

УДК 551.46:550.3:551.5

# ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Г.И. Долгих, С.С. Будрин,  
С.Г. Долгих, С.Н. Ковалёв,  
А.А. Плотников, В.А. Чупин,  
В.А. Швец, С.В. Яковенко

Тихоокеанский океанологический  
институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,  
Владивосток<sup>1</sup>

Приведён обзор по созданным лазерно-интерференционным системам, предназначенным для измерения вариаций гидросферного давления в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц. Приведённые результаты обработки экспериментальных данных демонстрируют огромные возможности данных систем по изучению природы вариаций гидросферного давления звукового и инфразвукового диапазонов: гидроакустических сигналов различной сложности, поверхностных и внутренних морских волн, собственных колебаний акваторий, приливов. Отмечены значительные преимущества разработанных устройств при измерении вариаций гидросферного давления над уровнемерами, волнографами, донными станциями.

## ВВЕДЕНИЕ

Решение многих фундаментальных задач зависит в первую очередь от полученных экспериментальных результатов, качество которых определяется применяемой в исследованиях аппаратурой. Данная аппаратура должна удовлетворять трём следующим основным требованиям: 1) иметь предельную чувствительность, при которой возможны фоновые измерения изучаемых параметров; 2) обладать наивысшим частотным и динамическим диапазонами. Важность данных требований возрастает при изучении природных процессов на этапах их возникновения и развития. В любой области исследования очень сложно определить момент начала возникновения того или иного природного процесса. В океанологии сложность проведения данных исследований связана с тем, что возникающие природные процессы и явления имеют большие временные и пространственные

масштабы. Это требует применения при изучении данных природных процессов аппаратуры, в идеале обладающей неограниченными частотным и динамическим диапазонами при предельно достижимой чувствительности, которая определяется межатомным взаимодействием. Можно полагать, что минимальная чувствительность определяется размерами атома, а максимальная – его флуктуациями. Невозможность создания аппаратуры, удовлетворяющей вышеперечисленным требованиям, привела к бурному применению параметрических методов при проведении исследований природных процессов и явлений, особенно в инфразвуковом диапазоне. Так, в океанологии широко применяются высокочувствительные установки, рабочий диапазон частот которых не позволяет выполнять прямые измерения изучаемых параметров в инфразвуковом диапазоне. В этом случае применение параметрических методов возможно толь-

ко при выполнении одного из следующих условий:

- нелинейное взаимодействие процессов и явлений различных пространственных и временных масштабов;
- возбуждение высокочастотных процессов и явлений низкочастотными в среде, обладающей большой нелинейностью.

Поверхностный анализ выполнения данных условий позволяет понять, что при проведении исследований различных процессов на основе применения параметрических методов не может быть и речи об изучении физики процесса их возникновения, так как взаимодействие процессов и явлений различных временных и пространственных масштабов или возбуждение высокочастотных процессов и явлений низкочастотными наблюдается лишь на последних стадиях их развития. Применение различных уровнемеров,

<sup>1</sup> 690950, Владивосток, ул. Светланская, 50, тел.: (4232) 312352, факс: (4232) 312573, e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru.

мареографов и т.п. в океанологии не позволяет исследовать процессы и явления на стадии их возникновения, так как они не обладают достаточной чувствительностью.

Частотный спектр океанологических процессов очень широк. Для его изучения используются различные установки, созданные на основе использования прямых и параметрических методов измерения. К таким установкам относятся различные уровнемеры, волнографы, притопленные, ныряющие и плавающие буи, донные станции, оснащённые различными датчиками изучения волновых и неволновых процессов и явлений океана. Многие из этих датчиков созданы на основе использования зависимости вариаций гидросферного давления от изменения состояния гидросферных параметров и уровня поверхности гидросферы. К таким датчикам прежде всего относятся гидрофоны различных конструкций, приёмники силового и инерционного типов. Всем вышеуказанным установкам, которые применяются для изучения колебаний и волн Мирового океана и его неволновых процессов, присущи существенные недостатки. Основные из них заключаются в низкой чувствительности и существенно ограниченных частотном и динамическом диапазонах. Для каждой установки присущ хотя бы один из названных недостатков. Появление лазерных интерферометров [1–5] открыло возможность создания лазерно-интерференционных установок, измеряющих различные гидросферные параметры, которым не присущи вышеуказанные недостатки. Для измерения вариаций гидросферного давления в инфразвуковом и звуковом диапазонах были созданы установки на основе использования современных лазерно-интерференционных методов.

Впоследствии они были названы лазерными измерителями вариаций давления гидросферы и лазерными гидрофонами. Данным установкам присущи высокая точность, широкий частотный и динамический диапазоны.

**■ Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ)**

Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы создан на основе использования современных лазерно-интерференционных методов [6, 7]. Его оптическая схема построена по принципу модифицированного интерферометра Майкельсона, в котором в качестве источника света применён частотно стабилизированный лазер ЛГН-303. Конструктивно он помещен в цилиндрический корпус, в котором находятся интерферометр и цифровая система регистрации. Для компенсации внешнего давления прибор имеет компенсационную камеру (рис. 1).

Работа ЛИВДГ при погружении или поднятии производится следующим образом. Для управления подачей воздуха в компенсационную камеру или обратно прибор снабжен редуктором и клапаном (6). При погружении по команде от-

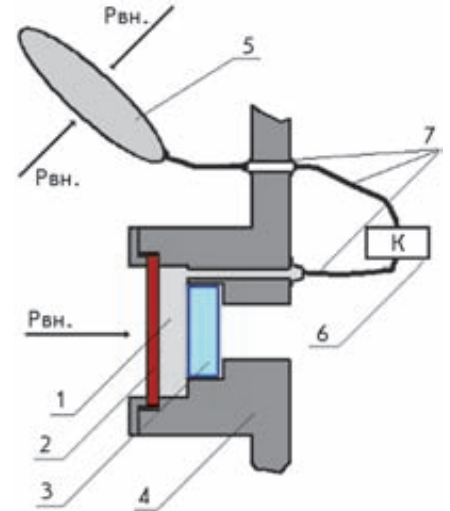


Рис. 1. Схема компенсационной камеры: 1 – наполненная воздухом область компенсационной камеры; 2 – мембрана; 3 – прозрачная пластина; 4 – фрагмент корпуса лазерного измерителя вариаций давления гидросферы; 5 – внешняя камера; 6 – клапан; 7 – соединительные шланги

крывается клапан и с внешней воздушной камеры (5) в компенсационную камеру (1) поступает воздух. При этом уравнивается внешнее давление с давлением внутри компенсационной камеры. При достижении заданной глубины клапан закрывается, и ЛИВДГ готов к работе. Компенсация давления необходима для того, чтобы мембрана с зеркальным напылением, которая является основным рабочим элементом прибора, находилась в нейтральном состоянии.

Оптическая схема ЛИВДГ приведена на рис. 2.

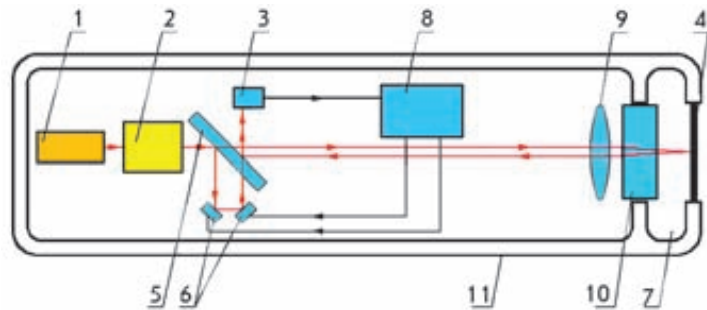


Рис. 2. Оптическая схема ЛИВДГ: 1 – лазер; 2 – оптический затвор и коллиматор; 3 – фотодиод; 4 – мембрана с наклеенным зеркалом; 5 – полупрозрачная плоско-параллельная пластина ПИ-100; 6 – плоско-параллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах типа PZT фирмы Clevite; 7 – компенсационная камера; 8 – система регистрации; 9 – линза; 10 – плоско-параллельная пластина; 11 – герметичный корпус прибора

Фотография действующей установки без системы регистрации и закрывающей части корпуса приведена на рис. 3.

Луч гелий-неонового лазера (1) проходит через оптический затвор (2) и попадает на полупрозрачную плоско-параллельную пластину (5), после которой разделяется на два, опорный и измерительный. Измерительный луч попадает в систему «глаз кошки», состоящую из линзы (7) и отражающего зеркала, прикреплённого к мембране (4) (есть также вариант полировки мембраны до зеркального состояния, в этом случае зеркало отсутствует и фокусировка производится прямо на поверхности мембраны). Обратной своей стороной мембрана непосредственно контактирует с морской водой, передающей ей вариации гидросферного давления. Отразившись от зеркала, луч вновь попадает на линзу и затем на плоско-параллельную пластину, где он сбивается с опорным лучом. При точной и правильной настройке они образуют на фотодиоде (3) интерференционную картину. Для того чтобы получить высокую чувствительность прибора, необходимо работать с мембранами довольно малой толщины (менее 1 мм) и большим диаметром (более 10 см).

Измерение вариаций давления ЛИВДГ происходит следующим образом. Вариации давления воздействуют на мембрану с зеркальным напылением (4), тем самым смещая ее центр относительно положения равновесия. Смещение центра мембраны приводит к изменению оптического пути измерительного луча, что, в свою очередь, приводит к отклонению интерференционной картины от максимума. Система регистрации устроена таким образом, что данное изменение длины оптического пути измерительного

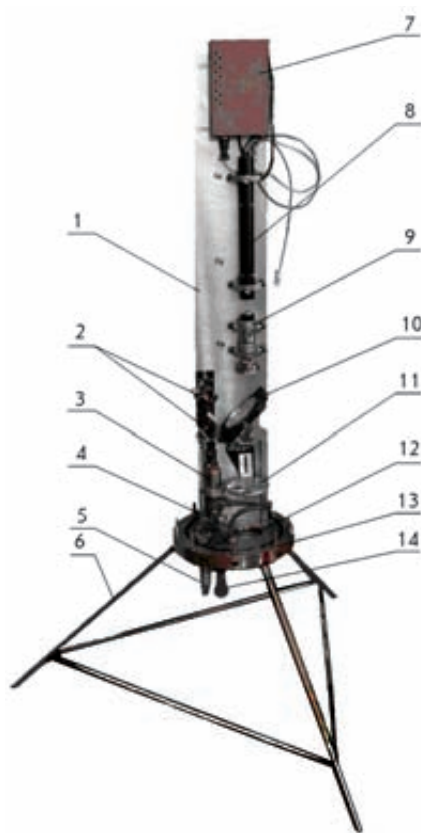


Рис. 3. Устройство ЛИВДГ: 1 – оптическая скамья; 2 – подвижные юстировочные зеркала интерферометра; 3 – клапан системы компенсации наружного давления; 4 – воздушные шланги; 5 – гермоввод; 6 – опорное устройство; 7 – блок питания лазера ЛГН303; 8 – лазер ЛГН303; 9 – коллиматор; 10 – делительная пластина; 11 – линза; 12 – измерительная мембрана с отражающим покрытием; 13 – крепёжные болты для установки герметичного корпуса; 14 – контрольный гидрофон

луча она компенсирует, меняя длину оптического пути опорного луча, тем самым удерживая интерференционную картину на максимуме. Величина смещения центра мембраны, пропорциональная внешнему давлению, является выходным сигналом. Компенсация осуществляется путем подачи напряжения на пьезокерамику компенсации, достаточного для ее продольного расширения на величину, равную величине смещения центра мембраны. Если смещение центра мембраны превышает максимальную величину продольного расширения пьезокерамики, то си-

стема регистрации захватывает соседний максимум интерференционной картины. Таким образом, достигается широкий динамический диапазон, ограниченный только свойствами мембраны.

Чувствительным элементом ЛИВДГ является мембрана с зеркальным напылением. Вариации давления, которое регистрирует прибор, можно рассчитать в соответствии с [8].

Исходя из принципа снятия информации об изменяющемся гидросферном давлении можно считать, что ЛИВДГ измеряет абсолютную величину. Это следует из того, что вариации гидросферного давления практически не изменяют длину одного плеча интерферометра. Данное плечо монтируется на оптической скамье интерферометра, которая находится внутри донной станции и не контактирует с её корпусом. Корпус донной станции представляет собой цилиндр, одевающийся на массивный фланец. Фланец изготовлен из нержавеющей стали. Минимальная толщина одной из стенок фланца равна 1 см. Второе плечо интерферометра подвержено сильным изменениям, обусловленным деформацией мембраны под воздействием переменного гидросферного давления.

Лазерно-интерференционные методы позволяют измерять  $\Delta l$  с точностью  $0,3 \cdot 10^{-9}$  м в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц. Минимально измеряемое давление при указанной мембране будет равно 0,45 мПа. При увеличении диаметра мембраны или уменьшении её толщины чувствительность лазерного измерителя вариаций давления гидросферы значительно улучшается.

## ■ Испытания ЛИВДГ

В период с 28 октября по 1 ноября 2006 года были про-

ведены испытания модернизированного ЛИВДГ в бухте Витязь залива Петра Великого Японского моря. 28 октября была выполнена его постановка на глубину 2 м с помощью научно-исследовательского судна «Малахит». 31 октября 2006 года прибор был переставлен на глубину 7,5 м, где проводились непрерывные измерения вариаций уровня гидросферного давления в период с 19 ч 00 мин 31 октября по 13 ч 17 мин 1 ноября 2006 года. В отдельные промежутки времени у противоположного берега бухты на удалении в 1 милю от места расположения ЛИВДГ работал низкочастотный гидроакустический излучатель по заранее созданной программе, включающей несколько серий излучения простых и сложных сигналов. Излучатель располагался на глубине 17 м. Его рабочий диапазон частот находится в пределах от 240 до 260 Гц.

В период измерения (28 октября – 1 ноября) были следующие погодные условия: изменение атмосферного давления у поверхности моря в пределах от 1011 до 1022 гПа, средняя температура – 8,1° С, скорость ветра менялась в пределах от 2 до 5 м/с, небольшая облачность.

На рис. 4 приведена запись ЛИВДГ за указанный промежуток времени. Длительность наибольшего ряда данных составила 62220 с при частоте дискретизации 1030 Гц, частотное разрешение 0,000016 Гц. При визуальной и спектральной обработке данной записи можно выделить несколько характерных моментов:

- на основной части записи присутствуют низкочастотные колебания с периодом около 17 мин 44 с, вызванные, вероятно, первой модой собственных колебаний бухты Витязь;

- на протяжении всей записи наблюдаются модулированные колебания, вызванные поверхностным морским волнением с периодом около 6,5 с (ветровые волны);
- присутствуют колебания, обусловленные антропогенными и эндогенными шумами в низкочастотном звуковом диапазоне.

Далее рассмотрим результаты, полученные на ЛИВДГ при работе низкочастотного гидроакустического излучателя на частоте 245 Гц. На компьютере была создана группа сигналов, состоящая из тонового сигнала, набора сложных фазоманипулированных сигналов, свип-сигнала. Она была организована в такой последовательности: тон 245 Гц (30 с), пауза (15 с), m\_245\_8\_10\_234, m\_245\_8\_10\_234, m\_245\_8\_10\_234, пауза (15 с), m\_245\_8\_10\_234, пауза (15 с), свип-сигнал 225-265 Гц (20 с), пауза (15 с), m\_245\_9\_6\_511, пауза (15 с), m\_245\_9\_6\_511, пауза (15 с), m\_245\_9\_6\_511. Здесь названия файлов с М-последовательностями: m – частота \_ разрядность \_ число периодов на символ \_ исходное состояние сдвигового регистра.

Данная группа математических сигналов с компьютера через усилитель подавалась на излучатель. Излучаемый сигнал контролировался гидрофоном и регистрировался ЛИВДГ. Гидрофон располагался на расстоянии 1 м от излучателя. В дальнейшем была выполнена обработка полученных записей ЛИВДГ. При обработке проводилась свёртка полученных записей с математическим сигналом и записанным сигналом гидрофона, помещённого на расстоянии 1 м от излучателя. Лучшие результаты получены при свёртке записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы с математическим сигналом. Ниже мы

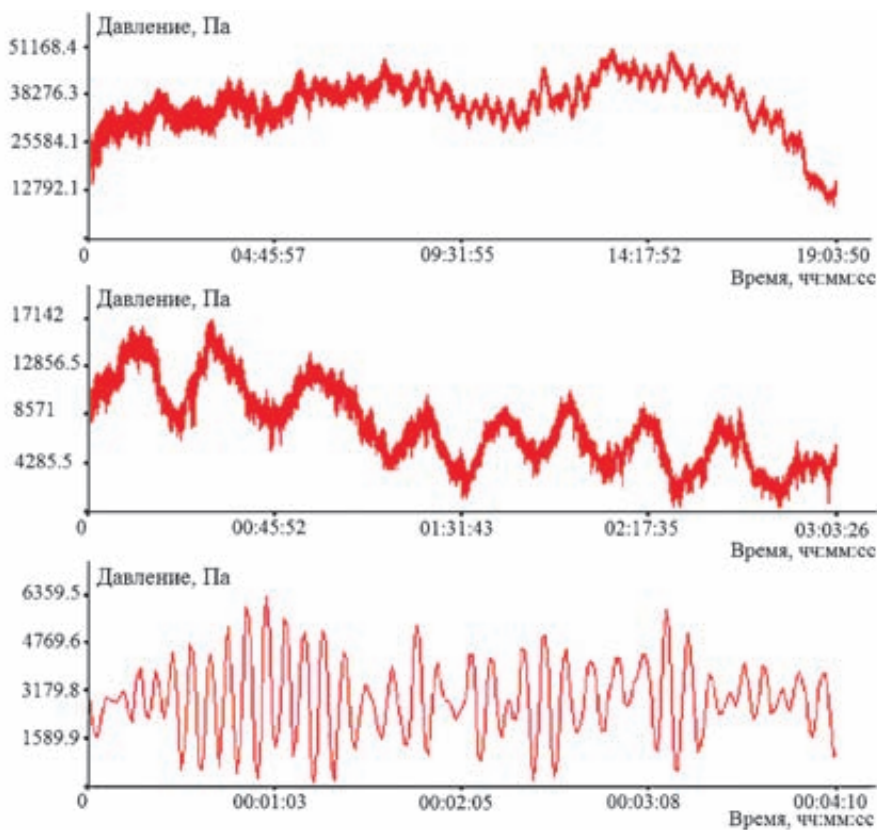


Рис. 4. Участки записи ЛИВДГ

рассмотрим только результаты свёртки с математическим сигналом. На рис. 5 приведены результаты свёртки. На верхней части рисунка приведены результаты свёртки полученных записей с первыми четырьмя М-последовательностями, в средней части – со свип-сигналом, в нижней части – с тремя последними М-последовательностями. Все приходы хорошо отождествлены и зарегистрированы.

В современной гидроакустике применяются сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности) для передачи информации и изучения гидрологических параметров на трассе распространения сигналов. Принятый приёмником сигнал свёртывается с математическим сигналом путем взаимно-корреляционной обработки. Математический сигнал «скользит» по всей записи приёмника. Если приёмник не искажает сигнал, то в месте присутствия данного сигнала на записи приёмника свёртка даёт пик большой амплитуды. На рис. 5 первый пик большой амплитуды ( $7,7 \cdot 10^6$ ) получен при свёртке математического сигнала первой М-последовательности (m\_245\_8\_10\_234) с принятым сигналом приёмника. Сигнал, излучённый гидроакустическим излучателем, может прийти к приёмнику по разным трассам. При этом на записи может быть несколько приходов сигнала. При каждом приходе в записи приёмника свёртка с математическим сигналом даст резкий пик. Если мы синхронизируем время работы излучателя и приёмника с большой точностью, то, зная расстояние от излучателя до приёмника, можно вычислить скорость распространения сигнала. Если в записи приёмника нет сигнала соответствующей М-последовательности, то

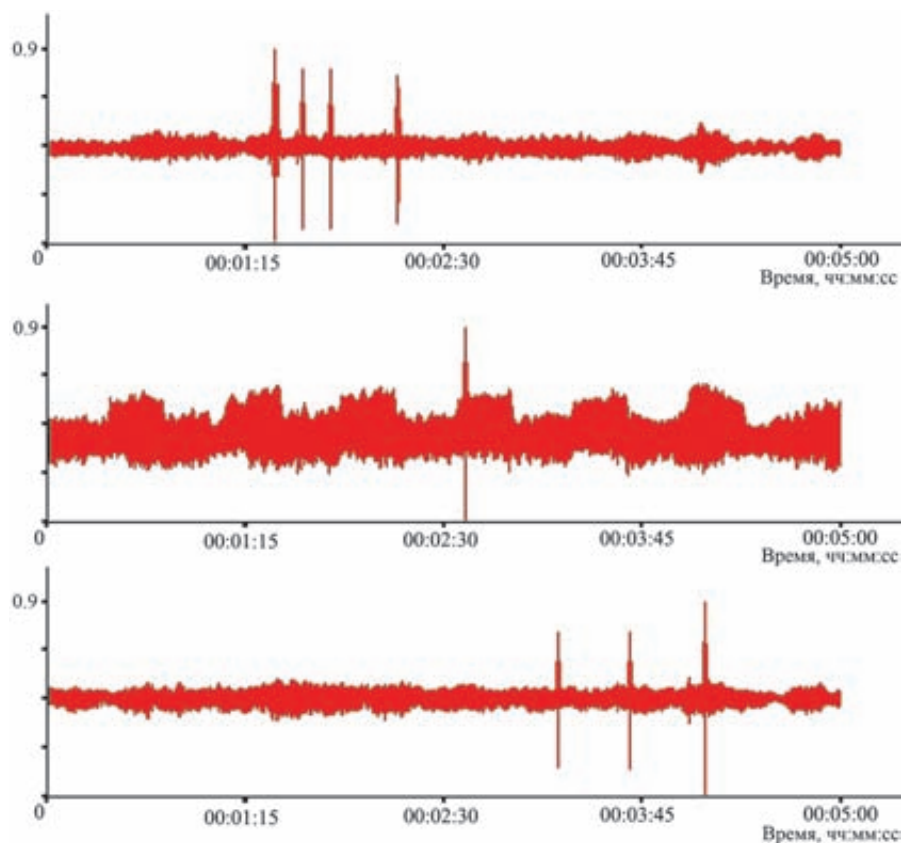


Рис. 5. Свёртка математического сигнала с принятым сигналом

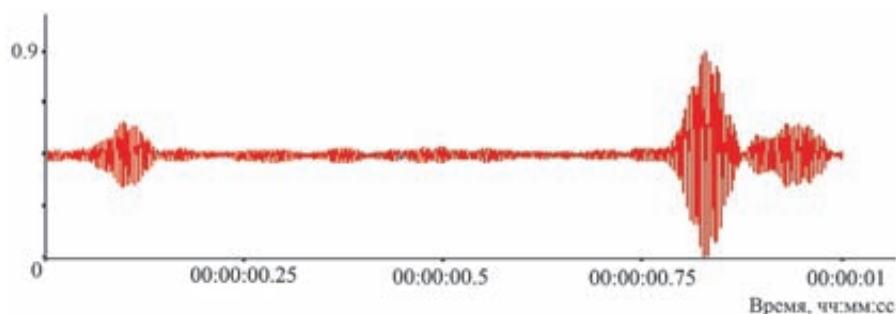


Рис. 6. «Растянутый» первый пик рис. 5

свёртка не даст таких резких пиков.

Далее проанализируем полученные данные. На рис. 6 приведён «растянутый» первый пик рис. 5. При анализе рис. 6 видно, что имеется четыре прихода сигналов, связанных с первой М-последовательностью. Главная амплитуда сигнала (второй пик), полученная при свёртке, соответствует прямому прохождению сигнала от излучателя к приёмнику по воде. Два следующих прихода вызваны отражёнными сигналами от границ

раздела. Первый приход неизвестен. Время между первым и вторым пиком равно 0,711 с, между вторым и третьим пиком – 0,059 с, между третьим и четвёртым пиком – 0,036 с. Считаем, что максимальная амплитуда соответствует прямому приходу сигнала. По среднестатистическим данным [9] в это время года скорость звука в воде равна примерно 1495 м/с. Расстояние в 1 милю (1852 м) основной сигнал преодолевает за 1,239 с. Первый сигнал данное расстояние преодолел

за 0,528 с. При этом скорость распространения сигнала равна примерно 3500 м/с. По нашему мнению, данный сигнал прошёл по дну. Временные задержки в 0,059 с и 0,036 с соответствуют расстояниям в 110 м и 54 м при скорости распространения 1495 м/с. Считаем, что эти сигналы обусловлены первичным и вторичным отражениями.

### ■ Лазерный гидрофон

Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы [10] способен проводить измерение микроколебаний гидросферного давления с точностью

57 мкПа в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц с глубиной погружения до 500 м. К недостаткам ЛИВГД можно отнести:

- большие размеры (диаметр контейнера 35 см, высота 100 см),
- небольшую автономность (потребляемая мощность около 40 Вт при переменном напряжении в 220 В),
- относительно большую стоимость (стоимость лазера около 9000 \$).

Для устранения названных недостатков в 2006 году в ТОИ ДВО РАН был создан лазерный гидрофон на основе применения лазерного диода

[11]. Общий вид лазерного гидрофона приведён на рис. 7. Его оптическая схема собрана по принципу равноплечего интерферометра Майкельсона. Чувствительным элементом лазерного гидрофона является круглая мембрана, закреплённая на краях. Более подробно конструкция и принцип работы ЛГ рассмотрены в [11].

Основные технические характеристики лазерного гидрофона: точность измерения вариаций давления при толщине мембраны 0,1 м – 15 мПа, рабочий диапазон частот – от 0 до 1000 Гц, динамический диапазон для измерения естественных процессов практически неограничен, рабочие глубины – до 1000 м, автономность – 15 суток.

### ■ Мобильный лазерный измеритель вариаций давления гидросферы

Опыт разработки ЛИВГД и ЛГ привел к созданию мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (МЛИВГД).

МЛИВГД, как ЛИВГД и ЛГ, конструктивно выполнен в виде цилиндрического корпуса из нержавеющей стали, в котором установлены интерферометр и система регистрации. Для компенсации внешнего давления прибор снабжен компенсационной камерой.

На рис. 8 приведена оптическая схема МЛИВГД. В ее основе лежит классический равноплечий интерферометр Майкельсона, что существенно упростило ее геометрию в сравнении с геометрией схемы, используемой ранее. Это позволило создать довольно компактный прибор при использовании в качестве источника излучения частотно стабилизированного лазера. Такой тип оптической схемы значительно

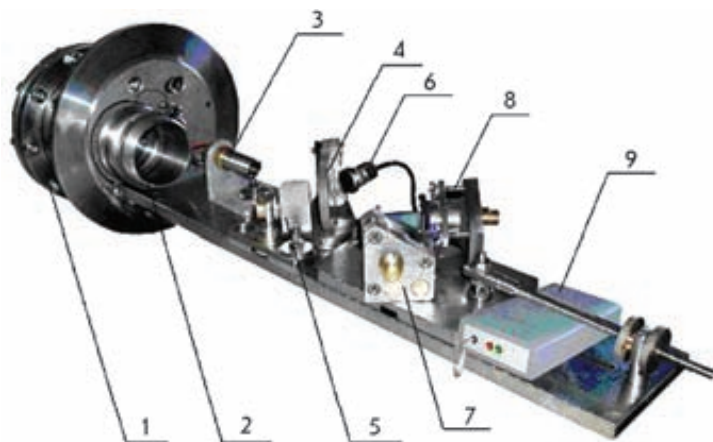


Рис. 7. Устройство лазерного гидрофона: 1 – компенсационная камера; 2 – система «глаз кошки», состоящая из собирающей линзы и мембраны с зеркальным напылением; 3 – полупроводниковый лазер на пьезокерамическом основании; 4 – полупрозрачная делительная пластина; 5 – юстировочное поворотное зеркало; 6 – фотодиод; 7 – зеркало «раскачки» на пьезокерамическом цилиндре; 8 – зеркало «подстройки» на пьезокерамическом цилиндре; 9 – цифровая система регистрации и первичной систематизации полученных данных

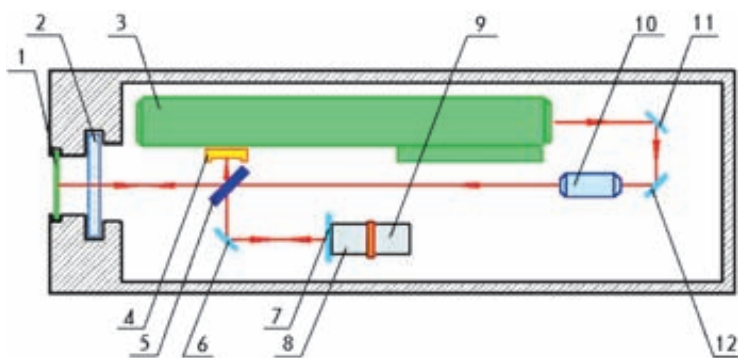


Рис. 8. Оптическая схема мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы: 1 – мембрана с зеркальным напылением; 2 – оптическое окно; 3 – лазер; 4 – фотоприемник; 5 – делительная пластина; 6 – дополнительное зеркало; 7 – зеркало раскачки и компенсации; 8 – пьезокерамика раскачки; 9 – пьезокерамика компенсации; 10 – коллиматор; 11 и 12 – дополнительные зеркала

упростила эксплуатацию прибора (настройку интерференции) и повысил его надежность (эта схема более устойчива и хорошо переносит ударные возмущения).

Применение частотно стабилизированного лазера в равноплечем классическом интерферометре Майкельсона позволило создать прибор с высокой точностью измерений. Гелий-неоновый лазер имеет долговременную стабильность частоты порядка  $10^{-9}$ . Интерферометр измеряет изменение разности хода в его плечах. При этом измеряемое смещение  $\Delta l$  связано со стабильностью частоты выражением  $\Delta l/l = |\Delta\nu/\nu|$ . Если уравнивать плечи интерферометра с точностью до  $10^{-4}$  м, то можно добиться измерения смещения центра мембраны с точностью  $10^{-13}$  м. Для уравнивания длин плеч интерферометра в приборе разработана и сконструирована оптико-механическая система регулирования этой разности. Система регулирования состоит из подвижной платформы, на которой расположено зеркало раскачки и компенсации (7), и пьезокерамики, осуществляющей колебания одного из дополнительных зеркал 11, 12. Уравнивание длин плеч выполняется в несколько этапов. На первом этапе выполняется уравнивание длин плеч интерферометра с точностью до половины цены деления измерительных линейных систем. На втором этапе на пьезокерамику, на которой закреплено одно из дополнительных зеркал, подается напряжение специальной формы. С помощью юстировочных винтов двигают платформу и добиваются на выходе системы регистрации минимума сигнала на частоте сигнала, подаваемого на пьезокерамику с дополнительным зеркалом. Таким методом можно уравнивать разность плеч интерферометра

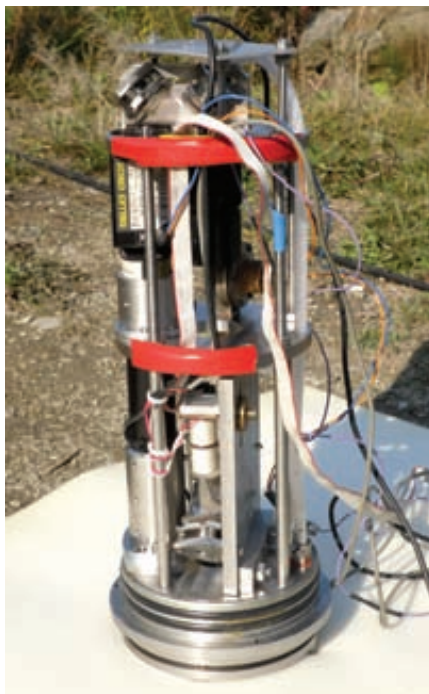


Рис. 9. Устройство МЛИВДГ

со значительно большей точностью, чем описано выше.

На рис. 9 показан внешний вид МЛИВДГ без корпуса.

### ■ Система регистрации МЛИВДГ

Система регистрации – это главная электронная часть МЛИВДГ. Она представляет собой систему экстремального регулирования со вспомогательной модуляцией и предназначена для работы с интерферометром гомодинного типа,

выполненным по схеме интерферометра Майкельсона. На рис. 10 приведена блок-схема прибора в целом, на примере которой кратко рассмотрим работу системы регистрации [12]. В точке интерференции, образованной оптической схемой прибора, устанавливается фотоприемник (Ф). Сигнал с фотоприемника подается на вход резонансного усилителя (РУ), настроенного на частоту опорного генератора (ОГ). Поэтому на выходе резонансного усилителя мы имеем сигнал с частотой, равной частоте модулирующего колебания, но сдвинутый по фазе относительно него. Для модуляции здесь используется сигнал с опорного генератора, который через усилитель раскачки (УР) подается на одно из пьезокерамических оснований (ПК) в системе зеркал оптической схемы. Далее сигнал с резонансного усилителя и сигнал опорный попадают на фазовый детектор (ФД), задачей которого является определение направления фазового сдвига между ними. В этом и заключается основная особенность цифровой системы. Здесь пространственное положение рабочей точки системы относительно максимума интерференционной картины определяется порядком прихода фронтов опорного напряжения и выходного напряжения резонансного

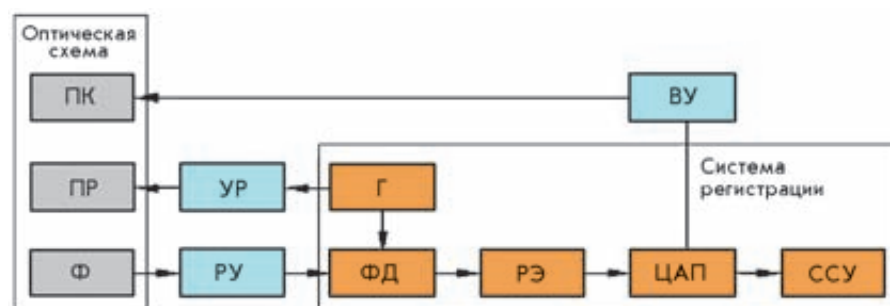


Рис. 10. Блок-схема мобильного лазерного измерителя вариаций давления гидросферы: ПК – пьезокерамика компенсации; ПР – пьезокерамика раскачки; Ф – фотодетектор; УР – усилитель раскачки; РУ – резонансный усилитель; Г – опорный генератор; ФД – фазовый детектор; РЭ – релейный элемент; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ВУ – высоковольтный усилитель; ССУ – система сброса уровней

усилителя. Неодновременный приход фронтов обусловлен паразитным фазовым сдвигом системы. Для случаев, когда этот сдвиг по каким-либо причинам отсутствует или мал, в системе регистрации предусмотрена возможность создания его программным путём.

Следующим элементом системы является релейный элемент (РЭ), задача которого в зависимости от направления сдвига фаз состоит в принятии решения об увеличении или уменьшении сигнала, подаваемого на ЦАП, который, в свою очередь, является интегратором. Выход ЦАП одновременно является выходом системы регистрации и источником управляющего напряжения, которое, усиливаясь на высоковольтном усилителе (ВУ), подается на компенсационную пьезокерамику (ПК), посредством чего осуществляется постоянное удерживание интерференционной картины на максимуме интенсивности. Помимо этого система регистрации снабжена системой сброса уровней (ССУ), с помощью которой достигается широкий динамический диапазон системы и прибора в целом.

**■ Полигонные испытания МЛИВДГ на шельфе Японского моря**

Летом 2010 года МЛИВДГ был установлен гайдропно на глубине 10 м при глубине моря порядка 30 м (рис. 11). В данном эксперименте ставилась цель оценить возможность МЛИВДГ для регистрации гидросферных колебаний и волн широкого диапазона частот, а также изучить природу возникновения гидросферных колебаний с периодом около 17 мин, которые возникают на шельфе Японского моря. Одновременно с работой данного МЛИВДГ в бухте Витязь работал ЛИВДГ,

установленный на глубине около 6,5 м.

При обработке синхронных экспериментальных данных было установлено, что гидросферные колебания с периодом около 17 мин существуют только внутри бухты Витязь.

На рис. 12 приведены записи сигналов МЛИВДГ, установленного на южном направ-

лении от м. Шульца, и ЛИВДГ, установленного в бухте Витязь. Соответственно на рис. 13 представлены спектры этих сигналов.

Ветровые морские волны регистрируются различными измерителями вариаций гидросферного давления. Эти приборы обладают разной чувствительностью, различными



Рис. 11. Схема эксперимента с расположением МЛИВДГ и ЛИВДГ

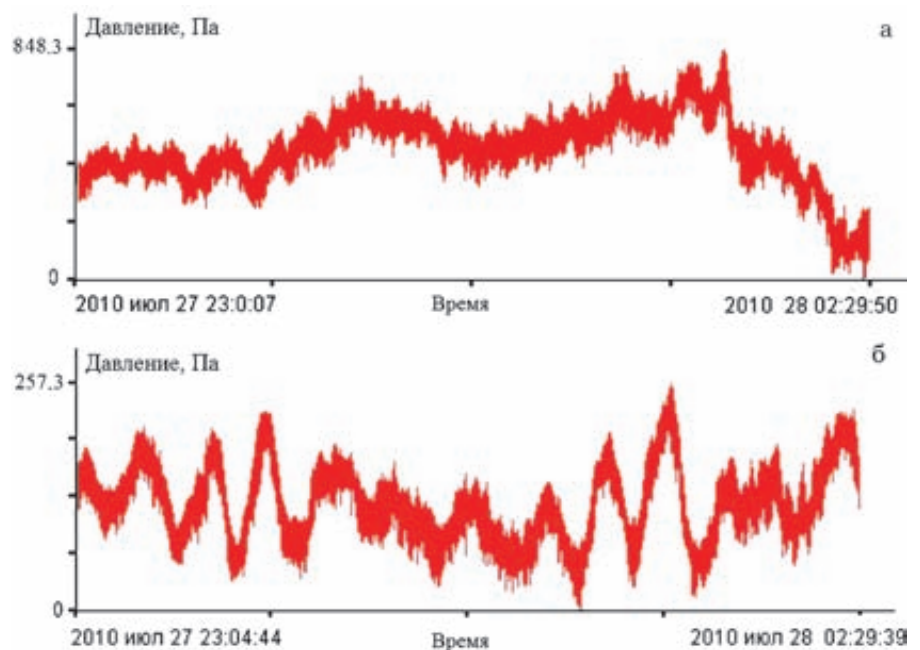


Рис. 12. Запись сигнала МЛИВДГ (а) и ЛИВДГ (б)



частотными и динамическими диапазонами. Наилучшими показателями по измерению вариаций гидросферного давления инфразвукового диапазона обладают различные лазерные системы, имеющие высокую чувствительность в широком частотном и динамическом диапазонах. Экспериментально были выполнены работы по синхронной регистрации вариаций гидросферного давления, вызванного морским волнением, с использованием МЛИВДГ и ЛИВДГ, установленных в точках, указанных на рис. 11.

На рис. 14 приведены записи сигналов МЛИВДГ и ЛИВДГ, на которых прослеживаются колебания, обусловленные морскими ветровыми волнами. На рис. 15 приведены их соответствующие спектры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе современных лазерно-интерференционных методов созданы лазерно-интерференционные системы, предназначенные для регистрации вариаций гидросферного давления в широком частотном и динамическом диапазонах. К данным системам в первую очередь относятся разработанные и созданные в ТОИ ДВО РАН лазерные измерители вариаций давления гидросферы двух видов и лазерный гидрофон.

Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы имеет рабочий диапазон частот от 0 до 1000 Гц, точность измерения вариаций давления гидросферы 0,45 мПа, динамический диапазон для измерения естественных процессов практически неограничен, рабочие глубины – до 1000 м.

Лазерный гидрофон обеспечивает измерения вариаций

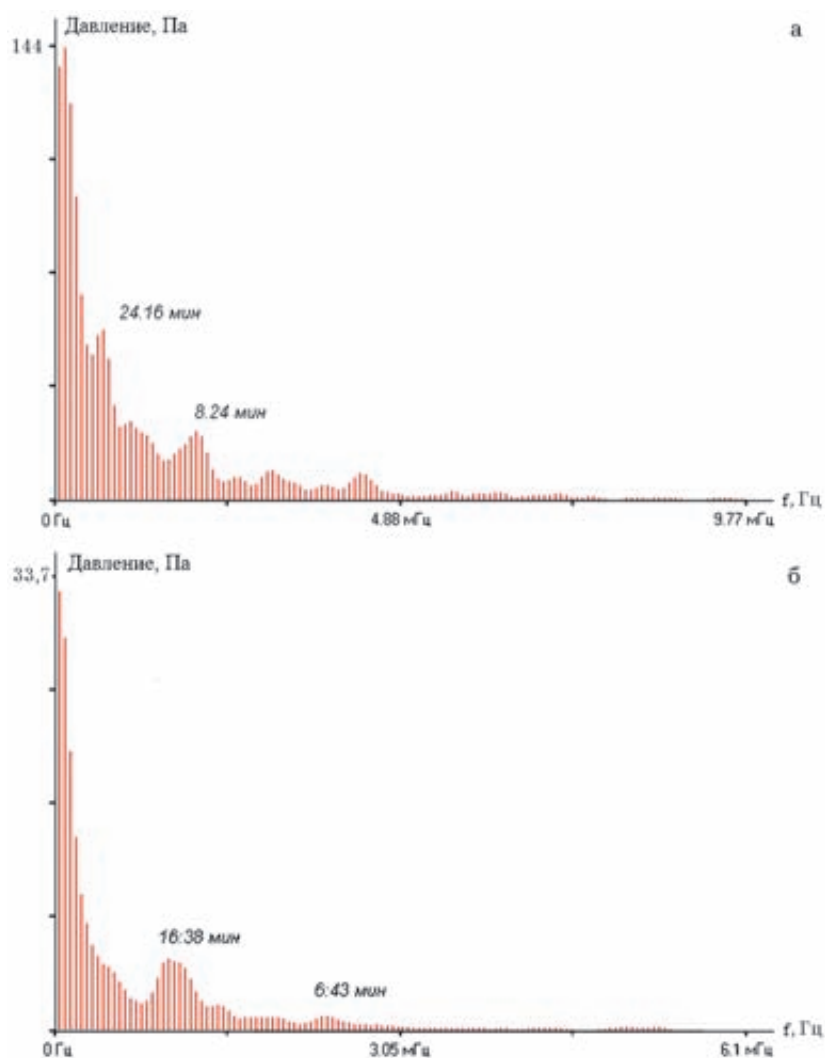


Рис. 13. Спектр записи МЛИВДГ (а) и ЛИВДГ (б)

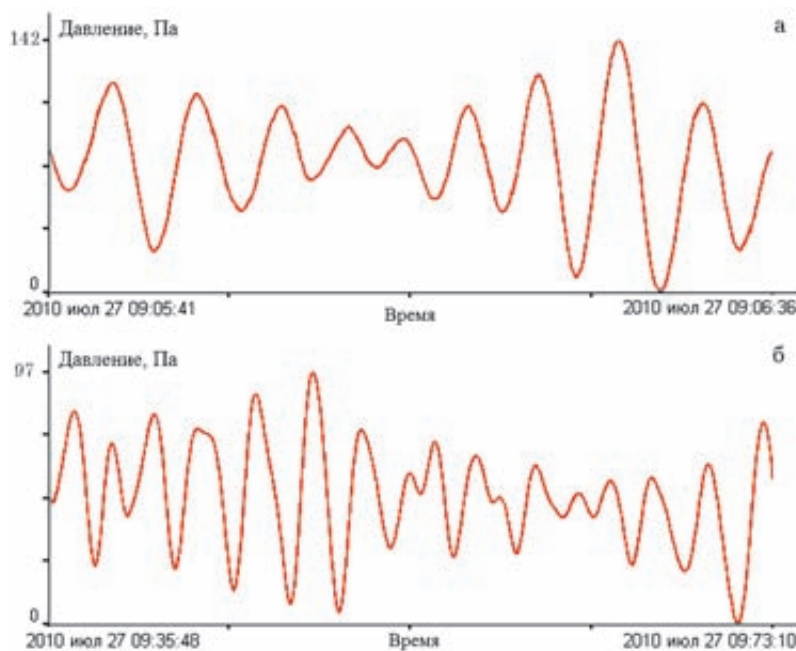


Рис. 14. Запись сигналов МЛИВДГ (а) и ЛИВДГ (б) при морском волнении

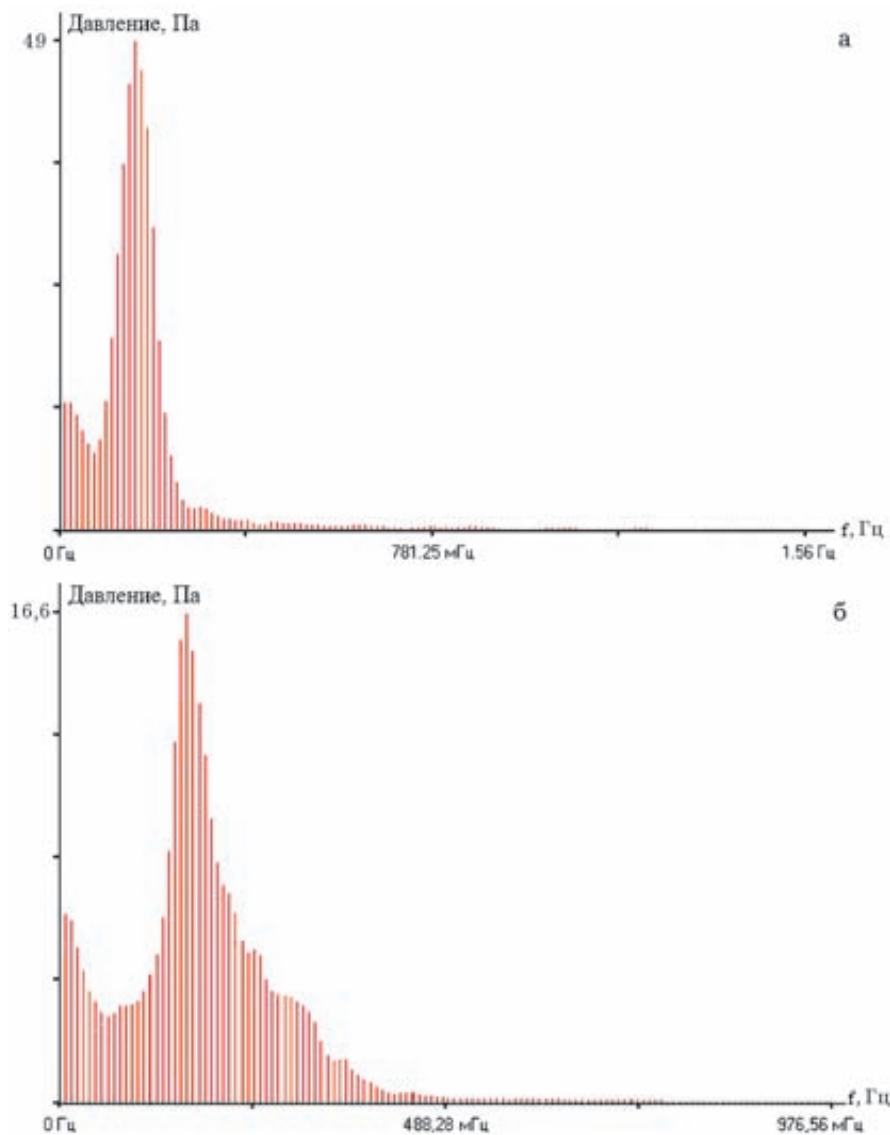


Рис. 15. Спектры записи сигналов МЛИВДГ (а) и ЛИВДГ (б) при морском волнении

давления при толщине мембраны 0,1 м с точностью 15 мПа в рабочем диапазоне частот от 0 до 1000 Гц и практически неограниченном динамическом диапазоне при регистрации естественных процессов. Его рабочие глубины до 1000 м, автономность 15 суток.

В мобильном лазерном измерителе вариаций давления гидросферы точность измерения вариаций давления гидросферы достигает величины 2,4 мкПа. Прибор имеет рабочий диапазон от 0 до 1000 Гц. Причём верхняя частота диапа-

зона может быть легко поднята до 2500 Гц. При этом рабочая частота системы регистрации равна 25 кГц (частота раскачки одной из пьезокерамик). При увеличении частоты раскачки в 2–3 раза верхнюю рабочую частоту частотного диапазона можно также увеличить в 2–3 раза. При этом частотный диапазон прибора расширяется от 0 до 5000–7500 Гц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 09-05-00597-а, 09-05-01089-а) и ДВО РАН (гранты 09-И-П16-13, 09-И-П17-06, 09-III-A-07-339).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Шве́ц В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении бародеформационного взаимодействия // *Физика Земли*. 2004. №8. С. 82–90.
2. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Шве́ц В.А., Шевцов Б.М., Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений // *ДАН*. 2007. Т.413, №1. С.96–100.
3. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // *Физика Земли*. 1998. №11. С. 76–81.
4. Долгих Г.И. Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным гидроакустическим излучателем // *Акустический журнал*. 1998. Т.44, №3. С. 358–361.
5. 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 ориентации в геофизических исследованиях переходных зон // *Физика Земли*. 2002. №8. С. 69–73.
6. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Шве́ц В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // *Приборы и техника эксперимента*. 2005. № 6. С. 137–138.
7. Долгих Г.И. Лазерно-интерференционный комплекс // *Сейсмические приборы*. 2003. Вып. 39. С. 13–27.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
9. Ростов И.Д., Юрасов Г.И., Рудых Н.И., Мороз В.В., Дмитриева Е.В., Набиуллин А.А., Храпченков Ф.Ф., Ростов В.И., Бунин В.М. Атлас по океанографии Берингова, Охотского и Японского морей [Электронный ресурс]. CD-ROM. Т. 2 (первая версия) серии информационных продуктов ТОИ ДВО РАН: «Информационные ресурсы ТОИ. Океанография». Copyright © 2001 by V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute.
10. Takemoto S., Araya A., Akamatsu J., Morii W., Momose H., Ohashi M., Kawasaki I., Higashi T., Fukudo Y., Miyoki S., Uchiyama T., Tatsumi D., Hanada H., Naito I., Telada S., Ichikawa N., Onoue K., Wada Y. A 100 m laser strainmeter system installed in a 1 km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan // *Journal of Geodynamics*. 2004. Vol. 38. P. 477–488.
11. Долгих Г.И., Плотников А.А., Шве́ц В.А. Лазерный гидрофон // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. №1. С. 159–160.
12. Долгих Г.И., Ковалёв С.Н., Шве́ц В.А., Яковенко С.В. Цифровая система регистрации лазерно-интерференционных установок // *Приборы и техника эксперимента*. 2008. №5. С. 158–159.