



Изучение межгеосферного взаимодействия микросейсмического диапазона лазерно-интерференционным комплексом

Г. И. Долгих¹, С. С. Будрин¹, А. В. Давыдов¹, С. Г. Долгих¹,
А. В. Мишаков², В. А. Чупин¹, В. А. Швец¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

При обработке синхронных данных двухкоординатного лазерного деформографа, лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления установлены закономерности генерации первичных и вторичных микросейсм зоны расположения измерительного полигона. Определена величина атмосферных колебаний, вызванных распространяющимися в земной коре вторичными микросейсмами. Передаточный коэффициент этого взаимодействия равен около 0,023 Па / нм, который в три-четыре раза больше такого же коэффициента при распространении рэлеевских волн в земной коре, генерируемых землетрясениями. Результаты работы подтверждают высокую эффективность синхронного применения всех установок, что позволяет точно устанавливать происхождение зарегистрированных геосферных возмущений.

Ключевые слова: двухкоординатный лазерный деформограф, лазерный нанобарограф, лазерный измеритель вариаций гидросферного давления, микросейсмы, морские волны

Статья получена: 10.10.2022
Статья принята: 01.11.2022

Study of Intergeospheric Interaction in the Microseismic Range Using the Laser Interferential Station

G. I. Dolgikh¹, S. S. Budrin¹, A. V. Davydov¹, S. G. Dolgikh¹,
A. V. Mishakov², V. A. Chupin¹, V. A. Shvets¹

¹ Illichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

The generation regularities of primary and secondary microseisms in the measuring ground location area have been determined by processing synchronous data of a two-coordinate laser strainmeter, a laser nanobarograph and a laser meter of hydrospheric pressure variations. The magnitude of atmospheric oscillations caused by the secondary microseisms propagating in the Earth's crust has been obtained. The transfer factor of this interaction is about 0.023 Pa / nm that is three to four times greater than the same factor for the Rayleigh wave propagation in the Earth's crust, generated by the earthquakes. The work results confirm the high efficiency of synchronous application of all measuring installations that allows us to accurately establish the origin of the registered geosphere disturbances.

Keywords: two-coordinate laser strainmeter, laser nanobarograph, laser meter of hydrospheric pressure variations, microseisms, sea waves

Received on: 10.10.2022

Accepted on: 01.11.2022

INTRODUCTION

For historical reasons, the concept of «microseisms» was introduced in an attempt to interpret the Earth's background oscillations in the period range of 2–20 s, the origin of which was attributed to the fre-



ВВЕДЕНИЕ

Исторически сложилось так, что понятие «микросейсмы» было введено при попытке интерпретации фоновых колебаний Земли в диапазоне периодов 2–20 с, происхождение которых было приписано часто происходящим слабым землетрясениям небольшой магнитуды. Впоследствии установлено, что данные возмущения вызваны не землетрясениями, а морскими волнами, которые при своем взаимодействии с дном и при разрушении в прибойной зоне генерируют в земной коре колебания в частотном диапазоне от 2 до 20 с (условно). основополагающими работами по природе возникновения и развития волн микросейсмического диапазона (2–20 с) являются статьи Хассельмана и Лонге-Хиггинса [1, 2], в которых утверждается, что прогрессивные и стоячие морские ветровые волны возбуждают первичные и вторичные микросейсмы соответственно при их взаимодействии с морским дном. Периоды первичных микросейсм равны периодам прогрессивных ветровых волн, а периоды вторичных микросейсм равны половине периода прогрессивных морских волн из-за того, что изменение гидростатического давления в стоячей морской волне дважды меняется за один период поверхностной морской волны. Периоды первичных и вторичных микросейсм зависят от периодов морских ветровых волн, которые связаны со скоростью и временем действия ветра, площадью и глубиной водной акватории, над которой действует ветер. В то же время, например, в работе [3] утверждается, что образование самого большого спектрального максимума в микросейсмическом диапазоне с пиковой частотой в области 0,14–0,22 Гц (7,1–4,5 с) связано с низкочастотным рассеянием энергии упругих волн в горных породах. Более того, в данной работе утверждается, что «океанические волны следует трактовать не как причину низкочастотных сейсмических шумов, согласно теории Лонге-Хиггинса, а наоборот – как их следствие». Не исключено возбуждение волн микросейсмического диапазона атмосферными процессами по аналогии с возбуждением «Инфразгравитационного шума Земли» пульсациями атмосферного давления в резонансном и околорезонансном случаях [4].

С учетом вышесказанного важной задачей является определение первоисточника возникновения колебаний Земли в диапазоне периодов 2–20 с, т. е. в микросейсмическом диапазоне. Данные исследования желательно проводить на одном измерительном полигоне с применением аппаратуры, проводящей одновременно измерения вариаций атмосферного и гидросферного давлений, микроко-

quent weak earthquakes of small magnitude. Subsequently, it was found that these disturbances are caused not by earthquakes, but by the sea waves that generate oscillations in the Earth's crust in the frequency range of 2–20 s (conditionally), when interacting with the bottom and breaking in the reference zone. The benchmark works devoted to the origin and development of microseismic waves (2–20 s) are the articles of Hasselman and Longuet-Higgins [1, 2] stating that the progressive and standing wind-induced sea waves excite the primary and secondary microseisms, respectively, while interacting with the seabed. The periods of primary microseisms are equal to the periods of progressive wind-induced waves, and the periods of secondary microseisms are equal to half the period of progressive sea waves due to the fact that changes in hydrostatic pressure of a standing sea wave occur twice during one period of a surface sea wave. The periods of primary and secondary microseisms depend on the periods of wind-induced sea waves that are related to the wind velocity and duration, the area and depth of the water zone above which the wind is available. Moreover, for example, [3] shows that formation of the largest spectral maximum in the microseismic range with a peak frequency of 0.14–0.22 Hz (7.1–4.5 s) is related to the low-frequency elastic energy scattering in the rock formations. Moreover, this paper argues that «the ocean waves should not be construed as the cause of low-frequency seismic noise, according to the Longuet-Higgins theory, but rather as its consequence». It is possible that microseismic waves are excited by the atmospheric processes similar to the excitation of the «Earth infragravitational noise» by atmospheric pressure fluctuations in the resonant and near-resonant cases [4].

In view of the foregoing, an important task is to determine the primary source of Earth oscillations in the period range of 2–20 s, i. e. in the microseismic range. It is desirable to perform such studies on one measuring ground using the equipment that simultaneously measures variations in the atmospheric and hydrospheric pressures, microfluctuations of the Earth's crust. The equipment shall be preferably developed based on the same measuring principles, and shall have the unique amplitude and frequency specifications (wide operating frequency range, high sensitivity). At present, such requirements are met by the one-coordinate and two-coordinate laser strainmeters [5, 6], laser nanobarographs [7], and laser meters of hydrospheric pressure variations [8] that are currently installed on one measuring ground «Cape Schultz» of the Ilichev Pacific Oceanological Insti-



лебаний земной коры. Аппаратура должна быть создана желательна на одних и тех же измерительных принципах и обладать уникальными амплитудно-частотными характеристиками (широкий рабочий диапазон частот, высокая чувствительность). В настоящее время данным требованиям в полной мере удовлетворяют лазерные деформографы однокоординатного и двухкоординатного типов [5, 6], лазерные нанобарографы [7] и лазерные измерители вариаций гидросферного давления [8], которые в настоящее время установлены на одном измерительном полигоне ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» [9].

Но определением первоисточников различных волновых и не волновых процессов нельзя ограничиться, так как нам крайне интересны вопросы, связанные с изучением закономерностей трансформации этих процессов на границах геосфер, с их взаимодействием с другими разномасштабными процессами и явлениями. Так, одно из направлений связано с возбуждением атмосферных волн проходящими волнами рэлеевского типа в диапазоне периодов от 1 до 20 с, генерируемых землетрясениями [10]. Но такие же волны возбуждаются гравитационными морскими волнами в этом же диапазоне периодов, т.е. от 2 до 20 с. Второе, очень модное в настоящее время направление, – глобальное повышение температуры. Но почему-то все берут в расчет только влияние парниковых газов. А как же диссипация энергии в земной коре, в морской земной коре, при которых может происходить повышение температуры Мирового океана и атмосферы. Есть работы, в которых данные эффекты изучаются на начальном уровне, например [11]. С увеличением штормовой активности, увеличением суммарной энергии проходящих тайфунов/циклонов, увеличением суммарной мощности землетрясений, зависящих в том числе и от солнечной активности, диссипирующая энергия растет, что влечет за собой глобальное повышение температуры.

В этой работе будет уделено некоторое внимание решению описанных выше задач.

ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В статье анализируются данные, полученные при выполнении синхронных измерений вариаций атмосферного и гидросферного давлений, микросмещений земной коры на сейсмоакустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» с помощью лазерного нанобарографа, лазерного измерителя вариаций гидросферного давления и двухкоординатного лазерного деформографа, состоящего из двух лазерных

туте, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences [9].

However, it is not possible just to determine the primary sources of various wave and non-wave processes, since we are extremely interested in the issues related to the study of transformation regularities of these processes at the geosphere boundaries, with their interaction with other multi-scale processes and phenomena. Thus, one of the areas is related to the excitation of atmospheric waves by transmitted Rayleigh waves in the period range from 1 to 20 s generated by the earthquakes [10]. However, the same waves are excited by the gravitational sea waves in the same range of periods, i. e. from 2 to 20 s. The second area that is rather popular now, is the global temperature rise. For some reason, every researcher considers only the impact of greenhouse gases, but does not take into account the energy dissipation in the Earth's crust or in the marine Earth's crust due to which the temperature of the world ocean and atmosphere is increased. There are some papers where these effects are studied at the initial level, for example, [11]. With an intensification in the storm activity, an increase in the total energy of typhoons/cyclones, an increase in the total power of earthquakes that depend, among other things, on solar activity, the dissipative energy is raised entailing a global temperature rise.

This paper will pay some attention to solving the problems described above.

LASER INTERFERENTIAL MEASURING SYSTEMS

The article analyzes the data obtained when performing synchronous measurements of variations in the atmospheric and hydrospheric pressures, crustal micromovements at the seismoacoustic and hydrophysical test site «Cape Schultz» of the Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences using a laser nanobaro-graph, a laser meter of hydrospheric pressure variations, and a two-coordinate laser strainmeter consisting of two unequal-arm laser strainmeters with the measuring arm lengths of 52.5 and 17.5 m, located relative to each other at an angle of 92°. All laser and interferential devices are designed based on the Michelson interferometer scheme using the frequency-stabilized helium-neon lasers as the radiation sources.

Figure 1 shows the appearance of a laser nanobaro-graph based on an equal-arm Michelson interferometer, a frequency-stabilized helium-neon laser produced by Melles Griot that ensures frequency stability in the ninth place, a set of aneroid chambers with the mirror-like coating, a digital recording system, and

деформографов неравноплечего типа с динамическими измерительными плечами 52,5 и 17,5 м, расположенных относительно друг друга под углом 92° . Все лазерно-интерференционные приборы созданы по схеме интерферометра Майкельсона с применением в качестве источников излучения частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров.

На рис. 1 приведен внешний вид лазерного нанобарографа, созданного на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера фирмы Melles Griot, обеспечивающего стабильность частоты в девятом знаке, блока анероидных коробок с зеркальным напылением, цифровой системы регистрации и блока передачи полученных экспериментальных данных в базу экспериментальных данных. Большинство лазерных нанобарографов, созданных нами, регистрируют вариации атмосферного давления в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа [7].

В качестве приемной системы деформационных процессов земной коры используется двухкоординатный лазерный деформограф, состоящий из лазерного деформографа неравноплечего типа с длиной измерительного плеча 52,5 м, ориентированный под углом 18° относительно линии «север-юг» (С-Ю), и лазерный деформограф неравноплечего типа «запад-восток» (З-В) с длиной измерительного плеча 17,5 м, ориентированный относительно 52,5-метрового лазерного деформографа под углом 92° . Все лазерные деформографы созданы на основе интерферометра Майкельсона неравноплечего типа с применением в качестве источника света частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров со стабильностью частоты в 9–12 знаках. На рис. 2 приведен общий вид подземного лучевода 52,5-метрового лазерного деформографа с центральным интерференционным узлом и частотно-стабилизированным лазером, обеспечивающим стабильность частоты в 12 знаке. На рис. 3 приведена карта-схема расположения лазерных деформографов на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца».

На рис. 4 приведен внутренний вид лазерного измерителя вариаций гидросферного давления, созданного на основе частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, обеспечивающего стабильность частоты излучения в девятом знаке. Он помещается в цилиндрический корпус из нержавеющей стали, который закрепляется в защитной решетке, предназначенной для защиты прибора в сложных эксплуатационных условиях (скалистое или илистое дно). Одна сторона имеет отверстие под кабель-ввод. Другая сторона герметично закры-

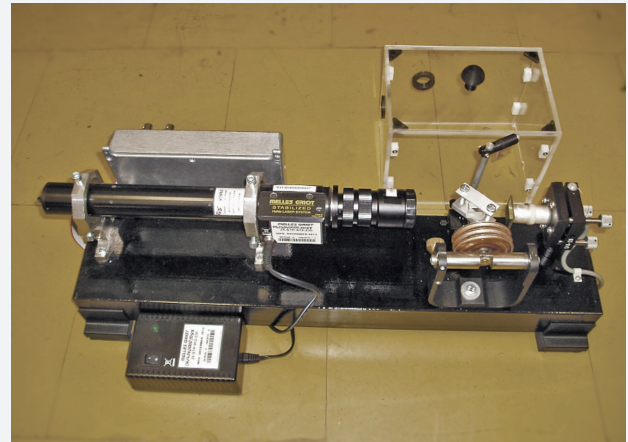


Рис. 1. Лазерный нанобарограф
Fig. 1. Laser nanobarograph

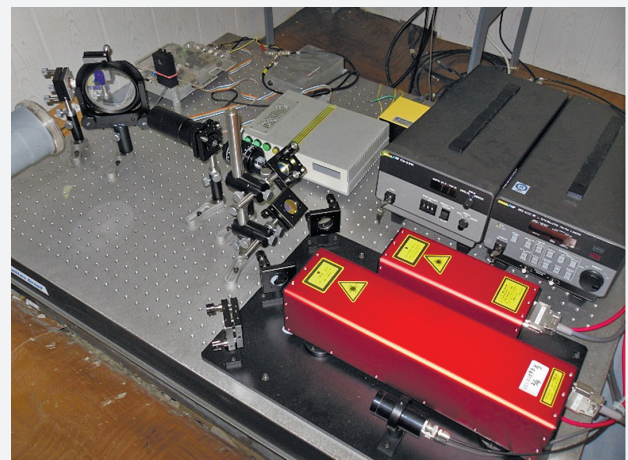


Рис. 2. Подземный лучевод 52,5-метрового лазерного деформографа неравноплечего типа (вверху) и центральный интерференционный узел (внизу)
Fig. 2. An underground beam waveguide of a 52.5-meter unequal-arm laser strainmeter (top) and a central interferential unit (bottom)

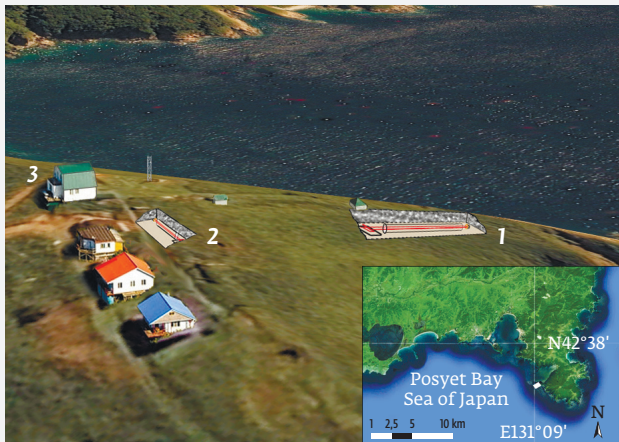


Рис. 3. Схема расположения лазерных деформографов. 1 – лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 52,5 м; 2 – лазерный деформограф с длиной измерительного плеча 17,5 м; 3 – лабораторное здание
Fig. 3. Layout diagram of laser strainmeters. 1 – laser strainmeter with a measuring arm length of 52.5 m; 2 – laser strainmeter with a measuring arm length of 17.5 m; 3 – laboratory building

вается крышкой. Помимо защитной клетки, снаружи прибора расположена эластичная емкость с воздухом, выходное отверстие которой с помощью трубки соединено с компенсационной камерой, расположенной в съемной крышке. Внутри корпуса находятся интерферометр Майкельсона, компенсационная камера, электромагнитный клапан и цифровая система регистрации. Последняя модификация прибора [12] позволила достичь следующих технических характеристик: рабочий диапазон от 0 (условно) – 1000 Гц; точность измерения вариаций гидросферного давления – 0,2 мПа; рабочие глубины – до 50 м, которые могут быть значительно улучшены за счет: 1) применения системы регистрации, обладающей лучшим быстродействием (до 10–100 кГц); 2) применения мембран меньшей толщины и/или большего диаметра (до 1 мкПа); 3) применения систем компенсации, обладающих большими возможностями (рабочие глубины до 400 м).

Лазерный нанобарограф был размещен в небольшом лабораторном здании (его местоположение на рис. 3 находится в середине линии, проведенной от лабораторного здания (точка 3) до лазерного деформографа «север-юг» (С-Ю, точка 1). Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления был установлен на шельфе с южной части м. Шульца на глубине 25 м.

a transmission device for the obtained experimental data to the experimental database. Most of the laser nanobarographs developed by us record the atmospheric pressure variations in the frequency range from 0 (conditionally) to 10,000 Hz with an accuracy of 50 μ Pa [7].

A two-coordinate laser strainmeter is used as a receiving system for the deformation processes of the Earth's crust. It consists of an unequal-arm laser strainmeter with a measuring arm length of 52.5 m, placed at an angle of 18° relative to the north-south (N-S) line, and an unequal-arm laser strainmeter of the west-east (W-E) type with a measuring arm length of 17.5 m, placed relative to the 52.5-m laser strainmeter at an angle of 92°. All laser strainmeters are based on an unequal-arm Michelson interferometer using the frequency-stabilized helium-neon lasers with a frequency stability in the 9–12th places as a light source. Figure 2 shows a general view of the underground beam waveguide of a 52.5-meter laser strain-

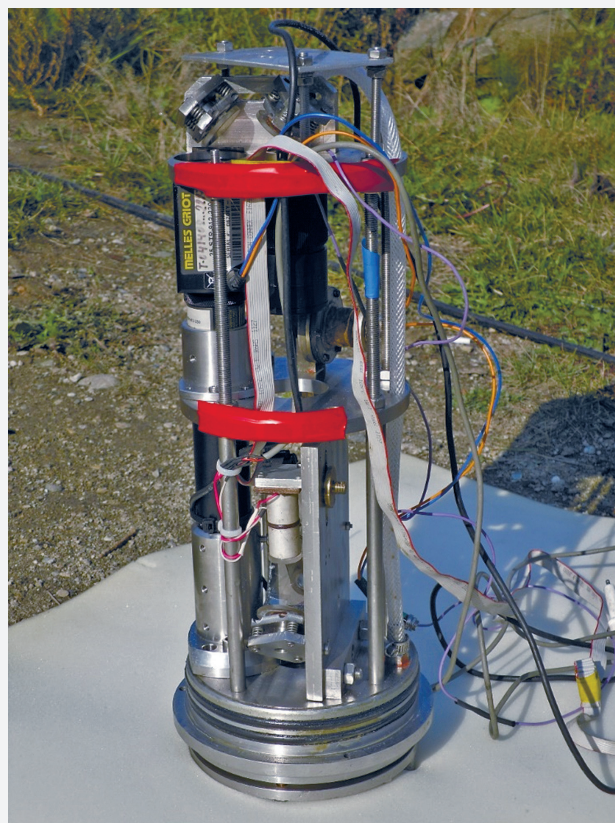
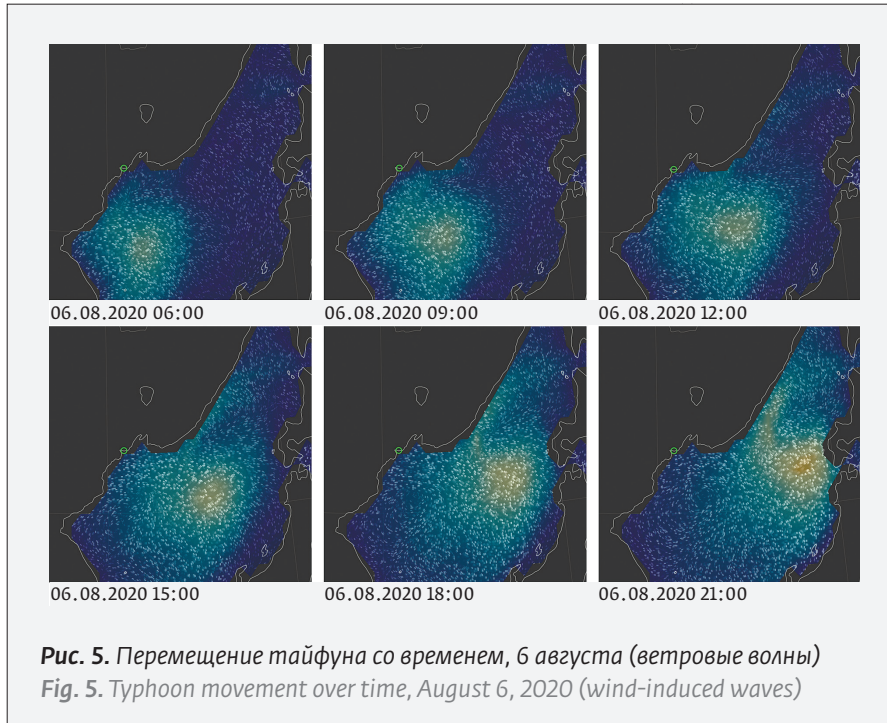


Рис. 4. Внутренний вид лазерного измерителя вариаций гидросферного давления
Fig. 4. Internal view of the laser meter of hydrospheric pressure variations



Вся полученная информация по кабельным линиям подавалась в лабораторное помещение (№ 3), где после предварительной обработки (фильтрация и децимация) записывалась на твердые носители, которые впоследствии вывозились во Владивосток, где с них данные перезаписывались в ранее созданную цифровую базу экспериментальных данных. В зависимости от поставленных задач в дальнейшем проводилась обработка полученных экспериментальных данных. В этой работе мы уделим внимание только микросейсмическому диапазону при решении некоторых вопросов происхождения и трансформации гидросферных, атмосферных и литосферных волн этого частотного диапазона.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные данные на указанных выше установках были получены во время продвижения тайфуна Хагупит по Японскому морю. Он зародился 31 июля 2020 года в Филиппинском море Тихого океана, который при своем продвижении вызывал в морях Тихого океана шторма. Интенсивность шторма достигла пика при падении давления в центре циклона до 975 Па. Циклон прошел по восточному побережью Китая. При выходе циклона на акваторию Желтого моря рейтинг циклона понизился до тропической депрессии, перейдя в разряд внетропического циклона. В этом статусе циклон вышел в Японское море 6 августа. При этом,

meter with a central interferential node and a frequency-stabilized laser providing the frequency stability in the 12th digits. Figure 3 demonstrates a schematic map of laser strainmeters on the measuring experimental test site «Cape Schultz» of the Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Figure 4 shows an internal view of a laser meter of hydrospheric pressure variations developed on the basis of a frequency-stabilized helium-neon laser that ensures the radiation frequency stability in the ninth place. It is placed in a cylindrical stainless-steel case fixed in a protection cage designed to secure the tool in the severe operating conditions (rock or muddy bottom). One side has

a cable entry opening. The other side is tightly sealed with a lid. In addition to the protection cage, there is an elastic container with air outside the device, the outlet of which is connected through a tube to a balance chamber located in a removable cover. A Michelson interferometer, a balance chamber, a solenoid valve and a digital recording system are located in the case. The latest modification of the device [12] has made it possible to obtain the following technical specifications: operating range from 0 (conditionally) to 1000 Hz; measurement accuracy of hydrospheric pressure variations – 0.2 MPa; operating depths – up to 50 m that can be significantly improved by: 1) the use of a recording system with the best response time (up to 10–100 kHz); 2) the use of membranes of smaller thickness and/or larger diameter (up to 1 μ Pa); 3) the use of compensation systems with the greater potential (working depths up to 400 m).

The laser nanobarograph was placed in a small laboratory building (in Fig. 3 it is located in the middle of the line drawn from the laboratory building (point 3) to the north-south laser strainmeter (N-S, point 1). The laser meter of hydrospheric pressure variations was installed offshore in the southern part of Cape Schultz at a depth of 25 m.

All data obtained were transmitted via the cable lines to the laboratory premises (No. 3), where, after preliminary processing (filtration and decimation), it was recorded on hard media subsequently taken to Vladivostok. The data were then rewritten into

несмотря на внетропический переход, метеорологические агентства продолжали отслеживать Хагупит как тропический шторм до 12 августа в связи с сохранением вихревой структуры и сохранением энергетического баланса от нагревающейся водной поверхности средних широт. Обработке мы подвергли данные, полученные 6 августа 2020 года. На рис. 5 приведены последовательные спутниковые картины ветрового волнения Японского моря, вызванные отмеченным тайфуном и полученные в рассматриваемую дату.

Рассматриваемый тропический циклон вызвал в Японском море ветровые волны, которые, выйдя из зоны действия тайфуна в виде волн зыби, при своем распространении и взаимодействии с дном на шельфе и в прибойной зоне возбудили первичные и вторичные микросейсмы. Первичные микросейсмы вызваны прогрессивными волнами зыби, период которых равен периоду прогрессивных волн. Вторичные микросейсмы вызваны стоячими морскими волнами, период которых равен половине периода прогрессивных волн зыби. При обработке мы выбрали несколько синхронных участков записей лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления.

С целью изучения природы возникновения возмущений в атмосфере, земной коре и в воде рассматриваемого микросейсмического диапазона, вызванных действующим тайфуном в Японском море, были обработаны результаты синхронных измерений лазерных систем. Данные приведены в таблице: «С-Ю» и «З-В» (N-S, W-E) – результаты, полученные с лазерных деформографов, «Нан» (Nan) – с лазерного нанобарографа и «ЛИВГД» (LMHPV) – с лазерного измерителя вариаций гидросферного давления.

При анализе результатов обработки мы отмечаем следующее:

1. В полученных спектрах обработанных записей 52,5-метрового лазерного деформографа в микросейсмическом диапазоне выделяются пики, соответствующие первичным и вторичным микросейсам. При этом амплитуды первичных микросейсм в 5–6 раз выше амплитуд вторичных микросейсм.
2. В полученных спектрах обработанных записей 17,5-метрового лазерного деформографа в микросейсмическом диапазоне выделяются пики, соответствующие первичным и вторичным микросейсам. При этом амплитуды вторичных микросейсм более выражены, чем амплитуды первичных микросейсм.

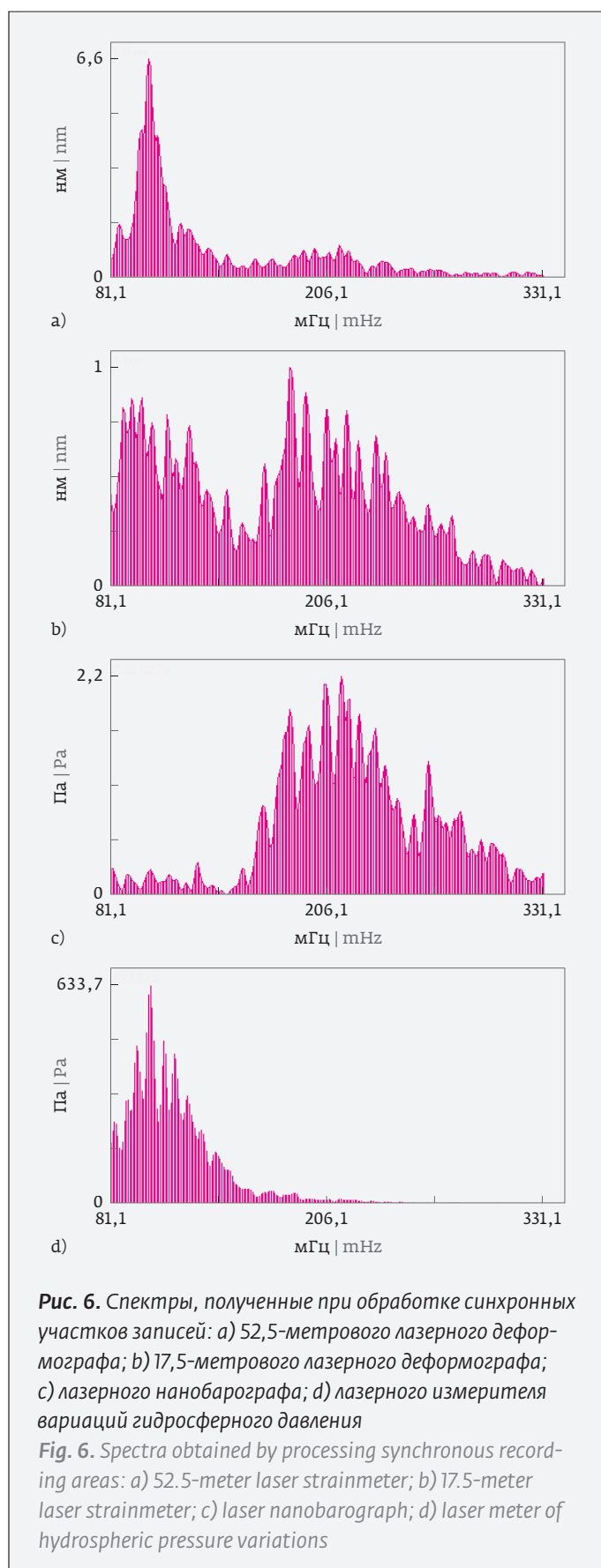


Рис. 6. Спектры, полученные при обработке синхронных участков записей: а) 52,5-метрового лазерного деформографа; б) 17,5-метрового лазерного деформографа; в) лазерного нанобарографа; д) лазерного измерителя вариаций гидросферного давления

Fig. 6. Spectra obtained by processing synchronous recording areas: а) 52.5-meter laser strainmeter; б) 17.5-meter laser strainmeter; в) laser nanobarograph; д) laser meter of hydrospheric pressure variations



3. В спектрах записей лазерного нанобарографа выделяются максимумы, соответствующие вторичным микросейсам. Максимумы, соответствующие первичным микросейсам, в записях лазерного нанобарографа не выделены.
4. В спектрах записей лазерного измерителя вариаций гидросферного давления выделяются максимумы, соответствующие прогрессивным волнам, но не выделяются максимумы, соответствующие стоячим морским волнам. В качестве примера на рис. 6 приведены спектры, полученные при спектральной обработке синхронных экспериментальных данных двух лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления, подтверждающие вышесказанное. Перед спектральной обработкой все записи были обработаны полосовым фильтром Хэмминга в частотном диапазоне 0,01–2 Гц с целью подавления мощных спектральных составляющих вне микросейсмического диапазона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе обработки и анализа полученных экспериментальных данных лазерных деформографов и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления установлено, что лазерный деформограф с длиной плеча 52,5 м, ось которого ориентирована перпендикулярно берегу, уверенно регистрирует первичные микросейсмические волны, возникающие в результате трансформации прогрессивных гравитационных морских волн, которые регистрируются лазерным измерителем вариаций гидросферного давления, установленным на дне на глубине 25 м недалеко от 52,5-метрового лазерного деформографа. Ось 17,5-метрового лазерного деформографа ориентирована по м. Шульца и в месте расположения почти перпендикулярна береговой линии. Данное расположение не позволяет этому лазерному деформографу также уверенно регистрировать первичные микросейсмические волны. Этот результат подтверждает то, что первичные микросейсмические волны относятся к поверхностным волнам продольного или рэлеевского типа.

Оба лазерных деформографа уверенно регистрируют вторичные микросейсмические волны. При этом выделенные амплитуды вторичных микросейсм на лазерных деформографах сравнимы по величине. С учетом того, что лазерный деформограф с длиной плеча 52,5 м в три раза больше лазерного деформографа с длиной плеча 17,5 м, можно определить примерное направление на локацию источника

the previously created digital experimental database. Depending on the tasks set, further processing of the obtained experimental data was performed. In this work, we will pay attention only to the microseismic range when solving some issues of the origin and transformation of hydrospheric, atmospheric, and lithospheric waves in this frequency range.

PROCESSING AND ANALYSIS OF THE OBTAINED EXPERIMENTAL DATA

The experimental data at the above facilities were obtained during the advance of Typhoon Hagupit across the Sea of Japan. It was developed on July 31, 2020 in the Philippine Sea of the Pacific Ocean and, during its movement, caused storms in the seas of the Pacific Ocean. The storm intensity was peak when the pressure in the cyclone center dropped to 975 Pa. The cyclone passed along the east coast of China. When the cyclone entered the Yellow Sea, the cyclone's rating dropped to a tropical depression, while entering the category of an extratropical cyclone. In this status, the cyclone entered the Sea of Japan on August 6, 2020. Moreover, despite the extratropical transition, the meteorological agencies continued to track Hagupit as a tropical storm until August 12, 2020 due to the vortex structure preservation and the remained energy balance from the heating water surface typical for the middle latitudes. We processed data received on August 6, 2020. Figure 5 shows the successive satellite images of wind-induced waves in the Sea of Japan, caused by the given typhoon, obtained on the date concerned.

The considered tropical cyclone caused the wind-induced waves in the Sea of Japan that, having left the typhoon effective area in the form of swell waves, excited the primary and secondary microseisms during their propagation and interaction with the offshore bed and in the reference zone. The primary microseisms are caused by the progressive swell waves, the period of which is equal to the period of progressive waves. The secondary microseisms are caused by the standing sea waves, the period of which is equal to half the period of progressive swell waves. During processing, we selected several synchronous recording areas of the laser strainmeters, a laser nanobaro-graph, and a laser meter of hydrospheric pressure variations.

In order to study the occurrence of disturbances in the atmosphere, the Earth's crust and in the water within the microseismic range under consideration, caused by an active typhoon in the Sea of Japan, the synchronous measurements results of laser systems were subject to processing. The data are given in the

Таблица. Результаты обработки синхронных участков записей лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления

Table. Results of processing synchronous sections of instrument recordings: laser strainmeters (N-S and W-E), laser nanobarograph (Nan) and laser meter of hydrospheric pressure variations (LMHPV)

Измерительный прибор Measuring device	Время регистрации сигналов Signal registration time						
	6 августа 19:50:23.5– 20:07:28.0 329_1	6 августа 20:31:50.0– 20:48:54.5 330_1	6 августа 21:48:58.5– 22:06:03.0 331_1	6 августа 22:39:52.0– 22:56:56.5 332_1	6 августа 23:43:48.0– 7 августа 00:00:52.5 333_1	7 августа 00:32:39.5– 00:49:44.0 334_1	7 августа 01:53:35.5– 02:10:40.0 335_1
С-Ю N-S	0,7 с (3,5 нм) 9,5 с (5,9 нм)	9,7 с (6,6 нм)	9,9 с (7,3 нм)	9,4 с (5,2 нм) 10,1 с (4,0 нм)	9,3 с (5,2 нм)	9,1 с (5,4 нм) 9,4 с (5,3 нм)	9,3 с (5,3 нм)
	20 уср 9,85 с (3,2 нм)	20 уср 9,6 с (3,7 нм)	20 уср 9,8 с (4,1 нм)	20 уср 9,5 с (3,3 нм)	20 уср 9,4 с (3,3 нм)	20 уср 9,3 с (3,5 нм)	20 уср 9,1 с (3,0 нм)
	4,7 с (1,2 нм)	4,7 с (1,0 нм) 5,0 с (0,95 нм)	5,0 с (1,16 нм) 4,4 с (0,96 нм)	5,1 с (1,0 нм) 4,8 с (0,94 нм)	4,7 с (0,95 нм) 5,3 с (0,90 нм)	4,6 с (1,3 нм) 5,2 с (1,1 нм)	4,6 с (0,78 нм) 4,3 с (0,78 нм)
	20 уср 4,7 с (0,84 нм)	20 уср 4,8 с (0,76 нм)	20 уср 5,0 с (0,76 нм)	20 уср 5,1 с (0,82 нм)	20 уср 4,7 с (0,74 нм)	20 уср 4,7 с (0,95 нм)	20 уср, 4,5 с (0,63 нм)
З-В W-E	4,9 с (1,1 нм)	5,4 с (1,0 нм) 5,2 с (0,91 нм)	–	–	5,3 с (1,2 нм) 5,0 с (1,1 нм)	5,3 с (0,98 нм) 4,7 с (0,88 нм)	5,1 с (0,95 нм) 5,3 с (0,81 нм)
	20 уср 4,95 с (0,75 нм)	20 уср 5,3 с (0,69 нм)	20 уср, 5,1 с (0,82 нм)	20 уср 5,3 с (0,7 нм)	20 уср 5,1 с (0,82 нм)	20 уср 4,85 с (0,69 нм)	20 уср, 5,1 с (0,63 нм)
Нан Nan	4,8 с (27,6 мПа)	4,7 с (21,5 мПа)	4,9 с (27,9 мПа)	5,3 с (26,5 мПа)	5,0 с (23,0 мПа)	4,7 с (29,8 мПа)	4,7 с (26,2 мПа)
	–	4,9 с (21,0 мПа)	5,1 с (24,6 мПа)	4,9 с (21,9 мПа)	4,5 с (21,0 мПа)	5,1 с (28,0 мПа)	–
	20 уср 4,9 с (21,4 мПа)	20 уср 4,7 с (16,4 мПа)	20 уср, 5,0 с (21,4 мПа)	20 уср 5,2 с (18,9 мПа)	20 уср 5,0 с (17,3 мПа)	20 уср 4,95 с (23,0 мПа)	20 уср 4,6 с (19,2 мПа)
ЛИВГД LMHPV	10,9 с (576,6 Па)	9,6 с (633,7 Па)	9,4 с (575,0 Па)	8,8 с (496,2 Па)	8,8 с (494,1 Па)	9,0 с (706,3 Па)	8,5 с (603,2 Па)
	9,5 с (540,0 Па)	–	–	10,6 с (402,0 Па)	9,3 с (464,6 Па)	8,6 с (607,6 Па)	8,9 с (542,4 Па)
	20 уср 9,9 с (398,6 Па)	20 уср 9,4 с (392,6 Па)	20 уср 9,3 с (431,5 Па)	20 уср 9,3 с (340,3 Па)	20 уср 9,0 с (367,2 Па)	20 уср 8,9 с (441,69 Па)	20 уср 8,5 с (431,3 Па)

генерации вторичных микросейсм с учетом того, что они относятся к волнам поперечного типа. По полученным экспериментальным данным 17,5-метрового и 52,5-метрового лазерных деформографов и с учетом поляризации вторичных микросейсм было определено направление на предполагаемое место их образования. Оно находится под углом 22,4° относительно оси 52,5-метрового лазерного деформографа или 40,4° относительно линии «север-юг».

Место генерации вторичных микросейсм, образованных в результате нагружающего воздействия стоячих гравитационных морских волн на дно, находится вне зоны расположения измерительного полигона. Этот вывод также подтверждается тем фактом, что в записях лазерного измерителя вари-

table: N-S, W-E represent the results obtained from the laser strainmeters, Nan – from a laser nanobarograph and LMHPV – from a laser meter of hydrospheric pressure variations.

When analyzing the processing results, we have noted the following. 1) In the obtained spectra of the processed records of the 52.5-meter laser strainmeter within the microseismic range, it is possible to determine the peaks corresponding to the primary and secondary microseisms. Moreover, the amplitudes of primary microseisms are 5–6 times higher than the amplitudes of secondary microseisms. 2) In the obtained spectra of the processed records of the 17.5-meter laser strainmeter within the microseismic range, it is possible to determine the peaks corresponding to the primary and secondary microseisms.

аций гидросферного давления не выделены максимумы, соответствующие стоячим морским волнам, периоды которых в два раза меньше периодов прогрессивных морских гравитационных волн.

Выделенные максимумы в диапазоне вторичных микросейсм при обработке записей лазерного нанобарографа, но не выделенные из записей лазерного измерителя вариаций гидросферного давления свидетельствуют о том, что они вызваны вторичными микросейсмками, пришедшими из зоны их генерации, и регистрируемые лазерными деформографами. По данным лазерного нанобарографа и лазерных деформографов можно определить отношение амплитуд атмосферного давления и микросмещений. В среднем оно равно около 0,023 Па/нм, что примерно в три-четыре раза больше величины, полученной в работе [10] при регистрации рэлеевских волн от землетрясений и атмосферных возмущений, вызванных ими.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ, проект № 22-17-00121 «Возникновение, развитие и трансформация геосферных процессов инфразвукового диапазона».

REFERENCES

1. **Hasselmann K.** A statistical analysis of the generation of microseisms. *Rev. Geophys.* 1963;1: 177–209.
2. **Longuet-Higgins M.S.** A theory of the origin of microseisms. *Phil. Trans. R. Soc. London. Ser. A.* 1950; 243: 1–35.
3. **Sidorov V. K., Tarantin M. V.** O prirode nizkochastotnykh maksimumov v spektrah sejsmicheskikh shumov. *Fizika Zemli.* 2013;1: 63–67.
Сидоров В. К., Тарантин М. В. О природе низкочастотных максимумов в спектрах сейсмических шумов. *Физика Земли.* 2013;1: 63–67.
4. **Nishida K., Kobayashi N., Fucao Y.** Resonant oscillations between the solid Earth and atmosphere. *Science.* 2000; 287: 2244–2246.

Moreover, the amplitudes of secondary microseisms are more significant than the amplitudes of primary microseisms. 3) In the spectra of the laser nanobarograph records, it is possible to determine maxima corresponding to the secondary microseisms. The maxima corresponding to the primary microseisms are not identified in the laser nanobarograph records. 4) In the recording spectra of the laser meter of hydro-spheric pressure variations, it is possible to determine maxima corresponding to the progressive waves, however, the maxima corresponding to the standing sea waves are not established. As an example, Figure 6 shows the spectra obtained by the spectral processing of synchronous experimental data from two laser strainmeters, a laser nanobarograph, and a laser meter of hydrospheric pressure variations, confirming the above-given details. Prior to the spectral processing, all records were processed using a Hamming bandpass filter in the frequency range of 0.01–2 Hz in order to suppress powerful spectral components beyond the microseismic range.

CONCLUSION

In the course of processing and analyzing the experimental data obtained from the laser strainmeters and a laser meter of hydrospheric pressure variations, it was found that a laser strainmeter with an arm length of 52.5 m, the axis of which is located perpendicular to the shore, steadily records the primary microseisms resulting from the transformation of progressive gravitational sea waves that are recorded by a laser meter of hydrospheric pressure variations installed on the bottom at a depth of 25 m not far from a 52.5-meter laser strainmeter. The axis of the 17.5-meter laser

Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400–1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250–2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190–3450 нм



Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 200–9000 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030–1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 20 ТВт





5. Dolgikh G. I., Kovalev S. N., Koren' I. A., Ovcharenko V. V. A Two-Coordinate Laser Strainmeter. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1998; 34(11): 946–950.
Долгих Г. И., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В. Двухкоординатный лазерный деформограф. *Физика Земли*. 1998;11: 76–81.
6. 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;38(8): 686–689.
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; 8:69–73.
7. Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Koren I. A., Novikova O. V., Ovcharenko V. V., Okuntseva O. P., Shvets V. A., Chupin V. A., Yakovenko S. V. A laser nanobarograph and its application to the study of pressure-strain coupling. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2004; 40(8):683–691.
Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Корень И. А., Новикова О. В., Овчаренко В. В., Окунцева О. П., Швец В. А., Чупин В. А., Яковенко С. В. Лазерный нанобарограф и его применение при его изучении бародеформационного взаимодействия. *Физика Земли*. 2004; 8: 82–90.
8. Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Kovalyov 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.
9. Dolgikh G. I., Batyushin G. N., Valentin D. I., Dolgikh S. G., Kovalev S. N., Koren' I. A., Ovcharenko V. V., Yakovenko S. V. Seismoacoustic hydrophysical complex for monitoring the atmosphere-hydrosphere-lithosphere system. *Instruments and Experimental Techniques*. 2002; 45(3): 401–403.
Долгих Г. И., Батюшин Г. Н., Валентин Д. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В., Яковенко С. В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы «атмосфера-гидросфера-литосфера». *Приборы и техника эксперимента*. 2002. № 3. С. 120–122.
10. Canitano A. Observation and Theory of Strain-Infrasound Coupling during Ground-Coupled Infrasound Generated by Rayleigh Waves in the Longitudinal Valley (Taiwan). *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020;110(6):2991–3003.
11. Bowman D. C., Lees J. M. Upper atmosphere heating from ocean-generated acoustic wave energy. *Geophysical Research Letters*. 2018;45:5144–5150. <https://doi.org/10.1029/2018GL077737>.
12. Dolgikh G. I., Budrin S. S., Dolgikh S. G., Plotnikov A. A. Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations. *Sensors*. 2020;20(23):6998.

АВТОРЫ

- Долгих Григорий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., dolgikh@poi.dvo.ru, Лаборатория физики геосфер, директор, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН), Владивосток.
ORCID: 0000-0002-2806-3834
- Будрин Сергей Сергеевич, к. ф.-м. н., н. с., Лаборатория физики геосфер, ТОИ ДВО РАН, Владивосток.
ORCID: 0000-0001-7462-9459
- Давыдов Александр Владимирович, к. ф.-м. н., н. с., Лаборатория физики геосфер, ТОИ ДВО РАН, Владивосток.
- Долгих Станислав Григорьевич, к. ф.-м. н., в. н. с., Лаборатория физики геосфер, ТОИ ДВО РАН, Владивосток.
ORCID: 0000-0001-9828-5929
- Мишаков Александр Владиславович, к. ф.-м. н., ст. преподаватель, Отделение математики, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток.
- Чупин Владимир Александрович, к. ф.-м. н., в. н. с., Лаборатория физики геосфер, ТОИ ДВО РАН, Владивосток.
ORCID: 0000-0001-5103-8138
- Швец Вячеслав Александрович, к. т. н., в. н. с., Лаборатория физики геосфер, ТОИ ДВО РАН, Владивосток.
ORCID: 0000-0002-4752-6865

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конкурирующих финансовых интересов, а также отсутствует реальный или потенциальный конфликт интересов, имеющий отношение к результатам, описанным в данной статье.

strainmeter is placed along Cape Schulz and at its point of location is almost perpendicular to the coastline. This place does not allow this laser strainmeter to reliably record primary microseisms in a similar way. This result confirms that the primary microseisms are P- or Rayleigh-type surface waves.

The secondary microseisms are accurately recorded by both laser strainmeters. In this case, the amplitudes of secondary microseisms determined by the laser strainmeters are comparable in magnitude. Having considered the fact that the laser strainmeter with an arm length of 52.5 m is three times larger than the laser strainmeter with an arm length of 17.5 m, it is possible to determine the approximate direction to the location of the source of secondary microseisms, with due regard to their classification as the transversal waves. According to the obtained experimental data of the 17.5-meter and 52.5-meter laser strainmeters and in consideration of the polarization of secondary microseisms, the direction to the supposed place of their generation was found. It is located at an angle of 22.4° relative to the axis of the 52.5-meter laser strainmeter or 40.4° relative to the north-south line.

The generation point of secondary microseisms developed as a result of the loading effect of standing gravitational sea waves on the bottom, is located outside the measuring site area. Moreover, this conclusion is confirmed by the fact that the records of the laser meter of hydrospheric pressure variations do not demonstrate maxima corresponding to the standing sea waves, the periods of which are two times less than the periods of progressive gravitational sea waves.

The maxima in the range of secondary microseisms emphasized during processing of the laser nanobarograph records, but not highlighted in the records of the laser meter of hydrospheric pressure variations, indicate that they are caused by the secondary microseisms obtained from their generation area and are recorded by the laser strainmeters. Based on the data of a laser nanobarograph and laser strainmeters, it is possible to determine the ratio of atmospheric pressure amplitudes and micromovements. On average, it is about 0.023 Pa/nm that is approximately three to four times greater than the value obtained in [10] when registering the Rayleigh waves resulting from the earthquakes and atmospheric disturbances caused by them.

SOURCE OF FUNDING

The work was partially supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-17-00121 «Emergence, development and transformation of geospheric processes in the infrasonic range».

VIII Международная конференция

АРКТИКА-2023

Арктика: устойчивое развитие

2–3 марта 2023, г. Москва

Стань участником

Специализированная выставка | Спонсорство

Тел. +7 (495) 662-97-49 (многоканальный)

Электронная почта: arctic@s-kon.ru

www.arctic.s-kon.ru

Официальная поддержка:



Организаторы:

