

УДК 551.5; 550.3

## ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ С МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2017 г. С. Г. Долгих<sup>1,2</sup>, С. С. Будрин<sup>1,2</sup>, А. А. Плотников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия  
e-mail:sdolgikh@poi.dvo.ru

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Поступило в редакцию 02.04.2015 г.

После доработки 24.11.2015 г.

На основе применения современных лазерно-интерференционных методов создан лазерный измеритель вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации внешнего температурного воздействия, предназначенный для регистрации вариаций давления гидросферы в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 50 мкПа.

DOI: 10.7868/S0030157417040153

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для изучения природы возникновения и развития волновых процессов в океанах и морях применяют различные средства измерений, самыми распространенными среди которых являются волнографы и уровнемеры [2], датчики давления и гидрофоны [1]. Наряду с контактными методами применяются и бесконтактные методы измерений, к которым можно отнести радиолокационное и лазерное зондирование [11], а также видео- и фотонаблюдение за взволнованной поверхностью. Несмотря на это, практически все используемые на данный момент средства и методы имеют ряд недостатков, главными из которых являются: ограниченный частотный и динамический диапазоны, низкая чувствительность и невысокая точность измерений в инфразвуковом диапазоне.

Измерением термодинамических параметров Мирового океана с помощью лазерно-интерференционных методов занимались ученые более 30 лет [12], но до сих пор не получено надежного аппаратного решения. Для преодоления главных недостатков измерителей морских волновых процессов, т.е. улучшения их чувствительности, увеличения рабочего и динамического диапазонов в ТОИ ДВО РАН на основе современных лазерно-интерференционных методов был создан ряд гидрофизических приборов [9], к которым в первую очередь относятся лазерные измерители вариаций давления гидросферы [6] и лазерные гидрофоны [5]. Данные приборы позволяют регистрировать вариации гидростатического давления с точностью до нескольких десятков милিপаскаль в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц. К сожалению, эти приборы также имеют

ряд недостатков: 1) зависимость от температуры окружающей среды, 2) большие габариты и вес. С целью исключения этих недостатков была поставлена задача по созданию лазерного измерителя вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации температурного воздействия, обладающего меньшими габаритами и весом за счет применения полупроводникового частотно-стабилизированного лазера. Данный прибор был создан и прошёл предварительные испытания на морской экспедиционной станции (МЭС) ТОИ ДВО РАН “м. Шульца” в водной среде при регистрации ветрового волнения и собственных колебаний б. Витязь.

### УСТРОЙСТВО И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ

Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации температурного воздействия собран по оптической схеме модифицированного интерферометра Майкельсона, в качестве источника света в котором применяется частотно-стабилизированный полупроводниковый зеленый лазер LCM-S-111 [7]. Данный лазер имеет следующие характеристики: длина волны излучения – 532 нм, выходная мощность – 11 мВт, диаметр луча на выходе – 1.1 мм, долговременная стабильность – < 2% за 8 ч. Чувствительным элементом прибора является круглая мембрана из нержавеющей стали диаметром 0.1 м и толщиной менее 0.0008 м с зеркальным напылением в ее центре. На внешнюю сторону мембраны, соприкасающуюся с водой, воздействует давление гидросферы, изменения которого регистрирует прибор. Величину изменения давления можно

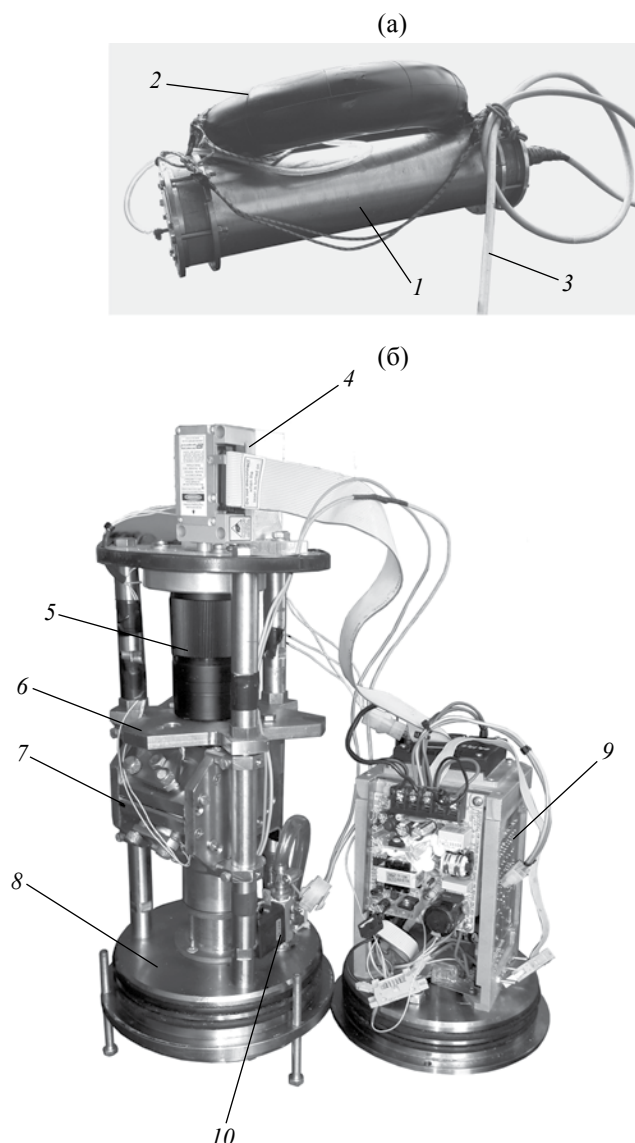


Рис. 1. Внешний (а) и внутренний (б) вид лазерного измерителя вариаций давления гидросферы.

рассчитать по формуле смещения центра круглой мембраны, закрепленной на краях [10]:

$$P = \frac{16 \cdot \Delta \ell \cdot E \cdot h^3}{3 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot (R^2 - \rho^2)^2},$$

где  $P$  – перепад давления на мембране,  $R$  – радиус мембраны,  $E$  – модуль упругости материала мембраны,  $h$  – толщина мембраны,  $\Delta \ell$  – прогиб мембраны под действием перепада давления,  $\rho$  – расстояние от центра мембраны,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона. Примем следующие постоянные:  $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ,  $\sigma = 0.25$ ,  $R = 5 \text{ см}$ . Все расчеты будем делать для центра мембраны, где величина смещения максимальна, т.е.  $\rho = 0$ . С учётом

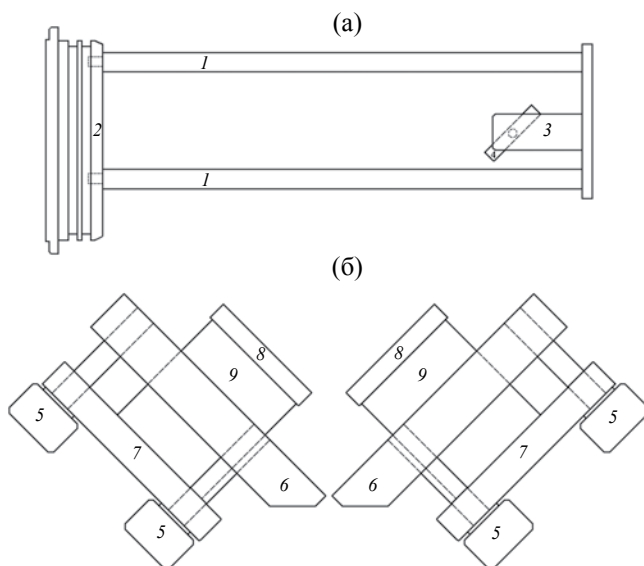
вышеприведённых оценок получаем: 1) при  $h = 1 \text{ мм}$ ,  $P = 57 \text{ мПа}$ ; 2) при  $h = 0.1 \text{ мм}$ ,  $P = 57 \text{ мкПа}$ .

Внешний вид лазерного измерителя вариаций давления гидросферы представлен на рис. 1а. Интерференционный узел и цифровая система регистрации прибора заключены в цилиндрический корпус из нержавеющей стали (1). На корпусе располагается эластичная емкость с воздухом (2), с помощью которой компенсируется внешнее давление в компенсационной камере. Передача данных с системы регистрации осуществляется по кабельной линии (3). Интерференционный узел и система регистрации прибора представлены на рис. 1б. Оптическая схема прибора аналогична схеме лазерных измерителей вариаций давления гидросферы, изготовленных ранее [5, 6]. В приборе луч частотно-стабилизированного полупроводникового лазера (4) попадает в коллиматор (5), который увеличивает диаметр луча лазера до 10 мм. Затем луч лазера попадает на плоскопараллельную пластину (6), где делится на две части, эталонную и измерительную. Эталонный луч проходит через юстировочный узел (7), состоящий из двух зеркал, закрепленных на пьезокерамических цилиндрах раскочки и компенсации, и возвращается обратно на пластину. Измерительная часть луча попадает в систему «кошкин глаз», расположенную в крышке прибора (8), состоящую из линзы и мембраны с зеркальным напылением, и возвращается обратно на пластину. На пластине оба луча сбиваются в точку, образуя интерференционную картину. Изменение интерференционной картины фиксируется системой регистрации (9) и по кабельной линии передается на аналогово цифровой преобразователь (АЦП).

При погружении прибора проводится предварительная настройка мембраны в нейтральное положение посредством компенсационной камеры. Для этого при погружении прибора открывается клапан (10), и воздух из внешней камеры (2) начинает поступать в компенсационную камеру, тем самым давление в камере выравнивается с внешним давлением. При достижении измерителем рабочей глубины клапан закрывается и прибор готов к работе.

Механическая система компенсации температурного воздействия (рис. 2) необходима для стабилизации интерференционной картины. Для этого направляющие стержни (1), изготовленные из инвара, коэффициент температурного расширения которого более чем в десять раз меньше, чем у нержавеющей стали, жестко закреплены на крышке (2). При изменении температуры внутри прибора изменяется длина стержней, а система крепления (3) плоскопараллельной пластины (4), изготовленная из нержавеющей стали и закрепленная на конце стержней, построена так, что, расширяясь в обратную сторону, компенсирует изменение длины

стержней. В связи с этим длина измерительного плеча не зависит от вариаций температуры. Сложная система юстировочного узла, изготовленная из материалов с различными коэффициентами температурного расширения, рассчитана так, что длина эталонного плеча не меняется из-за вариаций температуры. При вариациях температуры изменяются размеры зеркал на пьезокерамических цилиндрах и все части крепежа юстировочного узла. Так как луч попадает под углом  $45^\circ$  к плоскости зеркал, а сами зеркала расположены под углом  $90^\circ$  друг к другу, то на длину эталонного плеча влияет только изменение размера вдоль оси пьезокерамических цилиндров (9). Коэффициенты температурного расширения зеркал (8) и пьезокерамических цилиндров (9) почти в три раза меньше, чем у нержавеющей стали, из которой изготовлены части крепления зеркал. Изменения толщины зеркала, длины пьезокерамических цилиндров и толщины основания крепления цилиндров (7) компенсируются изменением толщины крепежной пластины (6) и юстировочных болтов (5). В следствие этого длина эталонного плеча не зависит от вариаций температуры. Применение механической системы компенсации температурного воздействия позволило продлить работу лазерного измерителя вариаций давления гидросферы без подстройки интерференции.

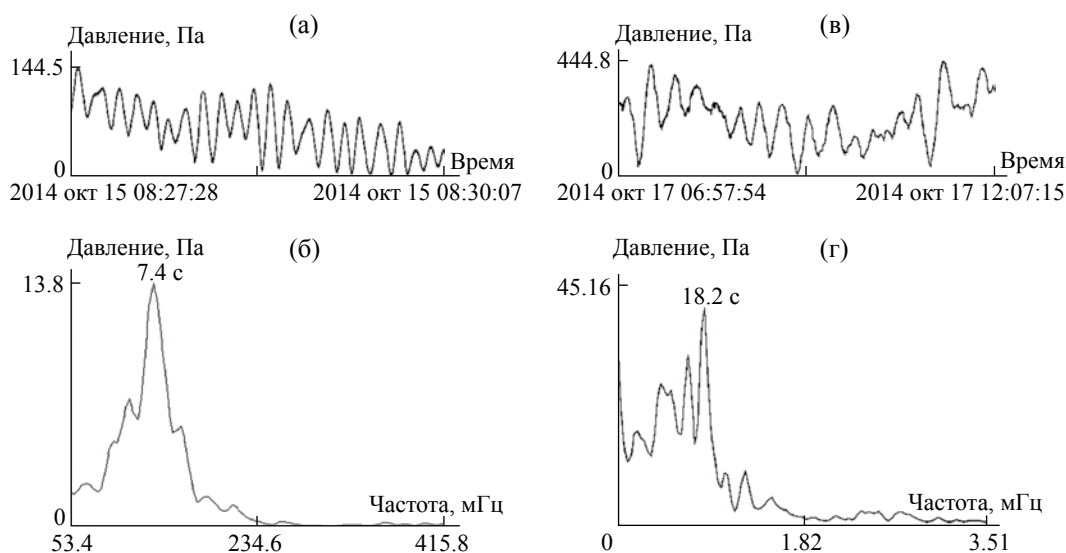


**Рис. 2.** Система механической компенсации внешнего температурного воздействия. Оптическая часть лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (а), юстировочный узел (б).

### ИСПЫТАНИЯ УСТАНОВКИ

Испытания лазерного измерителя вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации температурного воздействия проводились осенью 2014 г. на МЭС ТОИ ДВО РАН “м. Шульца”

в б. Витязь залива Петра Великого Японского моря. Прибор был установлен на глубине 5 м на удалении 100 м от берега. Данные поступали по кабельным линиям на АЦП и после предварительной обработки записывались на компьютер в виде файлов длительностью один час с частотой дискретизации 2000 Гц. В период работы прибора с середины сентября по конец октября температура воды изменилась почти на  $10^\circ\text{C}$ , но на работоспособность установки такое изменение температуры не повлияло.



**Рис. 3.** Регистрация ветрового волнения и собственных колебаний б. Витязь. Фрагменты записи – верхние, спектры – нижние.

При обработке экспериментальных данных, полученных с помощью лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, были исследованы фоновые колебания гидросферного давления и закономерности его изменения в зависимости от естественных процессов. На рис. 3а представлен фрагмент записи, на которой видны колебания с периодом 7.4 с, соответствующие ветровому волнению. Как известно [4], ветровые волны с подобными периодами генерируются в открытой части Японского моря и регистрируются в бухте.

При обработке длительных записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации температурного воздействия были выделены колебания с периодом 18.2 мин. На рис. 3б приведен фрагмент записи прибора длительностью более 5 ч, который получен путем сшивания часовых файлов с последующей их фильтрацией низкочастотным фильтром Хемминга. Данные колебания присутствуют на записи в явном виде, а на спектре (рис. 3г) можно выделить пик с периодом 18.2 мин. Колебания с похожими периодами фиксировались ранее лазерными измерителями вариаций гидросферного давления и соответствуют собственным колебаниям б. Витязь [3, 8].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе современных лазерно-интерференционных методов создан лазерный измеритель вариаций давления гидросферы с механической системой компенсации внешнего температурного воздействия, позволяющий регистрировать вариации гидросферного давления с точностью 57 мкПа в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц. Применение системы компенсации позволило продлить время работы прибора без его подстройки, а применение в качестве источника света частотно-стабилизированного полупроводникового лазера позволило сильно сократить габариты и вес прибора.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (соглашение № 14-50-00034, создание установки) и программы “Дальний Восток”.

## Laser Measuring Instrument of Variations of Pressure of Hydrosphere With the Mechanical System of Compensation of Temperature Influence

S.G. Dolgikh, S.S. Budrin, A.A. Plotnikov

On the basis of application of modern laser and interferential methods the laser measuring instrument of variations of pressure of the hydrosphere with mechanical system of compensation of external temperature influence intended for registration of variations of pressure of the hydrosphere in the frequency range from 0 (conditionally) to 1000 Hz with an accuracy of 50  $\mu$ Pa is created.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарнакерьян А.А., Сосунов А.С.* Радиолокация морской поверхности. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1978. 144 с.
2. *Грязин Д.Г., Бердюгин А.В.* Волномерные буи в ряду современной волномерной аппаратуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 31. С. 233–240.
3. *Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г. и др.* Нагружающее воздействие вариаций уровня моря на земную кору // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 5. С. 586–588.
4. *Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Ярошук Е.И.* Исследование изменчивости периода ветровых волн // Метеорология и гидрология. 2014. № 1. С. 72–79.
5. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н. и др.* Лазерный гидрофон в гидроакустических и океанологических исследованиях // Ежегодник РАО. Акустика неоднородных сред: сборник научных статей. М.: Изд-во Тривант, 2008. Вып. 9. С. 174–182.
6. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н. и др.* Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 137–138.
7. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Плотников А.А. и др.* Лазерный гидрофон на основе зеленого лазера LCM-S-111 // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 140–142.
8. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В. и др.* Инфразвуковые колебания Японского моря // Докл. РАН. 2011. Т. 441. № 1. С. 98–102.
9. *Долгих Г.И., Привалов В.Е.* Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Дальнаука, 2009. 202 с.
10. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
11. *Frank J. Berto.* Automatic gauging technologies have advanced, but batteraccuracy is needed // Oil & Gas Journal. 1997. Mar. 10. P. 63–68.
12. *Seaver G.A., Vlasov V.L., Kostianoy A.G.* laboratory calibration in distilled water and seawater of an oceanographic multichannel interferometer-refractometer // Journal of atmospheric and oceanic technology. 1997. V. 14. № 2. P. 267–277.