



Особенности применения лазерных деформографов классического и маятникового типов

Г. И. Долгих, С. Г. Долгих, В. В. Овчаренко, В. А. Чупин, В. А. Швеи, С. В. Яковенко

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

Рассмотрены особенности применения лазерных деформографов маятникового и классического типов на примере регистрации гидроакустических колебаний, создаваемых на шельфе Японского моря низкочастотным гидроакустическим излучателем с центральной частотой 22 Гц. При анализе полученных экспериментальных данных установлены не только соотношения принимаемых амплитуд сейсмоакустических колебаний лазерными деформографами, но и определены примерные скорости распространения данных возмущений в верхнем слое земной коры.

Ключевые слова: лазерный деформограф классического типа, лазерный деформограф маятникового типа, низкочастотный гидроакустический излучатель, гидроакустический сигнал, сейсмоакустический сигнал.

Статья получена: 24.09.2021

Статья принята: 08.10.2021

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании природы возникновения и развития деформационных процессов Земли инфразвукового и звукового диапазонов большое значение имеют экспериментальные данные,

Features of The Use of Laser Deformographs of Classical and Pendulum Types

G. I. Dolgikh, S. G. Dolgikh, V. V. Ovcharenko, V. A. Chupin, V. A. Shvets, S. V. Yakovenko

V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

The features of the application of laser strainmeters of the pendulum and classical types are considered on the example of recording hydroacoustic vibrations created on the shelf of the Sea of Japan by a low-frequency hydroacoustic emitter with a central frequency of 22 Hz. When analyzing the obtained experimental data, not only the ratios of the received amplitudes of seismic-acoustic vibrations by these laser strainmeters are established, but also the approximate propagation velocities of these disturbances in the upper layer of the Earth's crust are determined.

Keywords: classical-type laser strainmeter, pendulum-type laser strainmeter, low-frequency hydroacoustic emitter, hydroacoustic signal, seismic-acoustic signal.

Received on: 24.09.2021

Accepted on: 08.10.2021

INTRODUCTION

In studying the nature of the emergence and development of the Earth's deformation processes in the infrasonic and sound ranges, experimental data obtained on good equipment with high sensitivity with wide frequency and dynamic ranges are of great importance. In the infrasonic region of the spectrum, fiber, rod and wire strainmeters [1-3] were created, with the help of which the natural vibrations of the Earth were experimentally detected for the first time. In the sound range, the most common receiving systems are various seismographs created on all

полученные на хорошей аппаратуре, обладающей высокой чувствительностью с широкими частотным и динамическим диапазонами. В инфразвуковой области спектра были созданы волоконные, штанговые и проволочные деформографы [1-3], с помощью которых впервые экспериментально были обнаружены собственные колебания Земли. В звуковом диапазоне наиболее распространёнными приёмными системами являются различные сейсмографы, созданные на всевозможных физических принципах, обладающих относительно узким диапазоном частот, но способные выделять даже длиннопериодные колебания Земли [4]. В последние пятьдесят лет на основе интерферометров Майкельсона и Фабри-Перо разработаны и созданы различные лазерные деформографы, обладающие значительно лучшими техническими характеристиками по сравнению с штанговыми, проволочными и кварцевыми деформографами [5-7]. Лазерные деформографы созданы в различных вариантах: однокоординатные и двухкоординатные, равноплечие и неравноплечие, мобильные и стационарные. Все указанные лазерные деформографы можно отнести к так называемым лазерным деформографам классического типа. С помощью лазерных деформографов классического типа выделены деформационные аномалии, по величине которых, с учётом расстояния до происшедших землетрясений, можно определить величину смещений морского дна, приводящих к образованию цунами [8]. На основе полученных результатов обоснован деформационный метод определения цунамигенности землетрясений [9]. Применение лазерных деформографов в гидроакустике [10] и океанологии [11] позволило получить выдающиеся результаты пионерского характера. Все лазерные деформографы классического типа имеют линейную амплитудно-частотную характеристику в инфразвуковом и низкочастотном звуковом диапазонах, но начиная с некоторых частот, которая зависит от длины регистрируемой волны и длины рабочего плеча лазерного деформографа, в более высокочастотном диапазоне их амплитудно-частотная характеристика испытывает биения [12]. С целью повышения чувствительности лазерных деформографов и получения линейной амплитудно-частотной характеристики в высокочастотном диапазоне разработаны лазерные деформографы маятникового типа, применение которых в гидроакустических исследованиях позволит получить более хорошие результаты.

sorts of physical principles that have a relatively narrow frequency range, but are capable of detecting even long-period oscillations of the Earth [4]. In the last fifty years, based on Michelson and Fabry-Perot interferometers, various laser strainmeters have been developed and created, which have significantly better technical characteristics in comparison with rod, wire and quartz strainmeters [5-7]. Laser strainmeters have been created in various versions: one-dimensional and two-dimensional, equal and unequal, mobile and stationary. All of these laser strainmeters can be classified as so-called classical-type laser strainmeters. With the help of laser strainmeters of the classical type, deformation anomalies are distinguished, according to the magnitude of which, taking into account the distance to the occurred earthquakes, it is possible to determine the magnitude of the displacements of the seabed, leading to the formation of a tsunami [8]. Based on the results obtained, the deformation method for determining the tsunamigenicity of earthquakes has been substantiated [9]. The use of laser strainmeters in hydroacoustics [10] and oceanology [11] has made it possible to obtain outstanding results of a pioneering nature. All laser strainmeters of the classical type have a linear amplitude-frequency characteristic in the infrasonic and low-frequency sound ranges, but starting from some frequencies, which depends on the recorded wavelength and the length of the working arm of the laser strainmeter, in a higher frequency range their amplitude-frequency characteristic experiences beats [12]. In order to increase the sensitivity of laser strainmeters and obtain a linear amplitude-frequency response in the high-frequency range, pendulum-type laser strainmeters have been developed, the use of which in hydroacoustic studies will allow obtaining better results.

This article analyzes the results obtained during synchronous measurements by laser strainmeters of classical and pendulum types of seismoacoustic vibrations created in an elastic medium as a result of the transformation of hydroacoustic vibrations generated by a low-frequency hydroacoustic emitter at a frequency of 22 Hz.

EXPERIMENT

Experimental studies involved: a low-frequency hydroacoustic emitter with a central radiation frequency of 22 Hz, a classical-type laser strainmeter with a measuring arm length of 52.5 m, a pendulum-type laser strainmeter with a measuring arm length of 52.2 m.

A low-frequency hydroacoustic emitter is part of a 19-26 Hz radiating hydroacoustic system [13]. The



В данной статье анализируются результаты, полученные при проведении синхронных измерений лазерными деформографами классического и маятникового типов сейсмоакустических колебаний, созданных в упругой среде в результате трансформации гидроакустических колебаний, генерируемых низкочастотным гидроакустическим излучателем на частоте 22 Гц.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментальных исследованиях были задействованы: низкочастотный гидроакустический излучатель с центральной частотой излучения 22 Гц, лазерный деформограф классического типа с длиной измерительного плеча 52,5 м, лазерный деформограф маятникового типа с длиной измерительного плеча 52,2 м.

Низкочастотный гидроакустический излучатель входит в состав излучающей гидроакустической системы на 19–26 Гц [13]. Излучающая гидроакустическая система предназначена для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов в полосе частот порядка 1 Гц при центральной частоте полосы в диапазоне 19–26 Гц. Амплитуда объемных колебательных смещений излучателя достигает величину 0,0123 м³. На частоте 20 Гц в безграничном водном пространстве это соответствует излучаемой акустической мощности 1000 Вт. В состав излучающей гидроакустической системы входят: излучатель с электромагнитным преобразователем, рама для подвеса излучателя, кабель-шланг с контрольным манометром, источник электропитания, электронасос, контрольный гидрофон, два калибровочных акселерометра.

Излучатель имеет массу 260 кг в воздухе и 40 кг в воде. Содержит цилиндрический корпус и пару излучающих поршней, колеблющихся во взаимно противоположных направлениях и создающих синфазные потоки объемной колебательной скорости. Колебания возбуждает преобразователь электромагнитного типа с П-образными наборными половинками сердечника и четырьмя катушками. Между краями поршней зажат набор из 312 цилиндрических пружин, предварительное сжатие которых достигается за счет пониженного на 0,5 атм. давления воздуха в полости излучателя относительно гидростатического на глубине его погружения. Для компенсации гидростатического давления при погружении или поднятии применяется шланг длиной 60 м с контрольным манометром и двумя ниппелями. Зазоры между фланцами корпуса и краями поршней уплотнены резинот-

emitting hydroacoustic system is designed to generate harmonic and phase-shift keyed hydroacoustic signals in a frequency band of about 1 Hz with a central frequency of the band in the range of 19–26 Hz. The amplitude of the volumetric vibrational displacements of the emitter reaches a value of 0.0123 m³. At a frequency of 20 Hz in a limitless body of water, this corresponds to a radiated acoustic power of 1000 W. The composition of the emitting hydroacoustic system includes: a radiator with an electromagnetic transducer, a frame for hanging the radiator, a cable-hose with a control pressure gauge, a power supply, an electric pump, a control hydrophone, two calibration accelerometers.

The emitter has a mass of 260 kg in air and 40 kg in water. Contains a cylindrical body and a pair of radiating pistons oscillating in mutually opposite directions and creating in-phase flows of the volumetric oscillatory velocity. Oscillations are excited by an electromagnetic converter with U-shaped typesetting halves of the core and four coils. A set of 312 cylindrical springs is clamped between the edges of the pistons, the preliminary compression of which is achieved due to a reduced pressure of 0.5 atm. air pressure in the cavity of the emitter relative to the hydrostatic pressure at the depth of its immersion. To compensate for hydrostatic pressure when submerging or lifting, a 60 m hose with a test pressure gauge and two nipples is used. The gaps between the body flanges and the piston edges are sealed with rubber-fabric collars. A battery of series-connected (in the amount of 3 to 22 pieces, depending on the required power) acid batteries with a voltage of 12 V and a capacity of 90 A*h is used as the primary sources of direct current. The power supply is a bridge key amplifier based on two half-bridge IGBT modules, equipped with a 420 μF compensating capacitor bank, a circuit breaker and a DC ammeter. In the course of the experiment, a harmonic signal was emitted at a radiation frequency of 22 Hz.

A classical-type laser strainmeter with a measuring arm length of 52.5 m is located at Cape Schultz in a hydrothermally insulated underground room at a depth of 3–5 m from the Earth's surface. It uses a frequency stabilized helium-neon laser with short-term stability in the tenth decimal place as a light source. The measuring arm of a classical-type laser strainmeter is oriented at an angle of 18° relative to the north-south line. The main interference unit of the laser strainmeter is mounted on a concrete pedestal about 3 m long, the base of which is fixed on a rock of high density loam. The corner reflector is mounted on a concrete pedestal 1 m long, the base of which is

каневыми воротниками. В качестве первичных источников постоянного тока используется батарея последовательно соединенных (в количестве от 3 до 22 штук, в зависимости от необходимой мощности) кислотных аккумуляторов напряжением по 12 В, емкостью 90 А·ч. Источник питания представляет собой мостовой ключевой усилитель, выполненный на двух полумостовых IGBT-модулях, снабжен компенсирующей батареей конденсаторов 420 мкФ, защитным автоматом и амперметром постоянного тока. В ходе работы эксперимента излучался гармонический сигнал на частоте излучения 22 Гц.

Лазерный деформограф классического типа с длиной измерительного плеча 52,5 м расположен на м. Шульца в гидротермоизолированном подземном помещении на глубине 3–5 м от поверхности Земли. В качестве источника света в нем используется частотно стабилизированный гелий-неоновый лазер с кратковременной стабильностью в десятом знаке. Измерительное плечо лазерного деформографа классического типа ориентировано под углом 18° относительно линии «север-юг». Основной интерференционный узел лазерного деформографа смонтирован на бетонной тумбе длиной около 3 м, основание которой закреплено на породе из суглинка большой плотности. Угловой отражатель смонтирован на бетонной тумбе длиной 1 м, основание которой закреплено на гранитной скале. Вся полученная информация в режиме реального времени поступает в лабораторное помещение, где после предварительной обработки, фильтрации и децимации, заносится в ранее созданную базу экспериментальных данных.

Лазерный деформограф маятникового типа с длиной измерительного плеча 52,5 м расположен в том же гидротермоизолированном подземном помещении на глубине 3–5 м от поверхности Земли. В качестве источника света в нём используется частотно стабилизированный гелий-неоновый лазер с кратковременной стабильностью в десятом знаке. Измерительное плечо лазерного деформографа маятникового типа ориентировано под углом 18° относительно линии «север-юг». Основной интерференционный узел лазерного деформографа смонтирован на той же бетонной тумбе, что и лазерного деформографа классического типа. Угловой отражатель смонтирован на массивном кубе, который входит в состав маятниковой системы. Длина подвески маятника равна около 3 м. Если принять данную маятниковую систему за математический маятник, то соб-

fixed on a granite rock. All the information obtained in real time goes to the laboratory room, where, after preliminary processing, filtration and decimation, it is entered into the previously created experimental database.

A pendulum-type laser strainmeter with a measuring arm length of 52.5 m is located in the same hydrothermally insulated underground room at a depth of 3–5 m from the Earth's surface. It uses a frequency stabilized helium-neon laser with short-term stability in the tenth decimal place as a light source. The measuring arm of the pendulum-type laser strainmeter is oriented at an angle of 18° relative to the north-south line. The main interference unit of the laser strainmeter is mounted on the same concrete pedestal as the classical-type laser strainmeter. The corner reflector is mounted on a massive cube, which is part of the pendulum system. The length of the pendulum suspension is about 3 m. If we take this pendulum system for a mathematical pendulum, then the natural frequency of the pendulum system will be about 0.3 Hz. All the information received in real time goes to the laboratory room, where, after preliminary processing, filtration and decimation, is entered into the previously created experimental database.

Fig. 1 shows a map showing the scheme of the experiment, where No. 1 denotes Cape Schulz, on which the laser strainmeters are located, point No. 2 denotes the operation of the emitter at a frequency of 22 Hz at a depth of 18 m (N42°32.448, E131°02.998), point No. 3 denotes the operation of the emitter at a frequency of 22 Hz at a depth of 18 m (N42°29.657, E131°07.528).

PROCESSING AND ANALYSIS OF THE OBTAINED EXPERIMENTAL DATA

The experimental data were placed into the experimental database with a sampling rate of 1000 Hz. During processing, the data were filtered in order to eliminate the possible influence of powerful high-frequency components on the results of spectral processing, followed by decimation up to a sampling rate of 200 Hz. Synchronous areas of recordings of a classical-type laser strainmeter and a pendulum-type laser strainmeter were processed. Fig. 2 shows the spectra obtained during the processing of synchronous experimental data of the indicated laser strainmeters during the operation of a low-frequency hydroacoustic emitter at station 3. As can be seen from this figure, the magnitude of the received seismoacoustic signal at the radiation frequency of the hydroacoustic signal of a pendulum-type laser strainmeter is much greater (by almost an order of magnitude) than

ственная частота маятниковой системы будет равна около 0,3 Гц. Вся полученная информация в режиме реального времени поступает в лабораторное помещение, где после предварительной обработки, фильтрация и децимация, заносится в ранее созданную базу экспериментальных данных.

На рис. 1 приведена карта, на которой представлена схема эксперимента, где под № 1 обозначен м. Шульца, на котором расположены лазерные деформографы, точкой № 2 – работа излучателя на частоте 22 Гц на глубине 18 м (N42°32.448, E131°02.998), точкой № 3 – работа излучателя на частоте 22 Гц на глубине 18 м (N42°29.657, E131°07.528).



Рис. 1. Карта-схема эксперимента
Fig. 1. The map is a diagram of the experiment

ОБРОТКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные данные помещались в базу экспериментальных данных с частотой дискретизации 1000 Гц. При обработке данные подвергались фильтрации с целью ликвидации возможного влияния мощных высокочастотных компонент на результаты спектральной обработки с последующим прореживанием до частоты дискретизации 200 Гц. Обработывались синхронные участки записей классического лазерного деформографа и лазерного деформографа маятникового типов. На рис. 2 приведены спектры, полученные при обработке синхронных экспериментальных данных указанных лазерных деформографов при работе низкочастотного гидроакустического излучателя на станции 3. Как видно из этого рисунка, величина принятого сейсмоакустического сигнала на частоте излучения гидроакустического сигнала лазерного деформографа маятникового типа значительно больше (почти на порядок) величины сигнала, принятого лазерным деформографом классического типа.

В соответствии с работой [12] приведём уравнение, описывающее зарегистрированное смещение лазерного деформографа классического типа:

$$u \equiv \Delta L = 2A_0 \sin^2\left(\frac{kL}{2}\right) \sin\left(\omega t - kx_1 - \frac{kL}{2}\right), \quad (1)$$

the signal value, accepted by a classical-type laser strainmeter.

In accordance with work [12], we present an equation describing the registered displacement of a classical-type laser strainmeter:

$$u \equiv \Delta L = 2A_0 \sin^2\left(\frac{kL}{2}\right) \sin\left(\omega t - kx_1 - \frac{kL}{2}\right), \quad (1)$$

where: u is the displacement at a point x_1 , A_0 is the projection of the wave amplitude onto the axis of the strainmeter, $k = 2\pi/\lambda$ is the wave number, λ is the wavelength, $\omega = 2\pi\nu$ is the cyclic frequency, ν is the frequency of the wave, t is the current time, L is the length of the working arm of the strainmeter, and x_1 is the coordinate of the first abutment of the strainmeter. In article [12], when editing, the second degree was lost with a sine. That is, the amplitude recorded by a classical-type laser strainmeter will be equal to:

$$A = 2A_0 \sin^2\left(\frac{kL}{2}\right) = 2A_0 \sin^2\left(\frac{\pi L}{\lambda}\right). \quad (2)$$

In accordance with Eq. (2), the recorded amplitude strongly depends on the ratio of the working arm length of a classical-type laser strainmeter and the seismoacoustic wavelength. At low frequencies, the frequency response is linear. At high frequencies, the amplitude varies from 0 to $2A_0$ depending on the ratio of the arm length of the laser strainmeter to the recorded wavelength.



где: u – смещение в точке x_1 , A_0 – проекция амплитуды волны на ось деформографа, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $\omega=2\pi\nu$ – циклическая частота, ν – частота волны, t – текущее время, L – длина рабочего плеча деформографа, x_1 – координата первого устоя деформографа. В статье [12] при редактировании утеряна вторая степень при синусе. То есть регистрируемая лазерным деформографом классического типа амплитуда будет равна:

$$A = 2A_0 \sin^2\left(\frac{kL}{2}\right) = 2A_0 \sin^2\left(\frac{\pi L}{\lambda}\right). \quad (2)$$

В соответствии с уравнением (2) регистрируемая амплитуда сильно зависит от соотношения длины рабочего плеча лазерного деформографа классического типа и длины сейсмоакустической волны. На низких частотах амплитудно-частотная характеристика линейная. На высоких частотах амплитуда меняется от 0 до $2A_0$ в зависимости от отношения длины плеча лазерного деформографа к длине регистрируемой волны.

Для лазерного деформографа маятникового типа регистрируемое смещение можно записать в виде:

For a pendulum-type laser strainmeter, the recorded displacement can be written as:

$$\Delta L = A_0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} \times \\ \times \cos\left(kx_1 + kL - \omega t + \arctg\left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)\right) - \\ - \cos(kx_1 - \omega t) \end{array} \right\}, \quad (3)$$

where $\gamma = \omega_0/2Q$, i. e. they recorded the amplitude of the wave depends on the L , λ , ν_0 and Q , Q is the quality factor of the pendulum system. The amplitude in this case can be written as:

$$A = A_0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} \times \\ \times \cos\left(kL + \arctg\left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)\right) - 1 \end{array} \right\}. \quad (4)$$

In the low-frequency (infrasonic) region of the spectrum, the characteristic of a pendulum-type laser strainmeter is identical to a classical-type laser strainmeter, and in the high-frequency region of the spec-

Современным компаниям – инновационные решения!

Диодная лазерная система повышенной мощности DLC DL pro HP 461 нм для охлаждения атомов стронция

Компания **ТОРТИСА** (Германия) анонсировала выход новой модели диодной лазерной системы для охлаждения атомов стронция **DLC DL pro HP 461**, с **увеличенной на 50%** выходной мощностью, по сравнению с предыдущей моделью **DLC DL pro 461**. Параллельно, увидела свет и модель **MDL pro HP 461** для монтажа в 19-ти дюймовую стойку. Выходная мощность настольной модели составляет величину **170 мВт**, а **MDL – 90 мВт**. Для многих пользователей, появление этих моделей – долгожданное решение. Для тех, кому величина выходной мощности, по-прежнему является недостаточной, остается вариант лазерной системы **DLC SR COOLING** с удвоением частоты (**DLC TA-SHG pro 461**), имеющей выходную мощность **800 мВт**.

Эксклюзивным представителем компании **ТОРТИСА** (Германия) в РФ является компания «ЕвроЛэйз».

www.eurolase.ru

$$\Delta L = A_0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} \times \\ \times \cos\left(kx_1 + kL - \omega t + \arctg\left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)\right) \\ - \cos(kx_1 - \omega t) \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где $\gamma = \omega_0/2Q$, то есть регистрируемая им амплитуда волны зависит от L , λ , v_0 и Q , Q – добротность маятниковой системы. Амплитуду в этом случае можно записать в виде:

$$A = A_0 \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} \times \\ \times \cos\left(kL + \arctg\left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)\right) - 1 \end{array} \right\}. \quad (4)$$

В низкочастотной (инфразвуковой) области спектра характеристика лазерного деформографа маятникового типа идентична лазерному деформографу классического исполнения, а в высокочастотной области спектра лазерный деформограф маятникового типа способен проводить измерения на всех частотах и с увеличением частоты регистрировать абсолютную амплитуду волны. Для данного лазерного деформографа маятникового типа, обладающего собственной частотой 0,3 Гц, не определена добротность, но тем не менее мы можем эффективно провести обработку полученных экспериментальных данных с оценкой чувствительностей лазерных деформографов маятникового и классического типов, представленных в данной статье.

При работе низкочастотного гидроакустического излучателя на станции 2 отношение амплитуд сейсмоакустических сигналов на частоте гидроакустических сигналов 22 Гц, принятых лазерным деформографом классического типа, к амплитудам сейсмоакустических сигналов, принятых лазерным деформографом маятникового типа, в среднем равно 0,15. При работе низкочастотного гидроакустического излучателя на станции 3 отношение амплитуд сейсмоакустических сигналов на частоте гидроакустических сигналов 22 Гц, принятых лазерным деформографом классического типа, к амплитудам сейсмоакустических сигналов, принятых лазерным деформографом маятникового типа, в среднем равно 0,12.

По полученным экспериментальным данным на лазерном деформографе маятникового типа

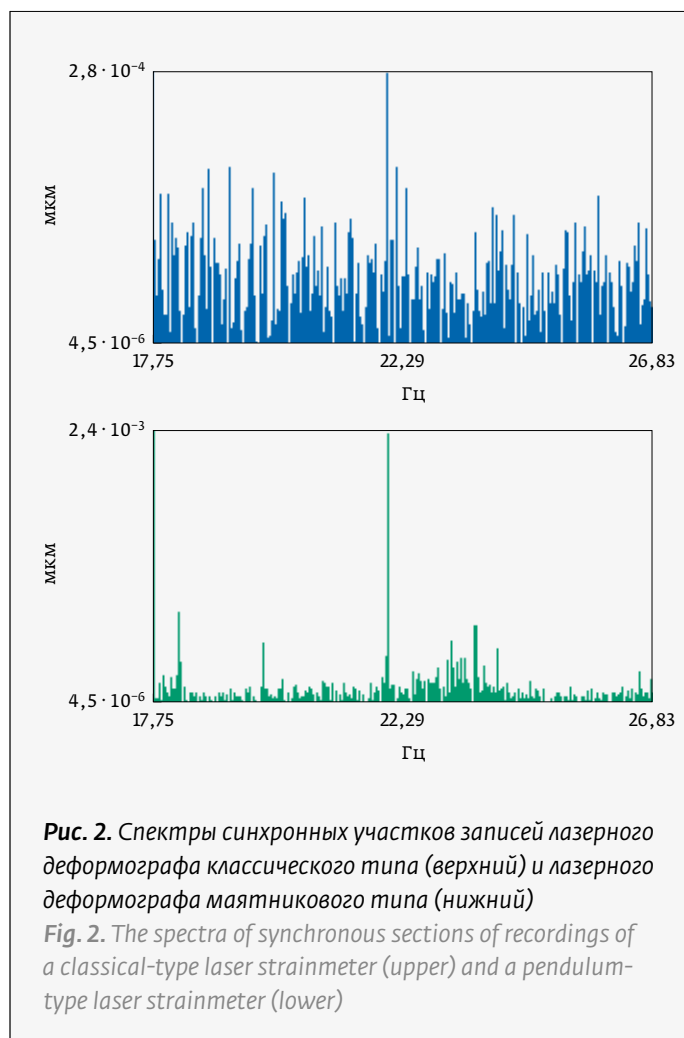


Рис. 2. Спектры синхронных участков записей лазерного деформографа классического типа (верхний) и лазерного деформографа маятникового типа (нижний)

Fig. 2. The spectra of synchronous sections of recordings of a classical-type laser strainmeter (upper) and a pendulum-type laser strainmeter (lower)

trum, a pendulum-type laser strainmeter is capable of measuring at all frequencies and registering the absolute wave amplitude with increasing frequency. For this pendulum-type laser strainmeter, which has a natural frequency of 0.3 Hz, the Q -factor has not been determined, but nevertheless, we can effectively process the obtained experimental data with an assessment of the sensitivity of the pendulum and classical-type laser strainmeters presented in this article.

When a low-frequency hydroacoustic emitter is operating at station 2, the ratio of the amplitudes of seismoacoustic signals at a frequency of 22 Hz hydroacoustic signals received by a classical-type laser strainmeter to the amplitudes of seismoacoustic signals received by a pendulum laser strainmeter is on average 0.15. When a low-frequency hydroacoustic emitter is operating at station 3, the ratio of the amplitudes of seismoacoustic signals at a frequency of 22 Hz hydroacoustic signals received by a classical-type laser strainmeter to the amplitudes of seismoacoustic signals received by a pendulum-type laser strainmeter is on average equal to 0.12.

можно определить примерную амплитуду сейсмоакустической волны, распространяющейся в земной коре в результате трансформации излученного гидроакустического сигнала на частоте 22 Гц в сейсмоакустический сигнал на границе «вода – дно». Так, например, согласно графикам, приведённым на рис. 2, амплитуда сигнала, зарегистрированная лазерным деформографом маятникового типа, равна $2,4 \cdot 10^{-3}$ мкм. Линия «станция 3 – лазерный деформограф маятникового типа» ориентирована под углом $2,5^\circ$ относительно оси деформографов маятникового и классического типов. С учетом этого можно утверждать, что амплитуда сейсмоакустического сигнала в точке регистрации равна не меньше $2,4 \cdot 10^{-3}$ мкм.

При работе гидроакустического излучателя в точке 2 величина принятого лазерным деформографом маятникового типа сейсмоакустического сигнала на частоте излученного гидроакустического сигнала 22 Гц равна $1,96 \cdot 10^{-3}$ мкм. Линия «станция 2 – лазерный деформограф маятникового типа» ориентирована под углом 45° относительно оси деформографов маятникового и классического типов. С учётом этого можно утверждать, что амплитуда сейсмоакустического сигнала в точке регистрации равна не меньше $2,3 \cdot 10^{-3}$ мкм.

Based on the experimental data obtained on a pendulum-type laser strainmeter, it is possible to determine the approximate amplitude of a seismoacoustic wave propagating in the earth's crust as a result of the transformation of the emitted hydroacoustic signal at a frequency of 22 Hz into a seismoacoustic signal at the "water-bottom" boundary. Thus, for example, according to the graphs shown in Fig. 2, the signal amplitude recorded by a pendulum-type laser strainmeter is $2.4 \cdot 10^{-3}$ μm . The line "station 3 – pendulum-type laser strainmeter" is oriented at an angle of 2.5° relative to the axis of the pendulum and classical strain gauges. Taking this into account, it can be argued that the amplitude of the seismoacoustic signal at the registration point is not less than $2.4 \cdot 10^{-3}$ μm .

When the hydroacoustic emitter is operating at point 2, the magnitude of the seismoacoustic signal received by the laser strainmeter of the pendulum type at the frequency of the emitted hydroacoustic signal of 22 Hz is $1.96 \cdot 10^{-3}$ μm . The line "station 2 – pendulum-type laser strainmeter" is oriented at an angle of 45° relative to the axis of the pendulum and classical strain gauges. Taking this into account, it can be argued that the amplitude of the seismoacoustic signal at the registration point is not less than $2.3 \cdot 10^{-3}$ μm .

Серия «Quantaurus»




Флуоресцентные материалы

Квантовые точки

OLED материалы

Фотоэлектрические материалы

Светодиодные люминофоры

Металлоорганические комплексы

Основные черты:

- Измерение времени жизни флуоресценции до 100 пикосекунд (методом деконволюции)
- Семь светодиодов с различными длинами волн для оптического возбуждения
- Полностью автоматизированные измерения
- Анализ времени жизни до пяти экспонент

Применение:

- Определение характеристик светоизлучающих материалов
- Исследование флуоресцентных образцов и квантовых точек
- Исследование металлоорганических комплексов

HAMAMATSU
 PHOTON IS OUR BUSINESS
www.hamamatsu.com
 Представительство Hamamatsu Photonics в России и СНГ
 Тел: +7 (495) 258-85-18, E-mail: info@hamamatsu.ru



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с вышесказанным мы можем утверждать, что чувствительность лазерного деформографа маятникового типа на данной частоте (22 Гц) почти на порядок лучше чувствительности лазерного деформографа классического типа. При этом амплитуда принятого сейсмоакустического сигнала лазерным деформографом классического типа на двух станциях в среднем равна 0,15 и 0,12 от амплитуды принятого лазерным деформографом маятникового типа сейсмоакустического сигнала на частоте излученного гидроакустического сигнала (22 Гц). Такое соотношение может быть получено при скорости распространения сейсмоакустической волны с частотой 22 Гц, находящейся в пределах 1250–1300 м/с, вычисленное при использовании уравнения (2). При этом мы считаем, что регистрируемая сейсмоакустическая волна относится к поверхностной волне рэлеевского типа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старовойт О. Е., Феofilaktov В. Д., Шульгин Л. Л., Ярошевич М. И. Кварцевый деформограф центральной сейсмологической обсерватории «Обнинск». *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1971;11: 85–94.
2. Bilham R. G. The location of Earth strain instrumentation. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* A. 1973; 274:429–433.
3. Латынина Л. А., Кармалева Р. М. *Деформографические измерения*. – М.: Наука. 1978. 154 с.
4. Петрова Л. Н., Линьков Е. М. Спектры длиннопериодных колебаний, предвещающих землетрясения. – Уч. Зам. ЛГУ. Л. 1978;27(392):60–66.
5. Bilham R. G. The location of Earth strain instrumentation. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* A. 1973; 74: 429–433.
6. Алешин В. А., Дубров М. Н., Яковлев А. П. Лазерный интерферометр для измерения деформаций земной коры. *ДАН СССР*. 1980;256(6): 1343–1346.
7. Долгих Г. И., Копвиллем У. Х., Павлов А. Н. Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформометром. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1983; 2:15–20.
8. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалёв С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Швец В. А., Яковенко С. В. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом. *Доклады Академии наук*. 2007;412(1):104–106.
9. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалёв С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Швец В. А., Яковенко С. В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений. *Доклады Академии наук*. 2007;417(1):109–112.
10. Давыдов А. В., Долгих Г. И. Применение лазерных деформографов в гидроакустике. *Акустический журнал*. 1995;41(2): 235–239.
11. Алексеев А. В., Валентин Д. И., Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалёв С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В., Холодкевич Е. Д., Швец В. А., Яковенко С. В. Регистрация инфрагравитационных волн на границе

CONCLUSION

In accordance with the above, we can assert that the sensitivity of a pendulum-type laser strainmeter at a given frequency (22 Hz) is almost an order of magnitude better than the sensitivity of a classical-type laser strainmeter. In this case, the amplitude of the received seismoacoustic signal by the classical-type laser strainmeter at two stations is on average 0.15 and 0.12 of the amplitude of the pendulum-type seismoacoustic signal received by the laser strainmeter at the frequency of the emitted hydroacoustic signal (22 Hz). This relationship can be obtained when the propagation speed of a seismoacoustic wave with a frequency of 22 Hz, which is in the range of 1250–1300 m/s, calculated using equation (2). At the same time, we believe that the recorded seismoacoustic wave refers to a surface wave of the Rayleigh type.

FUNDING

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the topic of the state task is “Studying the fundamental foundations of the emergence, development, transformation and interaction of hydroacoustic, hydrophysical and geophysical fields in the World Ocean”).

REFERENCES

1. Starovoit O. E., Feofilaktov V. D., Shulgin L. L., Yaroshevich M. I. Quartz strainmeter of the central seismological observatory «Obninsk». *Izvestiya AN SSSR. Physics of the Earth*. 1971;11:85–94.
2. Bilham R. G. The location of Earth strain instrumentation. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* A. 1973; 274: 429–433.
3. Latynina L. A., Karmaleeva R. M. *Deformographic measurements*. – M.: Science. 1978. 154 p.
4. Petrova L. N., Linkov E. M. Spectra of long-period oscillations preceding earthquakes. *Uch. Deputy LSU. L.* 1978;27(392):60–66.
5. Bilham R. G. The location of Earth strain instrumentation. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* A. 1973;274:429–433.
6. Aleshin V. A., Dubrov M. N., Yakovlev A. P. Lazernyy interferometr dlya izmereniya deformatsiy zemnoy kory. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1980;256(6):1343–1346.
7. Dolgikh G. I., Kopvillem U. Kh., Pavlov A. N. Measurement of the Earth free oscillation periods with a laser strainmeter. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli*. 1983;2: 15–20.
8. 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.
9. 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.
10. Davydov A. V., Dolgikh G. I., Kabanov N. F. Hydroacoustic applications of laser deformographs. *Acoustical physics*. 1995; 41(2):201–204.
11. Alekseev A. V., Valentin D. I., Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Koren I. A., Ovcharenko V. V., Kholodkevich E. D., Shvets V. A., Yakovenko S. V. Registration of infragravity waves at the hydrosphere-lithosphere boundary using coastal laser strainmeter. *Doklady Earth Sciences*. 2003;389(2):291–293.
12. Dolgikh G. I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters. *Technical Physics Letters*. 2011;37(3):204–206.



- гидросфера-литосфера береговым лазерным деформографом. *Доклады Академии наук*. 2003;389(2): 244–246.
12. Долгих Г. И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов. *Письма в журнал технической физики*. 2011;37(5): 24–30.
13. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Пивоваров А. А., Самченко А. Н., Швырев А. Н., Чупин В. А., Яковенко С. В., Ярошук И. О. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19–26 Гц. *Приборы и техника эксперимента*. 2017; 4: 137–141.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорий Иванович Долгих, д. ф.- м. н., академик РАН, dolgikh@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0002-2806-3834

Станислав Григорьевич Долгих, к. ф.- м. н., sdolgikh@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0001-9828-5929

Владимир Владимирович Овчаренко, к. ф.- м. н., ovcharenko@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0001-7784-2140

Владимир Александрович Чупин, к. ф.- м. н., chupin@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0001-5103-8138

Вячеслав Александрович Швец, к. т. н., vshv@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0002-4752-6865

Сергей Владимирович Яковенко, к. т. н., ser_mail@poi.dvo.ru; Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия.
ORCID: 0000-0001-8324-3849

13. Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Pivovarov A. A., Samchenko A. N., Shvyrev A. N., Chupin V. A., Yakovenko S. V. and Yaroshchuk I. O. A Hydroacoustic System that Radiates at Frequencies of 19–26 Hz. *Instruments and Experimental Techniques*. 2017;4:596–600.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigory Ivanovich Dolgikh, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, dolgikh@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

ORCID: 0000-0002-2806-3834

Stanislav Grigorievich Dolgikh, Cand. of Physical and Mathematical Sciences, sdolgikh@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

ORCID: 0000-0001-9828-5929

Vladimir Vladimirovich Ovcharenko, Cand. of Physical and Mathematical Sciences, ovcharenko@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

ORCID: 0000-0001-7784-2140

Vladimir Alexandrovich Chupin, Cand. of Physical and Mathematical Sciences, chupin@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

ORCID: 0000-0001-5103-8138

Vyacheslav Aleksandrovich Shvets, Cand. of Technical Sciences, vshv@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

ORCID: 0000-0002-4752-6865

Sergey Vladimirovich Yakovenko, Cand. of Technical Sciences, ser_mail@poi.dvo.ru; V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia.

ORCID: 0000-0001-8324-3849



<http://www.laseroptics.ru>

conference@laseroptics.ru

Тел.: +7 (812) 323 6348

Факс: +7 (812) 334 0824

XX Международная конференция

«ОПТИКА ЛАЗЕРОВ»

ICLO 2022

г. Санкт-Петербург, Россия, 20-24 июня 2022 г.

Твердотельные лазеры
Высокомощные лазеры
Полупроводниковые материалы, лазеры и устройства
Управление лазерным излучением
Сверхсильные поля и сверхбыстрые процессы
Лазеры и системы для визуализации,
зеленой фотоники и устойчивого развития
Нелинейная фотоника
Оптические наноматериалы
Лазеры на свободных электронах
Нелинейная и квантовая интегральная оптика
Биофотоника

Выставка

Официальный язык конференции – английский