submerged or raised to the bottom, ensuring its performance at great depths. The external view and optical layout of the laser meter for hydrosphere pressure variations are shown in Fig. 5.

The laser meter of hydrosphere pressure variations (Fig. 5a) is a cylindrical body (1), which is fixed in a protective grid (2). One side of the body is hermetically sealed and has a hole for the cable. The other side is sealed with a removable cover (3). Outside the device there is an elastic container (4) with air, the outlet of which is connected with a tube to a compensation chamber located in a removable cover. The sensitive element of the laser hydrophone is a round membrane fixed in its removable cover in such a way that one side of it is in contact with water, and the other is turned inside the device and is part of the Michelson interferometer. All optical elements of the laser meter for hydrospheric pressure variations (Fig. 5b) are rigidly fixed on the optical base (8). The laser beam (11) passes through the collimator (10) onto a plane-parallel dividing plate (7), which divides it into two separate beams, measuring and reference. The first (measuring) beam is directed into the lens (4), then through the optical window onto the mirror-coated membrane located in the cover (1). After reflection from the membrane, the beam again hits the lens, and then onto the dividing plate (7), from which it is reflected to the photodiode of the resonant amplifier (9). The second beam (reference), after the dividing plate, passes through a system of control mirrors (5) and (6) mounted on piezoceramic bases. Then, like the measuring beam, it hits the photodiode of the resonant amplifier. With the help of these two beams, an interference pattern is adjusted, the change in which will correspond to the variations in hydrospheric pressure acting on the membrane.

Variations in hydrospheric pressure lead to a displacement of the center of the membrane, which is recorded by a laser meter for hydrospheric pressure variations. The limiting accuracy of the membrane displacement measurement is determined by the frequency stability of the used helium-neon laser:

$$\Delta l = L \frac{\Delta \nu}{\nu},$$



При вышеуказанной предельной величине измерения смещения центра мембраны имеем предельную величину измерения вариаций гидросферного давления, равную 0,0019 Па (или 0,002 Па). Эта предельная величина позволяет регистрировать колебания уровня моря с предельной точностью 0,2 мкм. Данная величина на несколько порядков лучше предельной величины донных приемников DART.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сравнении результатов обработки данных лазерного деформографа, зафиксировавшего сигналы от двух рядом происшедших мощных землетрясений, можно отметить, что, судя по основным спектральным пикам первоначальных участков их записей (10 и 16 с), длины разрывов в очагах землетрясений были примерно одинаковые. В записи цунамигенного землетрясения наблюдается скачок деформации порядка  $0,32 \cdot 10^{-6}$ , пропорциональный смещению на базе деформографа (52,5 м), равному около 17 мкм. Скачок деформации возник через некоторое время после начала землетрясения. Данный скачок деформации сформирован смещением морского дна в эпицентре землетрясения, которое и привело к образованию цунами. Подобные скачки деформации на лазерных деформографах наблюдались и ранее при регистрации цунамигенных землетрясений, и всегда они возникали через некоторое небольшое время после начала землетрясений [5, 6]. Данные скачки деформации являются бесспорным индикатором цунамигенного землетрясения.

where:  $L$  is the difference in the optical path in the arms of the interferometer at the initial moment of measurement,  $\frac{\Delta\nu}{\nu}$  is the frequency instability,  $\nu$  is

the frequency, and  $\Delta\nu$  is the bandwidth of the laser radiation. In the laser meter for hydrospheric pressure variations, a Michelson equal-arm interferometer is used, the working and reference arms of which are equalized with an accuracy of at least 1 cm. When the frequency of the working laser is  $10^{-9}$ , the limiting accuracy of measuring the displacement of the membrane center is 10  $\mu\text{m}$ . This limiting value for measuring the displacement of the center of the membrane allows you to measure variations in external pressure with an accuracy

$$\Delta P = \frac{16 \cdot \Delta l \cdot h^3 \cdot E}{3 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot R^4},$$

where:  $\Delta l$  is displacement of the center of the membrane,  $h$  is membrane thickness,  $E$  is Young's modulus,  $\sigma$  is Poisson's ratio,  $R$  is membrane diameter.

The laser hydrophone can use stainless steel membranes of various thicknesses. With  $R=5$  cm,  $h=1$  mm,  $E=2.1 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,  $\sigma=0.25$ , we have:

$$\Delta P = 1,9 \cdot 10^8 \cdot \Delta l.$$

With the above limiting value for measuring the displacement of the membrane center, we have a limiting value for measuring variations in hydrospheric pressure equal to 0.0019 Pa (or 0.002 Pa). This limiting value makes it possible to record sea level fluctuations with an extreme accuracy of 0.2  $\mu\text{m}$ . This value

## Промышленные вакуумные высокочастотные плазменные системы

# ВЧ

Ионные источники  
Генераторы плазмы  
Системы питания плазменных устройств






**Области применения:**

- Вакуумное нанесение покрытий - оптические покрытия, лазерная и ИК оптика, упрочняющие покрытия и другое
- Микроэлектроника - плазмохимическое осаждение и травление покрытий, ионное травление

ООО «ФРИДЖИ», Минск, Беларусь  
[www.freegy.by](http://www.freegy.by)    [info@freegy.by](mailto:info@freegy.by)





Описаны возможности лазерного измерителя вариаций гидросферного давления, предназначенного для регистрации колебаний уровня моря, вызванных различными процессами, связанными в том числе и с смещениями морского дна, приводящими к образованию цунами. В отличие от донных приёмников DART, применяемых в настоящее время в качестве основных регистраторов подобного рода, лазерные измерители вариаций гидросферного давления, помещённые на дно, могут измерять изменения уровня моря с точностью около 0,2 мкм, что на несколько порядков лучше всех подобных измерительных систем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (18-05-80011, опасные явления) и темы «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане».

## REFERENCES

1. Site of the Geophysical Service RAS. URL: [www.ceme.gsras.ru](http://www.ceme.gsras.ru).
2. Stein S., Okal E. A. Speed and size of the Sumatra earthquake. *Nature*. 2005; 434 (7033): 581–582.
3. Tsai V. C., Nettles M., Ekström G., Dziewonski A. M. Multiple CMT source analysis of the 2004 Sumatra earthquake. *Geophys. Res. Letters*. 2005; 32(17): L17304.
4. Park J., Song T.-R. A., Tromp J., et al. Earth's free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*. 2005; 308(7044): 1139–1144.
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.  
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; 412(1): 104–106.
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 of tsunamigenic earthquakes definition. *Doklady Earth Sciences*. 2007; 417(1): 1261–1264.  
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; 417(1): 109–112.
7. Dolgikh G. I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters. *Technical Physics Letters*. 2011; 37(3): 204–206.  
Долгих Г. И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов. *Письма в ЖТФ*. 2011; 37(5): 24–30.
8. Okada Y. Simulated empirical law of coseismic crustal deformation. *J. Phys. Earth*. 1995; 43: 697–713.
9. Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V. Super-low-frequency laser instrument for measuring hydrosphere pressure variations. *Journal of Marine Science and Technology*. 2009; 14(4): 436–442. DOI: 10.1080/10804008.2009.10779911

## АВТОРЫ

- Григорий Иванович Долгих, д. ф. - м. н., академик РАН, лаб. физики геосфер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия; e-mail: [dolgikh@poi.dvo.ru](mailto:dolgikh@poi.dvo.ru).  
ORCID: 0000-0002-2806-3834
- Станислав Григорьевич Долгих, к. ф. - м. н., лаб. физики геосфер, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия; e-mail: [sdolgikh@poi.dvo.ru](mailto:sdolgikh@poi.dvo.ru).  
ORCID: 0000-0001-9828-5929

is several orders of magnitude better than the limit value for DART bottom receivers.

## CONCLUSION

When comparing the results of processing the data of a laser strainmeter, which recorded signals from two nearby powerful earthquakes, it can be noted that, judging by the main spectral peaks of the initial sections of their records (10 and 16 s), the lengths of breaks in the earthquake foci were approximately the same. In the record of the tsunamigenic earthquake, a strain jump of the order of  $0.32 \cdot 10^{-6}$  is observed, which is proportional to the displacement at the base of the strainmeter (52.5 m), equal to about 17  $\mu\text{m}$ . The strain jump occurred some time after the onset of the earthquake. This strain jump was formed by the displacement of the seabed at the epicenter of the earthquake, which led to the formation of the tsunami. Similar jumps in strain on laser strainmeters were observed earlier during the registration of tsunamigenic earthquakes and they always appeared some short time after the onset of earthquakes [5, 6]. These strain jumps are an indisputable indicator of a tsunamigenic earthquake.

The paper describes the capabilities of a laser gauge of hydrospheric pressure variations intended for recording sea level fluctuations caused by various processes, including those associated with displacements of the seabed, leading to the formation of a tsunami. Unlike bottom DART receivers, which are currently used as the main recorders of this kind, laser meters of hydrospheric pressure variations placed on the bottom can measure sea level changes with an accuracy of about 0.2  $\mu\text{m}$ , which is several orders of magnitude better than all similar measuring systems.

*This research was carried out with partial financial support from the RFBR grant (18-05-80011, hazardous phenomena) and the topic “Study of the Fundamental Bases of the Emergence, Development, Transformation and Interaction of Hydroacoustic, Hydrophysical and Geophysical Fields in the World Ocean”.*

## AUTHORS

- Grigory Ivanovich Dolgikh, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Physics of Geospheres, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;  
e-mail: [dolgikh@poi.dvo.ru](mailto:dolgikh@poi.dvo.ru).  
ORCID: 0000-0002-2806-3834
- Stanislav Grigorievich Dolgikh, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Laboratory of Physics of Geospheres, V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;  
e-mail: [sdolgikh@poi.dvo.ru](mailto:sdolgikh@poi.dvo.ru).  
ORCID: 0000-0001-9828-5929