

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 551.46:550.3:551.5

КРЫМСКИЙ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

©2026 г. Г. И. Долгих^{a,*}, М. А. Болсуновский^{a,b,}, А. В. Гармашов^c,
В. А. Дулов^c, О. Б. Кудинов^c, А. А. Латушкин^c, В. К. Фищенко^a,
В. А. Чупин^a, В. А. Швеца^a, С. В. Яковенко^a**

^aТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва

Дальневосточного отделения Российской академии наук

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

^bИнститут автоматики и процессов управления

Дальневосточного отделения Российской академии наук

Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио, 5

^cМорской гидрофизический институт Российской академии наук

Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2

**e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru*

***e-mail: bolsunovsky.ma@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 23.08.2025 г.

После доработки 28.09.2025 г.

Принята к публикации 30.10.2025 г.

Приведено описание 15.1-метрового лазерного деформографа, установленного в Кацивели (Крым), предназначенного для регистрации микросмещений земной коры на базе прибора в частотном диапазоне от нуля (условно) до 1000 Гц с точностью 0.1 нм. Основной интерференционный узел лазерного деформографа установлен на бетонном основании, жестко соединенном с верхним слоем земной коры, а уголкового отражатель расположен на другом бетонном основании, которое установлено на песчаной подушке. Между основным интерференционным узлом и уголкового отражателем луч частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера распространяется по герметичному лучеводу. В море на глубине 28 м и на удалении 580 м от лазерного деформографа установлен лазерный измеритель вариаций давления, предназначенный для регистрации изменений придонного гидростатического давления в частотном диапазоне от нуля (условно) до 1000 Гц с точностью 13.5 мПа. Вся информация, полученная данными установками, по кабельным линиям поступает в лабораторное помещение, где после предварительной обработки помещается в базу экспериментальных данных. Проведенные синхронные тестовые испытания лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления продемонстрировали их большие возможности по изучению колебаний и волн микросейсмического диапазона.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение физики возникновения, развития и трансформации колебаний и волн геосфер инфразвукового диапазона (с периодом от нескольких секунд до суток) является актуальным направлением, связанным, прежде всего, с необходимостью определения первоисточников конкретных колебаний и волн, с зарождением и развитием катастрофических и не катастрофических геосферных процессов и явлений.

Начиная с секундного диапазона, можно отметить, что источником данных колебаний могут быть очаговые зоны землетрясений (как правило, очаговая зона землетрясения с магнитудой, равной, например 6, генерирует колебания, начиная с диапазона 15–20 с), минигеоблоки, ветровые волны и волны зыби, генерируемые ими первичные и вторичные микросейсмы. 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. Продолжительность периода первичных микросейсм равны продолжительности периодов прогрессивных ветровых волн, а продолжительность периодов вторичных микросейсм равны половинам продолжительности периодов прогрессивных морских волн. Продолжительность периодов первичных и вторичных микросейсм зависят от продолжительности периодов морских ветровых волн, которые связаны со скоростью и временем действия ветра, а также площадью и глубиной водной акватории, над которой действует ветер. Понятно, что ветровые волны возникают на любой водной поверхности, но их параметры зависят от параметров акваторий. В озерах могут тоже возникать ветровые волны, имеющие периоды большей продолжительности. Так, например, при анализе записей лазерного деформографа, который установлен на Краснокаменском геодинамическом полигоне [3], было обнаружено, что в микросейсмическом диапазоне наблюдаются два устойчивых пика в диапазонах 6–7 с и 3–4 с, второй из которых вызван ветровыми волнами близлежащего озера Умыкий, этот пик исчезает в зимнее время наблюдений. Пик в диапазонах 6–7 с существует всегда, более того, его амплитуда резко возрастает после выполнения взрывных работ в шахте. Резкое возрастание амплитуды пика микросейсмического диапазона 6–7 с может быть связано с возбуждением минигеоблока, находящегося в зоне расположения лазерного деформографа. Не исключено возбуждение волн микросейсмического диапазона атмосферными процессами по аналогии с возбуждением инфрагравитационного шума Земли, пульсациями атмосферного давления в резонансном и околорезонансном случаях [4], а также порывами ветра. В работе [5] изучено нелинейное взаимодействие ветровых морских волн с инфрагравитационными морскими

волнами, зарегистрированное лазерно-интерференционными системами, расположенными на полигоне Японского моря.

Но определением первоисточников различных волновых и неволновых 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 от 1 до 20 с, генерируемых землетрясениями [6]. Но такие же волны возбуждаются гравитационными морскими волнами, в этом же диапазоне, 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 которой может происходить повышение температуры мирового океана и атмосферы? Есть работы, в которых данные эффекты изучаются на начальном уровне, например [7]. 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.

С целью решения задач, обозначенных во Введении, в планетарных масштабах необходимо создание распределенной сети высокоточных измерительных систем, обладающих высокой чувствительностью и широким рабочим диапазоном частот (весь инфразвук и низкочастотная область звука). В рамках проекта “Исследование процессов и закономерностей возникновения, развития и трансформации катастрофических явлений в океанах и на континентах методами сейсмоакустического мониторинга” на территории Российской Федерации создается лазерная интерферометрическая сейсмоакустическая обсерватория [8, 9], один из опорных пунктов которой должен быть размещен в Крыму с основным оборудованием, состоящим из лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления. В июне 2025 года оба прибора были установлены, протестированы, в настоящее время они запускаются для выполнения непрерывных мониторинговых работ. В настоящей статье приводятся результаты их тестовых испытаний.

2. ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

Лазерно-интерференционный комплекс состоит из берегового лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления, которые расположены в Качивели на территории Черноморского гидрофизического подспутникового полигона.

Лазерный деформограф установлен в точке с координатами 44°24' с.ш. 33°59' в.д. и ориентирован под углом 76° от направления север–юг и, соответственно, 14° от направления запад–восток. Общая длина измерительного плеча интерферометра равна 15.1 м. Основной интерференционный узел интерферометра, состоящий из частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, коллиматора, пьезокерамики с зеркалами управления и фотодетектора, смонтирован на оптическом столе, который расположен на бетонном блоке (рис. 1). От основного интерференционного узла, который расположен на бетонном блоке, до углового отражателя, установленного на песчаной подушке, и обратно луч лазера распространяется по герметичному лучеводу длиной 15.1 м (рис. 2). Вся установка размещена в полуподземном исполнении с использованием бетонного сооружения. Такое решение упростило ввод в эксплуатацию, но обусловило необходимость дополнительной тепловой изоляции от солнечного излучения. В перспективе планируется провести дополнительную защиту элементов оборудования от воздействий солнечного излучения и погодных факторов для обеспечения более высокой стабильности работы лазерного деформографа, а также меньшей зависимости от метеорологических факторов. Тем не менее использование частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, обеспечивающего стабильность частоты в девятом знаке, и современные методы интерферометрии позволили проводить измерения вариаций смещений на измерительной базе прибора (15.1 м) с точностью 0.1 нм. При обеспечении дополнительной гидротермоизоляции и с применением лучшего лазера можно достичь точности измерения смещения на базе прибора на порядок лучше.

Рис.1. Основной интерференционный узел лазерного деформографа.

Рис. 2. Оптический стол, настроенный компьютер и начало герметичного лучевода.

Лазерный измеритель вариаций давления установлен на морском дне со стационарной океанографической платформы Морского гидрофизического института Российской Академии наук на глубине 28 м. Координаты места установки 44°24' с.ш., 33°59' в.д. Удаление от стационарного лазерного деформографа составляет 580 м, минимальное удаление от береговой полосы равно 440 м. Прибор собран на основе интерферометра Майкельсона равноплечего типа с использованием в качестве источника излучения частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, он полностью аналогичен нашим установкам, описанным в работах [10, 11]. Внутренний вид прибора приведен на рис. 3. Точность измерения вариаций гидростатического давления примерно равна 13.5 мПа в рабочей полосе прибора.

Рис. 3. Внутренний вид лазерного измерителя вариаций давления (слева) и внешний герметичный кожух (справа).

Все лазерно-интерференционные установки работают в полосе частот от нуля (условно) до 1000 Гц. На рис. 4 приведена карта расположения лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления, от которых вся полученная информация по кабельным линиям поступает в режиме реального времени в лабораторное помещение, где после предварительной обработки, фильтрация и децимация заносится на хранение в базу экспериментальных данных для дальнейшей обработки и интерпретации.

Рис. 4. Карта расположения лазерно-интерференционных установок. ЛД – лазерный деформограф, ЛИВД – лазерный измеритель вариаций давления.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Лазерный измеритель вариаций давления проработал уверенно с 25.06.25 09:09 до 26.06.25 13:09, а потом вышел из строя из-за попадания воды в сигнальный кабель. В настоящее время он восстановлен, происходит его тестирование в лаборатории. Лазерный деформограф проработал уверенно с 22.06.25 14:02 по 25.06.25 15:27. Потом произошел небольшой сбой. После профилактики деформограф введен в режим непрерывной работы, в настоящее время он работает, измеряя смещение земной коры на базе прибора.

Учитывая небольшой промежуток их совместной работы, можно ожидать выделение из их записей сигналов, ответственных за поверхностное морское волнение, вызванное ветровыми волнами или волнами зыби. Лазерный измеритель вариаций давления регистрировал вариации придонного гидростатического давления, вызванные поверхностным волнением, а лазерный деформограф – микросейсмы, образованные в результате трансформации энергии морских ветровых волн в энергию верхнего слоя земной коры. Учитывая неустойчивую работу лазерного деформографа и непродолжительную работу лазерного измерителя вариаций давления, мы выделили четыре участка с хорошей синхронной работой на 25.06.25: 1) 09:08 – 12:29, 2) 13:19 – 16:08, 3) 16:55 – 23:26, 4) 23:28 – 03:04. Все данные были отфильтрованы полосовым фильтром Хэмминга в полосе 1–0.01 Гц, т.е. в полосе микросейсмического диапазона, отвечающего также и за морское волнение. На всех участках лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления выделены максимумы, отвечающие за морские ветровые волны в диапазоне 8–5 с с ожидаемыми небольшими различиями. Для примера на рис. 5 приведены спектры (при 10 усреднениях), полученные при обработке синхронных начальных сегментов (25.06.2025 г. 23:37:37.0 – 23:44:41.5) записей лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления длительностью 1024 с четвертого участка, а на рис. 6 – спектры (при 10 усреднениях),

полученные при обработке синхронных конечных сегментов (26.06.2025 г. 02:46:49.5 – 03:03:54.0) записей лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления длительностью 1024 с четвертого участка.

На рис. 5 в микросейсмическом диапазоне в спектре лазерного деформографа выделяются максимумы с продолжительностью 7.9, 5.4 и 4.8 с, а в спектре лазерного измерителя вариаций давления – с продолжительностью 7.8, 5.7 и 5.1 с. На рис. 6 в микросейсмическом диапазоне в спектре лазерного деформографа выделяются максимумы продолжительностью 7.4, 5.4 и 4.6 с, а в спектре лазерного измерителя вариаций давления – с продолжительностью 7.5 и 4.7 с. Неправильно ожидать полного совпадения, так как измерения происходят не в одной точке и, более того, неизвестно, где в данном регионе Черного моря происходит наибольшая трансформация энергии морских ветровых волн в энергию микросейсм верхнего слоя земной коры. Но полученные довольно близкие совпадения по продолжительности периодов подтверждают уверенную регистрацию лазерным измерителем вариаций давления изменений придонного гидростатического давления, вызванных морским ветровым волнением, и уверенную регистрацию лазерным деформографом первичных микросейсм, вызванных морскими ветровыми волнами. Повышение энергии в спектре гидростатического давления на частоте чуть меньше 0.5 Гц вызвано, по-видимому, стоячими морскими волнами, образованными в результате взаимодействия набегающей и отраженной прогрессивных волн с продолжительностью 5.1 с (или 4.7 с). Вместо отраженной встречной волны возможно существование прогрессивной волны, возникшей вследствие рефракции набегающей волны вокруг естественного или искусственного препятствия.

Рис. 5. Спектры синхронных участков (25.06. 2025 г. 23:37:37.0 – 23:44:41.5) записей лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления (б).

Рис. 6. Спектры синхронных участков (26.06.2025 г. 02:46:49.5 – 03:03:54.0) записей лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления (б).

В заключение данного раздела приведем результаты, полученные на лазерном деформографе при регистрации возмущений, вызванных цунамигенным землетрясением, которое произошло 29 июля 2025 г. в 23:24:50 UTC с магнитудой около 8.8 в Тихом океане недалеко от Камчатки в месте с координатами 52°30'36" с.ш. 160°15'40" в.д. Одновременно возмущения, вызванные этим землетрясением, были зарегистрированы лазерными деформографами, расположенными на МЭС ТОИ ДВО РАН мыса Шульца. Крымский лазерный деформограф и лазерные деформографы, расположенные на мысе Шульца, вместе с другими подобными установками образуют Планетарную лазерную

интерферометрическую сейсмоакустическую обсерваторию [12], основной задачей которой является изучение катастрофических геодинамических процессов Земли с возможностью их оперативного краткосрочного прогноза. На рис. 7 приведены отфильтрованные участки записей крымского 15.1-метрового лазерного деформографа, ориентированного под углом 14° относительно линии запад–восток, и 17.5-метрового лазерного деформографа, установленного на мысе Шульца в месте с координатами $42^\circ 34' 56''$ с.ш.; $131^\circ 9' 24''$ в.д., ориентированного под углом 20° относительно линии запад–восток.

Рис. 7. Записи цунамигенного землетрясения лазерными деформографами, расположенными на м. Шульца (а) и в Кацивели (б).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Кацивели (Крым) установлен береговой лазерный деформограф, в море около поселка установлен лазерный измеритель вариаций давления, они совместно предназначены для выполнения мониторинговых измерений вариаций деформаций земной коры и колебаний гидростатического давления в частотном диапазоне от нуля (условно) до 1000 Гц с наноуровневой точностью. Проведенные синхронные тестовые испытания данных установок показали их большие возможности при изучении колебаний и волн микросейсмического диапазона. Дальнейшая работа лазерно-интерференционных приборов будет ориентирована на изучение катастрофических геодинамических и гидрофизических процессов Земли с возможностью их краткосрочного прогноза вместе с установками, входящими в создаваемую в настоящее время Планетарную лазерную интерферометрическую сейсмоакустическую обсерваторию [12]. Все эти установки объединены на территории России единой системой точного времени.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена частично в рамках программы “Исследование процессов и закономерностей возникновения, развития и трансформации катастрофических явлений в океанах и на континентах методами сейсмоакустического мониторинга” (грант № 075-15-2024-642).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hasselmann K.* // Rev. Geophys. 1963. V.1. P. 177. <https://doi.org/10.1029/RG001I002P00177>
2. *Longuet-Higgins M.S.* A theory of the origin of microseisms // Phil. Trans. R. Soc. London. Ser. A. 1950. V. 243. P. 1. <https://doi.org/10.1098/rsta.1950.0012>
3. *Rasskazov I.Yu., Dolgikh G.I., Petrov V.A., Lugovoy V.A., Dolgikh S.G., Saksin B.G., Tsoy D.I.* // J. Min. Sci. 2016. V. 52. P. 1052. <http://doi.org/10.1134/S1062739116061599>

4. *Nishida, K., Kobayashi, N. Fucao, Y. // Science. 2000. V. 287. P. 2244.*
<http://doi.org/10.1126/science.287.5461.2244>
5. *Dolgikh G., Dolgikh S. // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. № 7. P. 1442.*
<https://doi.org/10.3390/jmse11071442>
6. *Canitano A. // Bull. Seismol. Soc. Am. 2020. V. 110. № 6. P. 2991.*
<http://doi.org/10.1785/0120200154>
7. *Bowman D.C., Lees J.M. // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 5144.*
<http://doi.org/10.1029/2018GL077737>
8. *Долгих Г.И., Босуновский М.А., Будрин С.С. // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 4. С. 495.* <http://doi.org/10.15372/GIG2024173>
9. *Кульчин Ю.Н., Долгих Г.И., Ромашко Р.В., Собисевич А.Л., Каменев О.Т. // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 4. С. 537.* <http://doi.org/10.15372/GiG2024178>
10. *Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalyov S.N., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. // J. Mar. Sci. Technol. 2009. V. 14. № 4. P. 436.* <http://doi.org/10.1007/s00773-009-0062-5>
11. *Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Plotnikov A. // Sensors. 2020. V. 20. № 23. P. 6998.*
12. *Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Bolsunovskii M., Ivanov M. // Sensors. 2025. V. 25. № 1. P. 48.* <https://doi.org/10.3390/s25010048>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1.** Основной интерференционный узел лазерного деформографа.
- Рис. 2.** Оптический стол, настроенный компьютер и начало герметичного лучевода.
- Рис. 3.** Внутренний вид лазерного измерителя вариаций давления (слева) и внешний герметичный кожух (справа).
- Рис. 4.** Карта расположения лазерно-интерференционных установок. ЛД – лазерный деформограф, ЛИВД – лазерный измеритель вариаций давления.
- Рис. 5.** Спектры синхронных участков (25.06.2025 г. 23:37:37.0 – 23:44:41.5) записей лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления (б).
- Рис. 6.** Спектры синхронных участков (26.06.2025 г. 02:46:49.5 – 03:03:54.0) записей лазерного деформографа (а) и лазерного измерителя вариаций гидросферного давления (б).
- Рис. 7.** Записи цунамигенного землетрясения лазерными деформографами, расположенными на мысе Шульца (а) и в Кацивели (б).

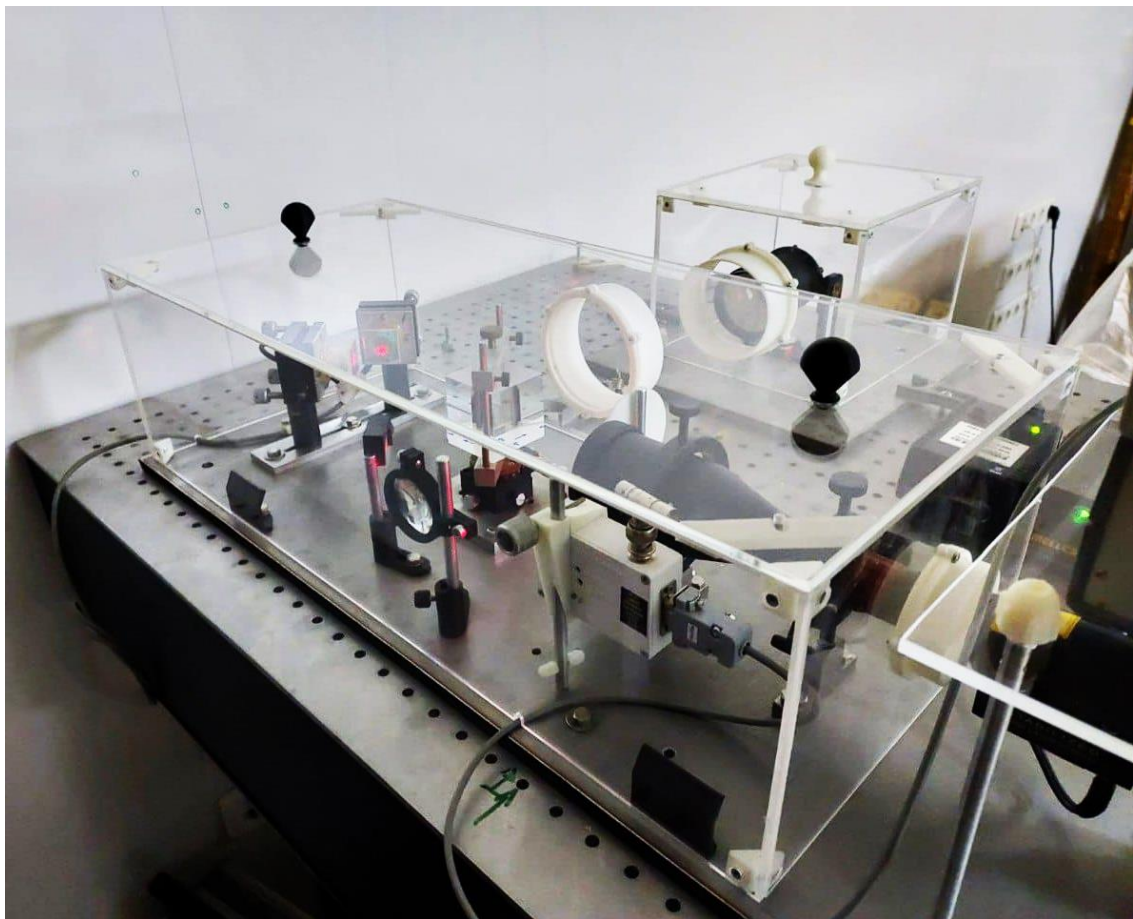


Рис. 1.

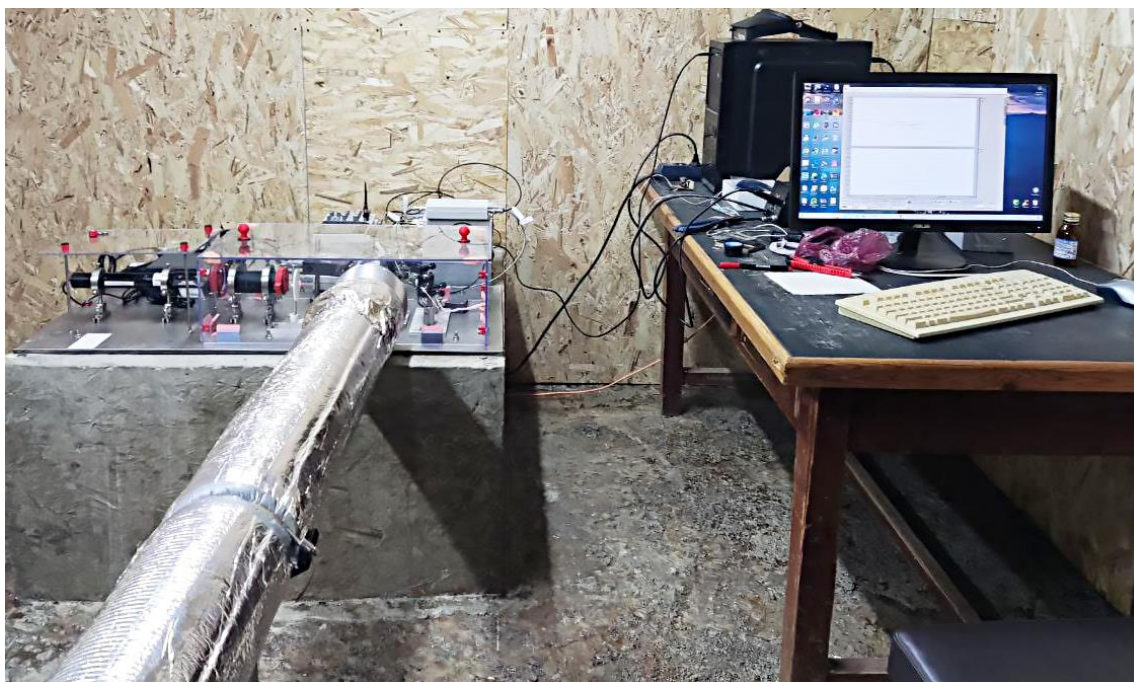


Рис. 2.



Рис. 3.

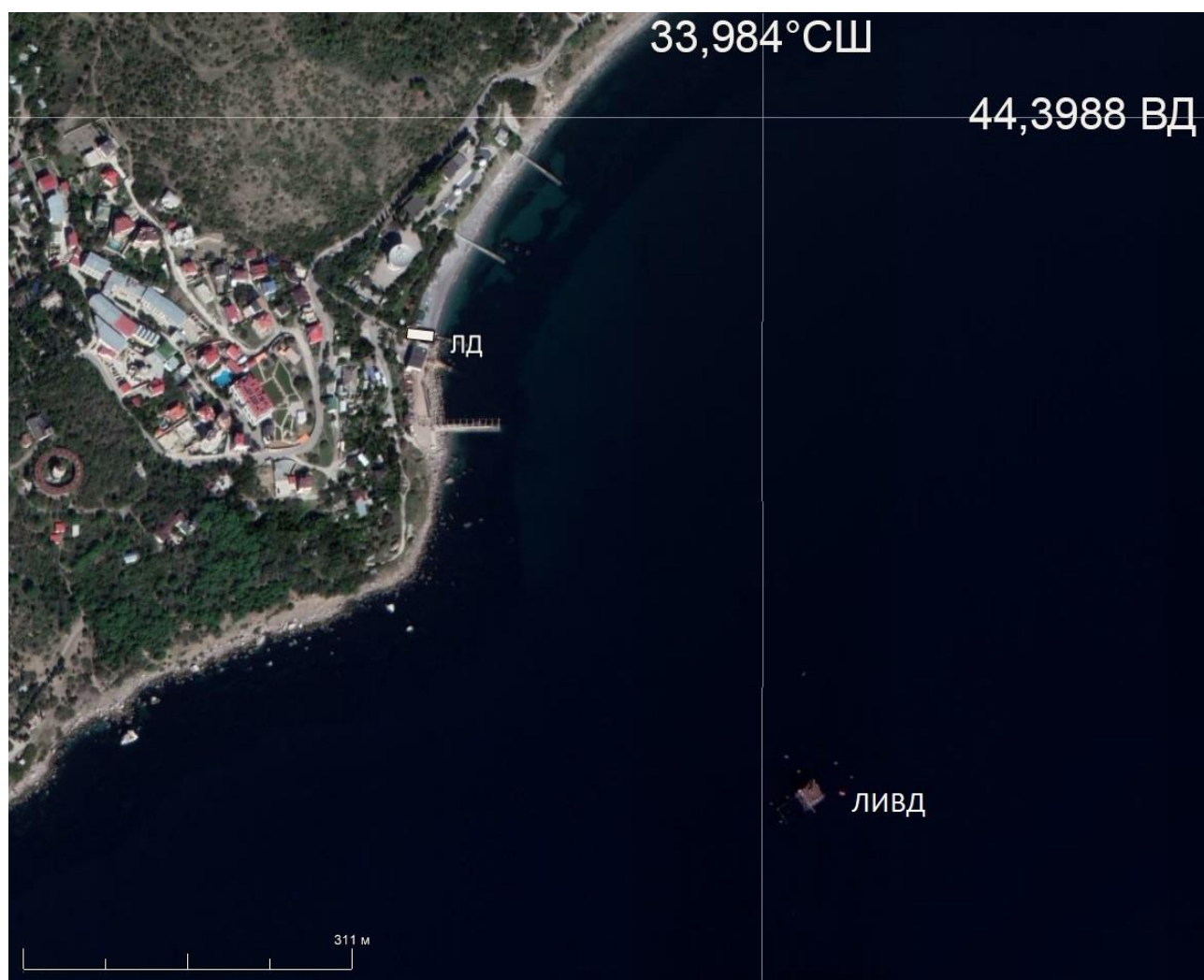


Рис. 4.

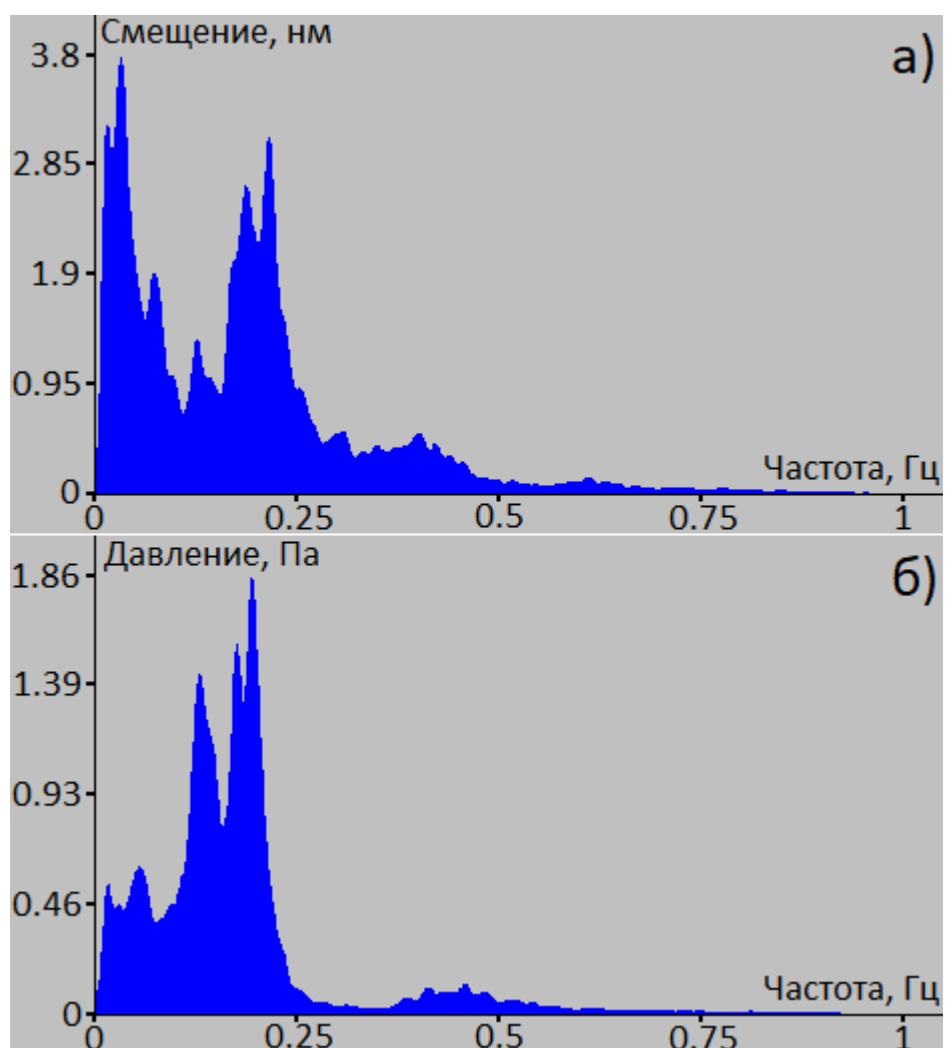


Рис. 5.

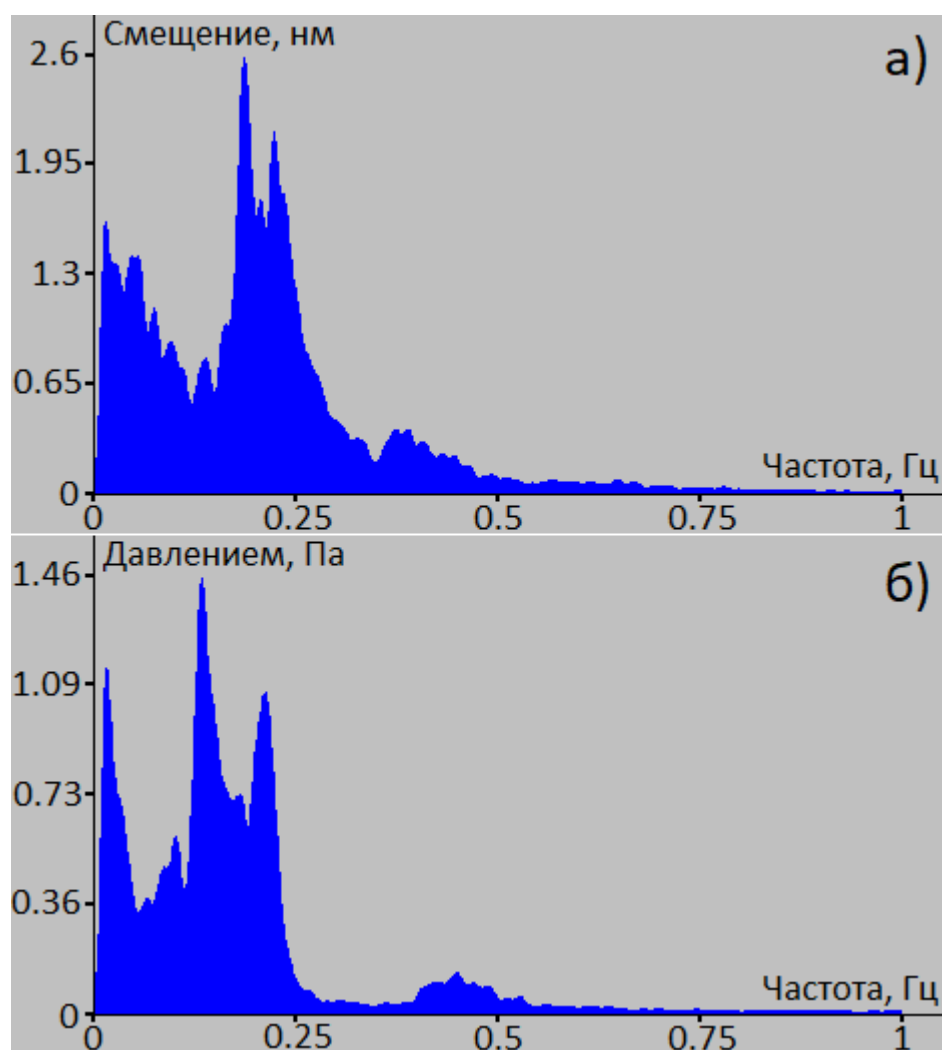


Рис. 6.

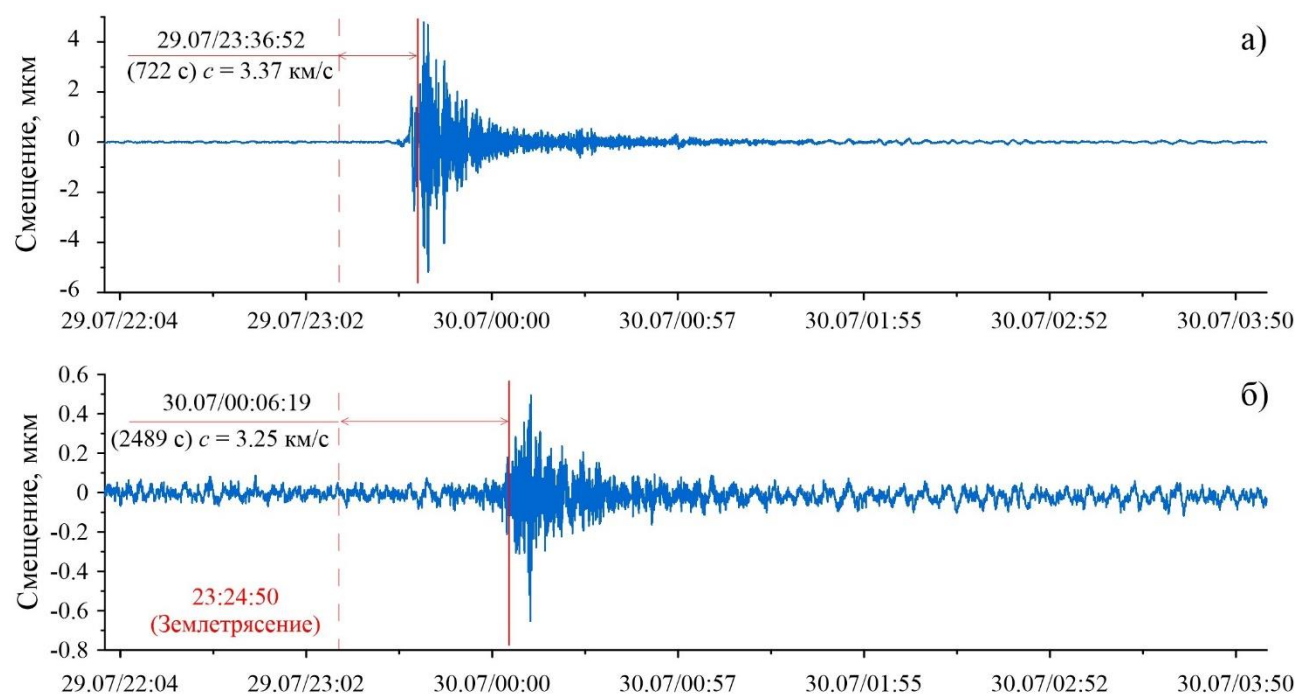


Рис. 7.