



ФОТОННАЯ АНТЕННА "РОССИЯ-ТАЙВАНЬ"

Г.И. Долгих¹, академик РАН, д. ф.-м. н., В.А. Чупин¹,
к. ф.-м. н., Юй-Хунг Хяо²

¹Тихоокеанский океанологический институт им.
В. Ильинчева Дальневосточного отделения Рос-
сийской Академии наук, Владивосток

²Taiwan Ocean Research Institute, Kaohsiung, Taiwan

Приведено описание фотонной антенны "Россия-Тайвань", созданной на основе лазерных деформографов классического типа, установленных на двух полигонах России и в Тайване. Оцениваются их технические возможности по регистрации различных инфразвуковых возмущений Земли. Приведены некоторые результаты обработки экспериментальных данных, полученных при проведении комплексных испытаний лазерных деформографов.

ВВЕДЕНИЕ

С момента создания первого лазерного деформографа в ТОИ ДВО РАН [1] были проведены колоссальные работы по совершенствованию их оптических схем и повышению чувствительности, в результате чего были созданы различные лазерные деформографы: двухкоординатные [2], вертикальной и горизонтальной направленности [3], пространственно разнесенные [4] и мобильные [5]. Применение лазерных деформографов различных вариантов позволило исследовать природу разномасштабных геосферных процессов, источник генерации которых находился в атмосфере, гидросфере или литосфере. Для точной "привязки" источников генерации данных процессов к одной из геосфер с определением физики их возникновения созданы лазерно-интерференционные комплексы, состоящие из лазерных деформографов, лазерных нанобарографов и лазерных измерителей вариаций давления гидросферы. В настоящее время на морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН "м. Шульца" функционирует такой комплекс, предназначенный для изучения природы возникновения и развития инфразвуковых и низкочастотных звуковых колебаний и волн зоны перехода геосфер. На первом шаге изучения закономерностей трансформации различных волновых и не волновых процессов на границе геосфер исследования проводятся с искусственными источниками (низкочастотные гидроакустические

PHOTON ANTENNA "RUSSIA-TAIWAN"

G.I. Dolgikh¹, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, A.V. Chupin¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Yu-Hung Xiao²

¹V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok

²Taiwan Ocean Research Institute, Kaohsiung, Taiwan

The description of the photon antenna "Russia-Taiwan", created on the basis of classical-type laser deformographs, installed at two polygons in Russia and in Taiwan, is given. Their technical capabilities for recording various infrasonic perturbations of the Earth are assessed. Some results of processing of experimental data obtained during complex tests of laser deformographs are given.

INTRODUCTION

Since the creation of the first laser deformograph in the Pacific Oceanological Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences [1], tremendous work has been carried out to improve their optical schemes and increase sensitivity, resulting in the creation of various laser deformographs: two-coordinate [2], vertical and horizontal directions [3], spatially separated [4] and portable [5]. The use of laser deformographs of various variants allowed to study the nature of different-scale geospheric processes, the source of generation of which was in the atmosphere, hydrosphere or lithosphere. To accurately "bind" the sources of these processes to one of the geospheres with the definition of the physics of their occurrence, laser-interference complexes consisting of laser deformographs, laser nanobarographs and laser measuring instruments for variations in the pressure of the hydrosphere have been created. Currently, at the Marine Experimental Station of the Pacific Oceanological Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences "Schultz Cape" the complex is used to study the origin and development of infrasonic and low-frequency sound waves and waves of the geosphere transition zone. At the first stage of studying the patterns of transformation of different wave and non-wave processes at the geosphere boundary, research is conducted with artificial sources (low-frequency



и сейсмоакустические излучатели, суда, взрывы и т. п.), например [6], что позволяет более тщательно изучать данные закономерности, так как эти эксперименты можно проводить неоднократно при различных гидрологических и метеорологических условиях. На втором, важнейшем, шаге исследования проводятся на природных объектах с решением вышеперечисленных задач, но с опорой на результаты, полученные с искусственными источниками, что позволило определить первоисточник многих колебаний и волн с точной "привязкой" к одной из геосфер. Так, например, если ранее считалось, что квазигармонические колебания с периодом порядка 10–15 мин, регистрируемые на шельфе гидрофизическими приемными системами, относятся к короткопериодным внутренним волнам и генерируются на шельфе морским приливом, то обработка синхронных экспериментальных данных установок вышеуказанного комплекса позволила обнаружить, что первоисточник данных возмущений находится в атмосфере. Но происхождение многих регистрируемых колебаний и волн невозможно определить только по данным такого лазерно-интерференционного комплекса. Необходимо расширять географию размещения подобных комплексов по Земле. Главными установками в данных комплексах являются лазерные деформографы, обладающие уникальными характеристиками: рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 1000 Гц, точность измерения микросмещений 0.01 нм. С целью решения задачи по созданию данных комплексов в различных точках Земли первоначально были размещены лазерные деформографы в трех точках, две из которых находятся в России (м. Шульца Приморского края: Забайкалье, вблизи г. Краснокаменска, и на юге острова Тайвань. Работы выполнялись в рамках проекта ДВО РАН программы "Дальний Восток" конкурса совместных исследовательских проектов Дальневосточного отделения РАН и Министерства науки и технологий Тайваня. На м. Шульца функционировало два лазерных деформографа, ориентированных примерно по линиям "север–юг" и "запад–восток", на Тайване и в Забайкалье функционировало по одному лазерному деформографу. Все полученные экспериментальные данные заносились в единую базу экспериментальных данных с последующей обработкой и интерпретацией.

ЛАЗЕРНЫЕ ДЕФОРМОГРАФЫ

На морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН в месте с координатами 42,58 °СШ и 131,157 °ВД уже длительное время функционируют два лазер-

hydroacoustic and seismoacoustic emitters, ships, explosions, etc.), for example [6], which allows us to study these regularities more thoroughly, since these experiments can be carried out repeatedly under various hydrological and meteorological conditions. At the second stage, the most important one, the research is conducted on natural objects with the solution of the above problems, but with the support of the results obtained with artificial sources, which made it possible to determine the source of many oscillations and waves with an exact "binding" to one of the geospheres. For example, if it was previously thought that quasi-harmonic oscillations with a period of the order of 10–15 min recorded on the shelf by hydrophysical receiving systems belong to short-period internal waves and are generated on the shelf by the sea tide, then processing of synchronous experimental data of the facilities of the above complex allowed as to conclude, that the source of these perturbations is in the atmosphere. But the origin of many recorded oscillations and waves cannot be determined only from the data of such a laser-interference complex. It is necessary to expand the geographical distribution of such complexes over the Earth. The main installations in these complexes are laser deformographs with their unique characteristics: the operating frequency range is from 0 (conditionally) to 1000 Hz, the accuracy of measuring the microdisplacements is 0.01 nm. To solve the problem of creating these complexes in different points of the Earth, the laser deformographs were initially located at three points, two of which are in Russia (Schultz Cape, Primorskii Krai, Transbaikalia (near Krasnokamensk)) and in the south of the Taiwan. The works were carried out within the framework of the FEB of the RAS's "Far East" program of a joint research projects competition between the Far East Branch of the RAS and the Ministry of Science and Technology of Taiwan. Two laser deformographs, oriented approximately along the "north-south" and "west-east" lines, operated on the Shultz Cape, one laser deformograph operated each in Taiwan and in Transbaikalia. All the experimental data obtained were recorded in a single database of experimental data with subsequent processing and interpretation.

LASER DEFORMOGRAPHS

At the Marine Experimental Station of the Pacific Oceanological Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences in the location with the coordinates 42.58°N and 131.157°E, two laser classical-type deformographs with arm lengths of 52.5 and 17.5 m, the measuring arms of which are oriented with respect to the north-south line at an angle

ных деформографа классического типа с длинами плеч 52,5 и 17,5 м, измерительные плечи которых ориентированы относительно линии "север-юг" под углом 18° (198°) и 110° (290°), соответственно, см. рис. 1. Оптические схемы лазерных деформографов созданы на основе модифицированного интерферометра Майкельсона с применением частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров. Первый лазерный деформограф находится на глубине 3–5 м от поверхности земли в гидротермоизолированном помещении на высоте 67 м над уровнем моря, а второй лазерный деформограф находится на удалении 70 м от первого на глубине 3–4 м от поверхности земли в подобном гидротермоизолированном помещении. Угол между измерительными плечами лазерных деформографов составляет 92°. Применяемые методы интерферометрии позволяют регистрировать изменение длин измерительных плеч каждого лазерного деформографа с точностью 0,01 нм. При этом чувствительность лазерного деформографа с длиной плеча 52,5 м равна $\Delta l/l = 0,01 \text{ нм} / 52,5 \text{ м} \approx 0,2 \cdot 10^{-12}$, а лазерного деформографа с длиной плеча 17,5 м – $0,6 \cdot 10^{-12}$. Полученные данные с лазерных деформографов по кабельным линиям поступают в лабораторное помещение, где после предварительной обработки (фильтрация и децимация) записываются на твердые носители программно-вычислительного комплекса с последующей организацией базы экспериментальных данных.

В 2012–2013 гг. в подземном руднике ПАО "Приаргунское производственное горно-химическое объединение" в месте с координатами 50° 4,726' СШ и 118° 5,726' ВД, см. рис. 1, на глубине около 300 м установлен лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 50 м, оптическая часть которого собрана по схеме модифицированного интерферометра Майкельсона и частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера и смонтирована на двух бетонных блоках, жестко соединенных с основным пластом шахты. На одном из бетонных блоков установлен уголковый отражатель, а на другом центральный узел интерферометра Майкельсона, состоящий из частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера фирмы MellesGriot, обеспечивающего стабильность частоты в десятом знаке, системы экстремального регулирования (система регистрации и резонансный усилитель) и других конструктивных и оптических элементов лазерного деформографа. Между двумя бетонными блоками луч лазера распространялся по герметичному лучеводу, состоящему из состыкованных труб внутренним диаметром 9 см. После установки прибора в течение нескольких суток проводились тестовые изме-

18° (198°) and 110° (290°), respectively, are operated for a long time, see Fig. 1. Optical schemes of laser deformographs are created on the basis of a modified Michelson interferometer using frequency-stabilized helium-neon lasers. The first laser deformograph is located at a depth of 3–5 m from the surface of the earth in a hydrothermally insulated room at a height of 67 m above sea level, and the second laser deformograph is located at a distance of 70 m from the first one at a depth of 3–4 m from the surface of the earth in a similar hydrothermally insulated room. The angle between the measuring arms of laser deformographs is 92°. The interferometry methods used allow one to record the change in the lengths of the measuring arms of each laser deformograph with an accuracy of 0.01 nm. In this case, the sensitivity of the laser deformograph with an arm length of 52.5 m is equal to $\Delta l/l = 0.01 \text{ nm} / 52.5 \text{ m} \sim 0.2 \cdot 10^{-12}$, and that of the laser deformograph with an arm length of 17.5 m is $\sim 0.6 \cdot 10^{-12}$. The obtained data from laser deformographs through cable lines enter the laboratory room where, after preliminary processing (filtration and decimation), they are recorded on solid carriers of the computer-aided complex with the subsequent organization of a database of experimental data.

In 2012–2013, in the underground mine of PJSC "Priargunskoe Production Mining and Chemical

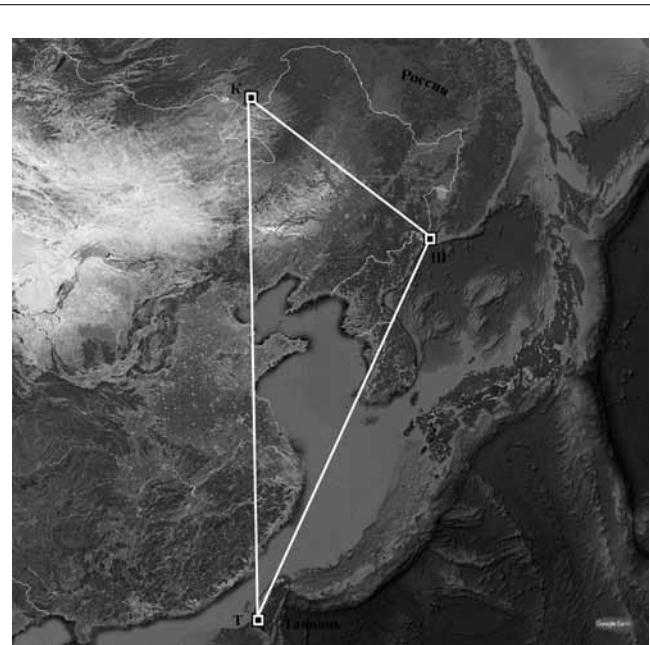


Рис. 1. Схема расположения лазерных деформографов в России и на Тайване (К – Краснокаменск, Ш – м. Шульца, Т – Тайвань)

Fig. 1. Location map of laser strainmeters in Russia and in Taiwan (K – Krasnokamensk, Ш – cape Shultz, T – Taiwan)



рения вариаций уровня деформаций земной коры. Полученные экспериментальные данные накапливались на твердом носителе с частотой дискретизации, варьирующейся в зависимости от задач эксперимента в диапазоне 1-2500 Гц, и в дальнейшем обрабатывались с целью определения технических характеристик лазерного деформографа, которые свелись к следующему: точность измерения смещения находится на уровне фона и составляет величину порядка 0.01-0.1 нм, а предельный порог чувствительности $\approx 1,2 \cdot 10^{-12}$. По окончанию тестовых испытаний лазерный деформограф был подвергнут профилактике, а затем запущен в режим проведения непрерывных измерений вариаций деформаций земной коры с техническими перерывами, связанными с профилактическими и ремонтными работами отдельных узлов прибора. В режиме реального времени полученные экспериментальные данные непрерывно поступали в центр сбора информации, находящийся на поверхности Земли, и записывались на винчестер компьютера в последовательные файлы данных длительностью по 1 ч с частотой дискретизации 1000 Гц с привязкой к точному времени с точностью 1 мс. После того как файл сохранялся на компьютере, он становился доступным по телекоммуникационным линиям

"Association" in the location with the coordinates 50° 4.726' N and 118° 5.726' E, see Fig. 1, at a depth of about 300 m a laser deformograph with a measuring arm length of 50 m, optical part of which is assembled according to the scheme of a modified Michelson interferometer and a frequency-stabilized helium-neon laser was installed and mounted on two concrete blocks rigidly connected to the main reservoir of the mine. A corner reflector is mounted on one of the concrete blocks, and a central assembly of the Michelson interferometer consisting of a frequency-stabilized helium-neon laser (MellesGriot), which provides frequency stability in the tenth digit, an extreme control system (recording system and resonant amplifier), and other structural and optical elements of a laser deformograph were mounted on the other block. Between the two concrete blocks, the laser beam was propagated along the sealed beamguide consisting of docked pipes with an internal diameter of 9 cm. After the instrument was installed for several days, test measurements of variations in the level of deformation of the earth's crust were made. The obtained experimental data were accumulated on a solid carrier with a sampling rate varying depending on the experimental tasks in the range of 1-2500 Hz, and further processed to determine the technical



сотрудникам институтов, находящимся в Хабаровске и во Владивостоке.

В конце 2013 г. в Тайване в месте с координатами $22^{\circ}52.534'$ СШ и $120^{\circ}12.603'$ ВД (см. рис. 1) на двух опорных тумбах был смонтирован лазерный деформограф классического типа с длиной измерительного плеча 6 м, созданный по схеме модифицированного интерферометра Майкельсона и с применением частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера. Измерительное плечо прибора ориентировано с отклонением 1.5° от оси "восток-запад". Применяемая электронно-оптическая система регистрации позволяет измерять изменение расстояния между двумя опорными тумбами с точностью 0.1 нм, что при длине измерительного плеча 6 м обеспечивает чувствительность лазерного деформографа около $2 \cdot 10^{-11}$. Измерения вариаций деформаций земной коры в месте расположения прибора проводились в течение двух недель с записью полученных экспериментальных данных на твердые носители компьютера, которые затем помещались в базу экспериментальных данных, находящуюся в ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток).

Как было сказано выше, со всех измерительных установок полученные экспериментальные данные помещались в базу экспериментальных данных ТОИ ДВО РАН (г. Владивосток), которые впоследствии подвергались обработке с помощью специально созданного пакета прикладных программ DEFORMOGRAF, состоящего из полного комплекса программ спектрального и статистического оценивания. При обработке экспериментальных данных, полученных на описанных лазерных деформографах в декабре 2013 г., проанализируем полученные результаты с точки зрения изучения особенностей проявления региональных и планетарных процессов на показаниях данных приборов в инфразвуковом диапазоне, начиная с приливных компонент до колебаний с периодом 1 с.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Учитывая то, что на полигоне Тайваня лазерный деформограф работал около двух недель (с 05 по 14 декабря 2013 г.), да и то с учетом его настройки и отладки, мы обрабатывали и анализировали данные всех лазерных деформографов только за этот период наблюдений. В этой части статьи мы основное внимание уделим результатам регионального характера, которые были получены при обработке данных конкретных лазерных деформографов, а также выделим общие закономерности в поведении сигналов различных частотных диапазонов тех природных

characteristics of the laser deformograph, which were reduced to the following: the accuracy of the displacement measurement is at background level and is the value of the order of $0.01\text{--}0.1$ nm, and the sensitivity threshold is $\sim 1.2 \cdot 10^{-12}$. At the end of the experimental tests, the laser deformograph was subjected to preventive maintenance and then launched into a mode of continuous measurements of variations in the deformations of the earth's crust with technical interruptions associated with the preventive and repair work of individual units of the instrument. In real time, the experimental data were continuously fed to the data collection center located on the surface of the Earth and recorded on a hard drive of the computer into serial data files lasting 1 hour with a sampling frequency of 1000 Hz with reference to the exact time with an accuracy of 1 ms. After the file was saved on the computer, it became available via telecommunication lines to the employees of institutes located in Khabarovsk and Vladivostok.

At the end of 2013, a laser deformograph of the classical type with a measuring arm length of 6 m was constructed in accordance with the scheme of the modified Michelson interferometer in Taiwan in the location with coordinates $22^{\circ} 52.534'$ N and $120^{\circ} 12.603'$ E (see Fig. 1) and using a frequency-stabilized helium-neon laser. The measuring arm of the instrument is oriented with a deviation of 1.5° from the east-west axis. The applied electron-optical recording system makes it possible to measure the change in the distance between two support cabinets with an accuracy of 0.1 nm, which, with a measuring arm length of 6 m, provides the sensitivity of the laser deformograph about $2 \cdot 10^{-11}$. Measurements of variations in the deformations of the earth's crust at the location of the instrument were carried out for two weeks, with the experimental data recorded on hard computer carriers, which were then placed in a database of experimental data at the Pacific Oceanological Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok).

As it was mentioned above, the experimental data from all measuring instruments were placed in the experimental data base of the Pacific Oceanological Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok), which were later processed using a specially created package of DEFORMOGRAF application software consisting of a full range of spectral and statistical estimation programs. When processing the experimental data obtained on the described laser deformographs in December 2013, we are going to analyze the results



Название таблицы

Table Name

	Спектр Spectrum	Спектр Spectrum	Спектр Spectrum	Спектр Spectrum	Спектр Spectrum
	Приливные гармоники Tidal harmonics	$a, (1/f^a)$ (24–1 ч) (24–1 h)	$a, (1/f^a)$ (1 ч – 1 мин) (1 h – 1 min)	$a, (1/f^a)$ (10–0,5 мин) (10–0.5 min)	$a, (1/f^a)$ (0,01–2 Гц) (0.01–2 Hz)
Тайвань Taiwan	24 ч 16 мин 21,3 с ($A=2,8$ мкм, $\varepsilon=0,47 \cdot 10^{-6}$) 12 ч 08 мин 10,7 с ($A=1,2$ мкм, $\varepsilon=0,20 \cdot 10^{-6}$) 24 h 16 min 21.3 s ($A=2.8$ μm, $\varepsilon=0,47 \cdot 10^{-6}$), 12 h 08 min 10.7 s ($A=1.2$ μm, $\varepsilon=0,20 \cdot 10^{-6}$)	$a=2,51$	$a=2,49$	$a=1,53$	$a=1,33$
м. Шульца (17,5 м) Schultz Cape (17.5 m)	24 ч 16 мин 21,3 с ($A=11,9$ мкм, $\varepsilon=0,68 \cdot 10^{-6}$) 12 ч 08 мин 10,7 с ($A=6,8$ мкм, $\varepsilon=0,39 \cdot 10^{-6}$) 24 h 16 min 21.3 s ($A=11.9$ μm, $\varepsilon=0,68 \cdot 10^{-6}$), 12 h 08 min 10.7 s ($A=6.8$ μm, $\varepsilon=0,39 \cdot 10^{-6}$)	$a=1,82$	$a=1,72$	$a=1,31$	$a=1,79$
Забайкалье Transbaikalia	24 ч 16 мин 21,3 с ($A=4,8$ мкм, $\varepsilon=0,09 \cdot 10^{-6}$) 12 ч 08 мин 10,7 с ($A=2,6$ мкм, $\varepsilon=0,05 \cdot 10^{-6}$) 24 h 16 min 21.3 s ($A=4.8$ μm, $\varepsilon=0,09 \cdot 10^{-6}$), 12 h 08 min 10.7 s ($A=2.6$ μm, $\varepsilon=0,05 \cdot 10^{-6}$)	$a=1,85$	$a=2,79$	$a=2,09$	$a=2,06$

процессов, которые характерны для планеты в целом. В таблице 1 приведены некоторые результаты обработки, в частности: результаты обработки по приливному диапазону (24–1 ч), результаты обработки по диапазону собственных колебаний Земли (можно также говорить о морских процессах сейшевого диапазона и т.п., 1 ч – 1 мин), результаты обработки по диапазону "Инфрагравитационный шум Земли" (10–0,5 мин), результаты обработки по микросейсмическому диапазону (30–2 с). При сравнении амплитуд суточной и полусуточной гармоник на всех трех полигонах можно утверждать следующее:

- 1) для лазерных деформографов, находящихся вблизи моря (м. Шульца и Тайвань), относительные амплитуды, т.е. деформация ε , для суточных гармоник сравнимы – $0,68 \cdot 10^{-6}$ и $0,47 \cdot 10^{-6}$, также как и для полусуточных гармоник – $0,39 \cdot 10^{-6}$ и $0,20 \cdot 10^{-6}$;

obtained from the point of view of studying the features of the manifestation of regional and planetary processes on the readings of these instruments in the infrasonic range, beginning with tidal components up to oscillations with a period of 1 s.

ANALYSIS OF THE RECEIVED EXPERIMENTAL DATA

Given that the laser deformograph operated at Taiwan's testing site for about two weeks (from December 05 to December 14, 2013), and even with its adjustment and debugging, we processed and analyzed the data of all laser deformographs only during this period of observation. In this part of the article, we will focus on the results of a regional nature that were obtained by processing the data of specific laser deformographs, and also outline general patterns in the behavior of signals

2) для лазерного деформографа, находящегося в Забайкалье, эти относительные деформации почти на порядок меньше. Первые лазерные деформографы находились вблизи моря, а третий лазерный деформограф - на континенте. Большие амплитуды деформаций указывают на нагружающее воздействие морского прилива на уровень микродеформаций земной коры в данном частотном диапазоне.

В более высокочастотном диапазоне (1 ч - 1 мин) можно отметить следующее. В диапазоне периодов от значений, соответствующих одной сфероидальной моде ${}_0S_2$, до значений, соответствующий другой

of different frequency ranges of those natural processes that characterize the planet as a whole. Table 1 shows some processing results, namely: the results of processing over the tidal range (24-1 h), the results of processing on the range of natural oscillations of the Earth (it can also be said about the sea processes of the seismic range, etc., 1 h - 1 min), the processing results for the range of "Infragravitational noise of the Earth" (10-0.5 min), the results of processing on the microseismic range (30-2 s). When comparing the amplitudes of diurnal and semidiurnal harmonics on all three polygons, we can state as follows:

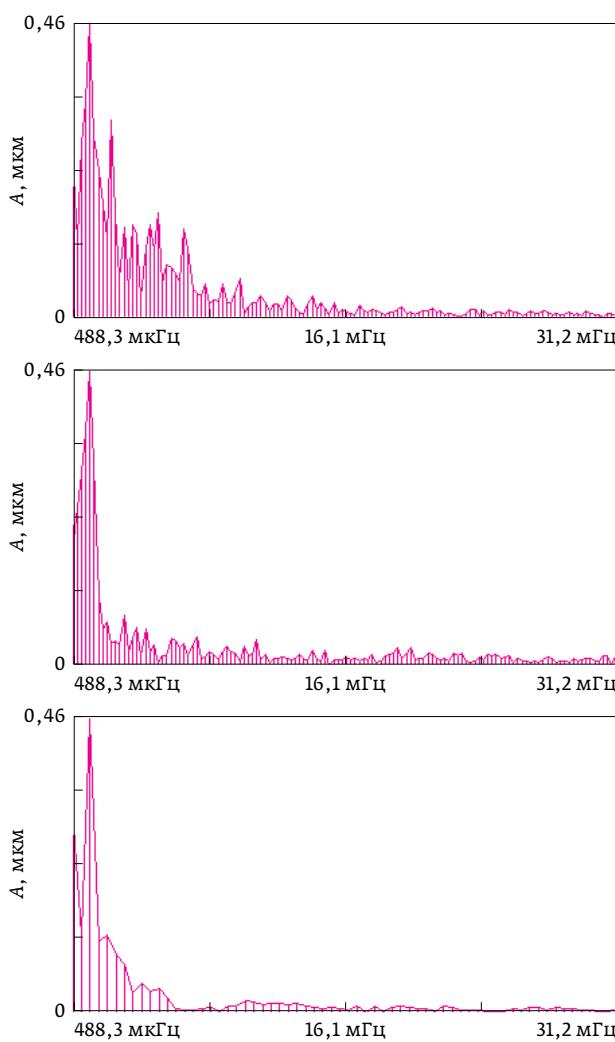


Рис. 2. Спектры записей лазерных деформографов Краснокаменск - мыс Шульца-Тайвань (диапазон 488,3 мкГц - 31,7 мГц)
Fig. 2. Spectrums of the laser strainmeters records of Krasnokamensk- Cape Schults- Taiwan (range 488,3 μ Hz - 31,7 mHz)

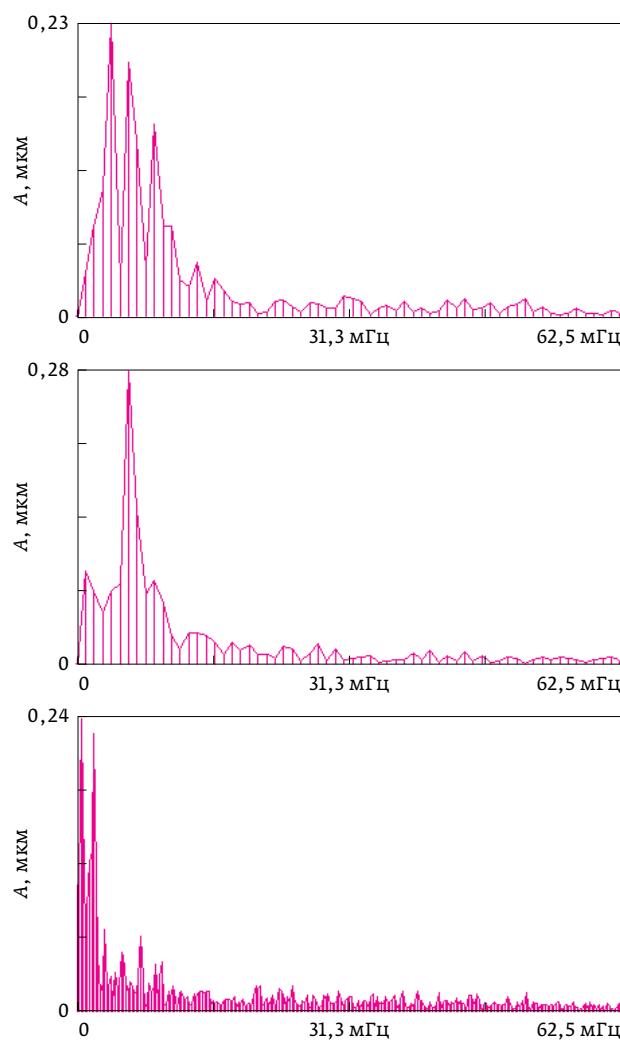


Рис. 3. Спектры записей лазерных деформографов Краснокаменск - мыс Шульца-Тайвань (диапазон 0 - 625 мГц)
Fig. 3. Spectrums of the laser strainmeters records of Krasnokamensk- Cape Schults- Taiwan (range 0 - 625 mHz)



сфериодальной моде ${}_0S_0$, никаких общих закономерностей нет, т. е. в этом диапазоне периодов не зарегистрированы сфериодальные и крутильные тона и обертона собственных колебаний Земли ввиду того, что в этот период наблюдений на Земле не происходило землетрясений достаточной мощности, которые могли бы возбудить моды достаточно высокой амплитуды, необходимой для регистрации всеми указанными выше лазерными деформографами.

В записях всех лазерных деформографов выделены участки с мощными квазигармоническими колебаниями с периодами, соответствующими приблизительно 11 мин 22,7 с (см. рис. 2). Можно также выделить некоторые мощные общие колебания в диапазоне периодов от 1,5 до 4,5 мин. Так на рис. 3 приведены спектры участков записей лазерных деформографов Краснокаменска, м. Шульца, Тайваня. Их анализ позволяет выделить пики на периодах: 4 мин 16 с (Краснокаменск), 2 мин 50,7 с (Краснокаменск), 1 мин 53,8 с (Краснокаменск), 2 мин 50,7 с (м. Шульца), 2 мин 16,5 с (Тайвань). Кроме того, для пары деформографов Краснокаменск-Тайвань можно найти общие мощные пики на периодах 8 мин 32 с, 3 мин 24,8 с, 3 мин 47,6 с. При более тщательном анализе можно утверждать, что периоды выделенных колебаний изменяются

- 1) for laser deformographs located near the sea (Schultz Cape and Taiwan), relative amplitudes, i. e., deformation ϵ , for diurnal harmonics are comparable $0.68 \cdot 10^{-6}$ and $0.47 \cdot 10^{-6}$, as well as for semidiurnal harmonics – $0.39 \cdot 10^{-6}$ and $0.20 \cdot 10^{-6}$;
- 2) for a laser deformograph located in Transbaikalia, these relative deformations are almost an order of magnitude smaller. The first laser deformographs were near the sea, and the third laser deformograph was on the continent. Large deformation amplitudes indicate the loading effect of the sea tide on the level of microdeformations of the earth's crust in this frequency range.

In the higher frequency range (1 hour – 1 minute) the following can be noted. In the range of periods from the values corresponding to one spheroidal mode ${}_0S_2$, up to the values corresponding to the other spheroidal mode ${}_0S_0$, there are no general regularities, i. e. in this range of periods there are no spheroidal and torsional tones recorded and the overtone of the Earth's natural oscillations due to the fact that during this period of observations on the Earth there were no earthquakes of sufficient power that could excite the modes of a sufficiently high amplitude

в некотором интервале. Для рассматриваемого диапазона периодов (1,5–4,5 мин):

- 1) Краснокаменск – от 3 мин 24,8 с до 4 мин 16,0 с, от 2 мин 50,7 с до 3 мин 06,2 с, от 1 мин 37,5 с до 2 мин 16,5 с;
- 2) м. Шульца пики с периодами около 2 мин 50,7 с и 1 мин 25,3 с;
- 3) Тайвань от 3 мин 24,8 с до 4 мин 16,0 с, от 1 мин 50,7 с до 2 мин 16,5 с.

На основании последнего можно выделить общие группы возмущений в диапазоне периодов 3 мин 24,8 с – 4 мин 16,0 с (Краснокаменск, Тайвань), 2 мин 50,7 с – 3 мин 06,2 с (Краснокаменск, м. Шульца), 1 мин 25,3 с – 2 мин 16,5 с (Краснокаменск, м. Шульца, Тайвань). Очень сложно найти объяснение существованию таких мощных возмущений, да еще с периодами, изменяющимися в достаточно широких пределах. Единственный разумный источник возмущений может быть связан с атмосферными процессами, возможно, с краевыми атмосферными волнами, возникающими в приземных слоях атмосферы. Данное предположение может быть подтверждено результатами, приведенными на рис. 4, полученными при обработке данных тайваньского лазерного деформографа. Как видно из рисунка, мощное возмущение почти по дуге изменилось от периода, примерно равного 9 мин, до мощного возмущения с периодом около 3 мин 40 с в течение 6 ч, а затем почти симметрично в течение 6 ч изменилось по дуге от периода, равного 3 мин 40 с до мощного возмущения с периодом около 9 мин. Ясно, что данное возмущение может быть связано только, на первый взгляд, с атмосферными процессами, возможно с орографическими волнами. При более полном анализе данных тайваньского лазерного деформографа было установлено, что такого рода изменения периодов от меньших к большим и обратно наблюдались неоднократно. Еще более непонятное возмущение выделено из записей краснокаменского лазерного деформографа. На рис. 5 приведен пример одного из выделенных возмущений. Длительность данных возмущений составляет около 22 мин, 3 ч, 8 ч и 24 ч, что, по-видимому, связано с техногенными деформационными возмущениями, вызванными производственной деятельностью человека в шахте. Амплитуда данных возмущений сравнима или даже больше амплитуды приливных компонент.

necessary for recording by all the laser deformographs indicated above.

In the records of all laser deformographs, the areas with powerful quasi-harmonic oscillations corresponding to periods of about 11 min of 22.7 s are identified (see Fig. 2). One can also identify some powerful general oscillations in the range of periods from 1.5 to 4.5 min. Thus, Fig. 3 shows the spectra of the sections of the records of the laser deformographs of Krasnokamensk, Schultz Cape, Taiwan, from which peaks can be distinguished in the periods of 4 min 16 s (Krasnokamensk), 2 min 50.7 s (Krasnokamensk), 1 min 53.8 min (Krasnokamensk), 2 min 50.7 s (Schulz Cape), 2 min 16.5 s (Taiwan). Furthermore, for the pair of deformographs of Krasnokamensk-Taiwan, a common powerful peaks in periods of 8 min 32 s, 3 min 24.8 s, 3 min 47.6 s can be found. With more careful analysis, it can be asserted that the periods of the allocated oscillations vary in a certain interval. For the considered range of periods (1.5–4.5 min):

- 1) Krasnokamensk – from 3 min 24.8 s to 4 min 16.0 s, from 2 min 50.7 s to 3 min 06.2 s, from 1 min 37.5 s to 2 min 16.5 s;
- 2) Schultz Cape – peaks with periods of about 2 min 50.7 s and 1 min 25.3 s;
- 3) Taiwan – from 3 min 24.8 s to 4 min 16.0 s, from 1 min 50.7 s to 2 min 16.5 s.

On the basis of the latter, it is possible to single out general perturbation groups in the period range of 3 min 24.8 s – 4 min 16.0 s (Krasnokamensk, Taiwan), 2 min 50.7 s – 3 min 06.2 s (Krasnokamensk, Schultz Cape), 1 min 25.3 s – 2 min 16.5 s (Krasnokamensk, Schultz Cape, Taiwan).

It is very difficult to explain the existence of such powerful perturbations, and even with periods that vary within fairly wide limits. The only reasonable source of perturbations can be associated with atmospheric processes, possibly with edge atmospheric waves, the surface layers of the atmosphere that arise.

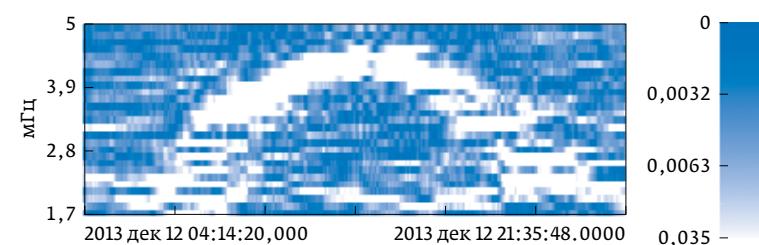


Рис. 4. Динамическая спектрограмма участка записи тайваньского лазерного деформографа

Fig. 4. Dynamic spectrogram of a recording of a Taiwanese laser strainmeter



Далее остановимся на микросейсмическом диапазоне (2–30 с). Основной источник возмущений связан с морскими поверхностными волнами (ветровые волны или зыбы). м. Шульца омывают воды Японского моря. Поэтому в этом диапазоне периодов основным источником возбуждения микросейсм являются морские ветровые волны или зыбы. При относительно спокойном море характерные морские поверхностные волны для точки наблюдения имеют периоды 5–6 с, которые трансформируются в упругие колебания дна на соответствующих периодах в мелководной и прибойной зонах. В штормовых условиях период данных волн может достигать 12–13 с. На рис. 6 приведен пример спектра записи лазерного деформографа, установленного на м. Шульца, на котором выделяется мощное возмущение с периодом около 10–11 с, относящееся к микросейсмическому диапазону, и вызванное волнами зыби. При спектральной обработке записей краснокаменского лазерного деформографа в микросейсмическом диапазоне выделяются максимумы в диапазоне периодов 6–6,5 с, 3–3,2 с, 4–4,2 с (см. рис. 7), которые могут быть вызваны различными волновыми источниками, в первую очередь связанными с ветровыми волнами озера Байкал, а также близлежащего озера Умыкай. По-видимому,

This assumption can be confirmed by the results shown in Fig. 4, obtained by processing the data of the Taiwan laser deformograph. As can be seen from the figure, the powerful perturbation almost along the arc has changed from a period approximately equal to 9 minutes to a powerful perturbation with a period of about 3 minutes 40 seconds for 6 hours, and then almost symmetrically within 6 hours has changed along an arc from a period equal to 3 min 40 s up to a powerful perturbation with a period of about 9 minutes. It is clear that this perturbation can only be connected, at first glance, with atmospheric processes, possibly with orographic waves. With a more complete analysis of the data of the Taiwan laser deformograph, it was found that such changes in the periods from smaller to larger and backward were observed repeatedly. Even more incomprehensible perturbation is isolated from the records of the Krasnokamensk laser deformograph. Fig. 5 gives an example of one of the selected perturbations. The duration of these perturbations is about 22 minutes, 3 hours, 8 hours and 24 hours, which, apparently, is due to technogenic deformation perturbations caused by human production activity in the mine. The amplitude of these perturbations is comparable or even greater than the amplitude of the tidal components.

колебания с периодами около 6 и 3 с связаны с ветровыми волнами озера Байкал, а около 4 с – с ветровыми волнами озера Умыкай. На Тайване проводились измерения в период почти полного отсутствия ветрового волнения, поэтому при спектральной обработке выделены максимумы микросейсмического диапазона с периодом около 3,5 с, которые вызваны местным ветровым волнением. Почти в этом диапазоне периодов можно выделить мощное возмущение, имеющее добротность порядка 350, на частотах, соответствующих периодам 21,18 и 10,6 с, которые явно не связаны с ветровым волнением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе лазерных деформографов классического типа создана фотонная антенна "Россия-Тайвань", предназначенная для изучения природы деформационных процессов в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 10^{-11} – 10^{-12} . Проведенные кратковременные измерения вариаций уровня деформаций земной коры подтвердили ее большие перспективы при изучении природы деформационных процессов в приливном диапазоне, в диапазоне собственных колебаний Земли и в микросейсмическом диапазоне. Одно из важнейших направлений использования данной фотонной антенны связано с задачами разделения регистрируемых процессов на региональные и планетарные, а также процессов, связанных с взаимодействием геосфер в зоне перехода системы "атмосфера-гидросфера-литосфера".

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ДВО РАН, программа "Дальний Восток", конкурс совместных исследовательских проектов Дальневосточного отделения РАН и Министерства науки и технологий Тайваня.

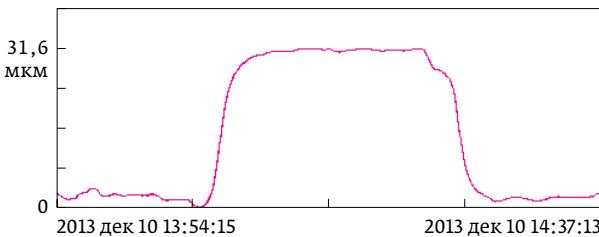


Рис. 5. Пример возмущения, выделенный из записи краснокаменского лазерного деформографа

Fig. 5. An example of disturbance, selected from the records of the laser strainmeter Krasnokamensk

Next, we will concentrate on the microseismic range (2–30 s). The main source of perturbations is associated with sea surface waves (wind waves or swell). The Schulz Cape is washed by the waters of the Sea of Japan. Therefore, in this range of periods, the main source of perturbation of microseisms is the sea wind waves or swell. With a relatively calm sea, characteristic sea surface waves for the observation point have periods of 5–6 s, which are transformed into elastic oscillations of the bottom at the appropriate periods in the shallow and swampy zones. In the storm conditions, the period of these waves can reach 12–13 s. Fig. 6 shows an example of the recording spectrum of a laser deformograph installed at the Schultz Cape, where a strong perturbation with a period of about 10–11 s, related to the microseismic range, is evolved and caused by swell waves. Spectral processing of records of the Krasnokamensk laser deformograph in the microseismic range distinguishes peaks in the range of periods of 6–6.5 s, 3–3.2 s, 4–4.2 s (see Fig. 7), which can be caused by various wave sources, primarily associated with

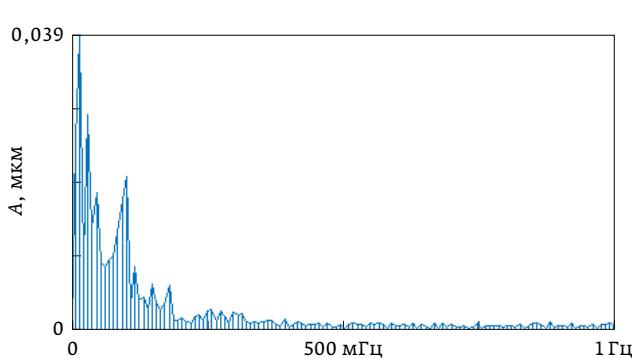


Рис. 6. Спектр участка записи лазерного деформографа на мысе Шульца

Fig. 6. Range of recording laser strainmeter cape Schults

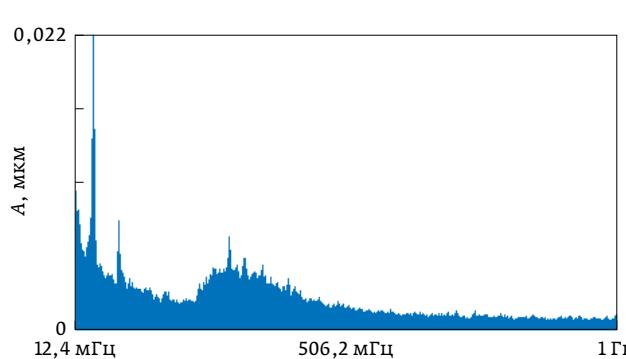


Рис. 7. Спектр участка записи лазерного деформографа в Краснокаменске

Fig. 7. Range of recording laser strainmeter in Krasnokamensk



ЛИТЕРАТУРА

1. **Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н.** Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформографом // Известия АН СССР. Физика Земли, 1983, № 2, с. 15–20.
Dolgikh G.I., Kopvillem U.H., Pavlov A.N. Nablyudenie periodov sobstvennyh kolebanij Zemli lazernym deformografiom // Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli, 1983, № 2, p. 15–20.
2. **Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.О., Овчаренко В.В.** Двухкоординатный лазерный деформограф. – Физика Земли, 1998, № 11, с. 76–81.
Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V. A two-coordinate laser strainmeter. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth, v. 34, No. 11, p. 946–950.
3. **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.
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, v. 38, N. 8, p. 686–689.
4. **Давыдов А.В., Долгих Г.И., Холодкевич Е.Д.** Вариации микродеформаций земной коры, регистрируемые разнесенными лазерными деформографами // Физика Земли, 1977, № 10, с. 51–62.
Davydov A.V., Dolgikh G.I., Kholodkevich E.D. Variations in the crustal microstrains recorded by widely spaced laser strainmeters // Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 1977, v. 33, N. 10, p. 824–834.
5. **Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Чупин В.А., Яковенко С.В.** Особенности применения мобильного лазерного деформографа в зимних условиях // Фотоника, 2017, № 4(64), с. 86–91.
Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Chupin V.A., Yakovenko S.V. Features of application of mobile laser strainmeter in winter conditions // Photonics, 2017, N. 4(64), p. 86–91.
6. **Долгих Г.И., Чупин В.А.** Экспериментальная оценка преобразования гидроакустического излучения в сейсмоакустическую волну // Акустический журнал, 2005, т. 51, № 5, с. 628–632.
Dolgikh G.I., Chupin V.A. Experimental estimate for the transformation of underwater acoustic radiation into a seismoacoustic wave // Acoustic Physics, 2005, v.51, N.5, p. 538–542.

wind waves of the Baikal Lake, as well as the nearby Umykai Lake. Apparently, oscillations with periods of about 6 and 3 s are associated with the wind waves of the Baikal Lake, and about 4 s – with the wind waves of the Umykai Lake. In Taiwan, the measurements were made in the period of almost complete absence of wind waves, so the spectral processing revealed maxima of the microseismic range with a period of about 3.5 seconds, which are caused by local wind waves. Almost in this range of periods, one can single out a powerful perturbation having a quality factor of the order of 350 at frequencies corresponding to the periods 21.18 and 10.6 s, which are clearly not related to wind waves.

CONCLUSION

On the basis of classical-type laser deformographs, a photonic antenna "Russia-Taiwan" was created, designed to study the nature of deformation processes in the frequency range from 0 (conditionally) to 1000 Hz with accuracy of 10^{-11} to 10^{-12} . The short-term measurements of variations in the level of deformation of the earth's crust confirmed its great prospects in studying the nature of deformation processes in the tidal range, in the range of natural oscillations of the Earth and in the microseismic range. One of the most important directions of the use of this photonic antenna is connected with the tasks of dividing the registered processes into regional and planetary ones, as well as the processes related to the interaction of geospheres in the transition zone of the atmosphere-hydrosphere-lithosphere system.

The research was carried out with partial financial support of the FEB of RAS, "Far East" program, a joint research projects competition of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences and the Ministry of Science and Technology of Taiwan.