ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

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

ВВЕДЕНИЕ

Создание сверхчувствительных установок, способных проводить измерения на уровне фоновых колебаний в широком частотном и динамическом диапазонах, остро необходимо при выполнении экспериментальных исследований в различных областях науки и техники. С такой аппаратурой связывается дальнейшее развитие научно-технического прогресса. Ее создание должно опираться на передовые, прорывные универсальные методы. В настоящее время в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют лазерно-интерференционные методы. На их основе созданы лазерные деформографы различных вариантов [1–3], аналогов которым по чувствительности, частотному и динамическому диапазонам в мире нет. С данными установками связаны основные надежды при изучении физических процессов Земли и внешнего пространства.

Кроме того, на основе лазерно-интерференционных методов созданы сверхчувствительные установки для измерения вариаций давления атмосферы – лазерные нанобарографы [4]. Один из лазерных нанобарографов вместе с лазерными деформографами вертикального и горизонтального типов входит в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса (рис. 1) [5].

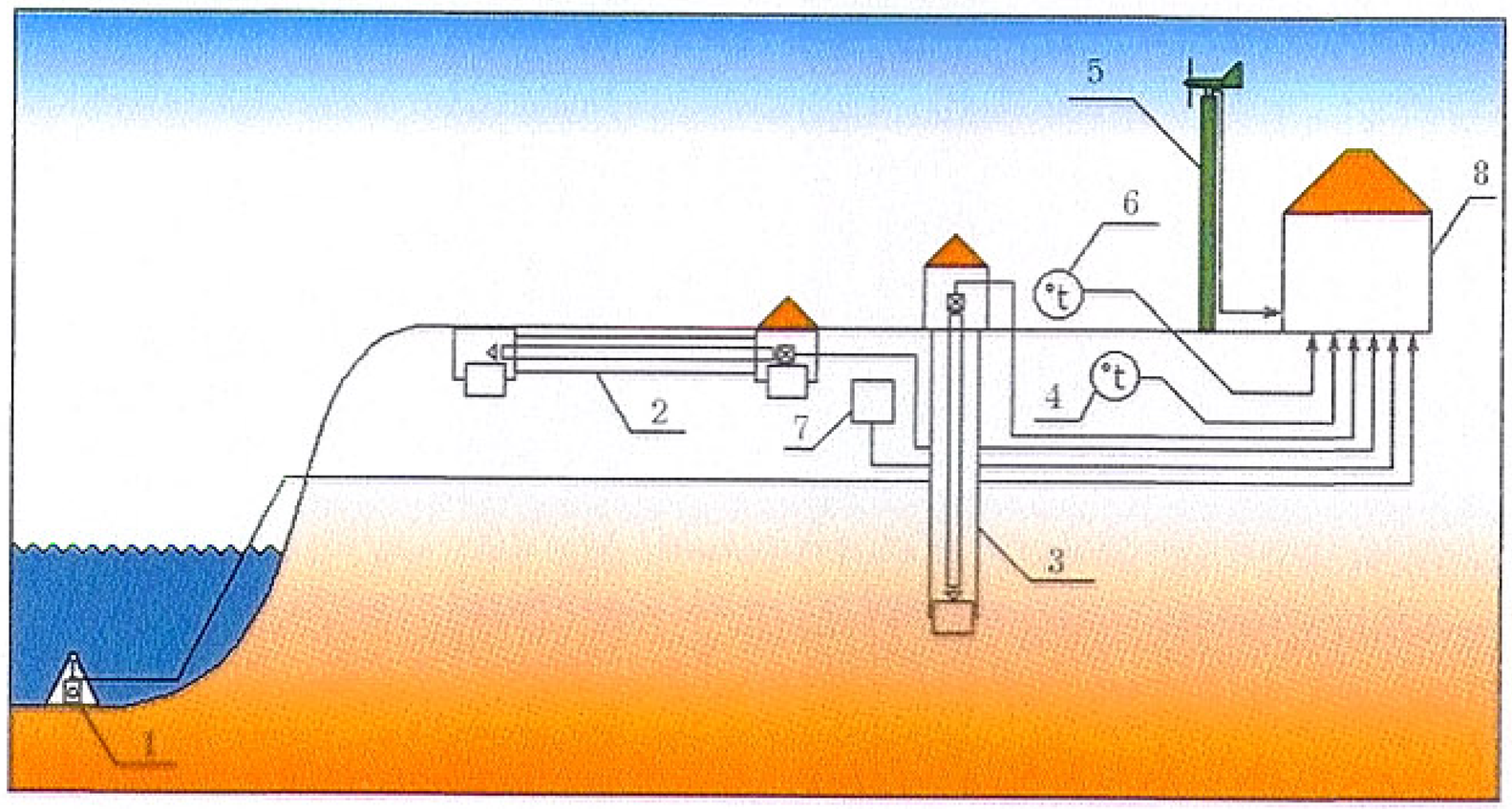

Рис. 1. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс. 1 – донная станция, гидрофон и термограф; 2 – 52,5-метровый горизонтальный лазерный деформограф; 3 – 3,5-метровый вертикальный лазерный деформограф; 4, 6 – почвенный и воздушный термографы; 5 – анеморумбограф; 7 – лазерный нанобарограф; 8 – лабораторное помещение

Он установлен на побережье Японского моря и предназначен для изучения закономерностей генерации, динамики и трансформации колебаний и волн в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц в зоне перехода геосфер. Дополнительно комплекс оснащён низкочастотными гидроакустическими излучателями (35 и 240 Гц), приёмными гидроакустическими и гидрофизическими системами, метеостанцией, GPS миллиметровой точности. В 2005 г. на основе лазерно-интерференционных методов был создан и прошёл испытания лазерно-интерференционный сверхнизкочастотный измеритель вариаций давления гидросферы, предназначенный для изучения вариаций давления гидросферы в составе сейсмоакустико-гидрофизического комплекса. Данная лазерно-интерференционная установка создана для преодоления одного общего недостатка приёмных гидроакустических систем – ограничение «снизу» по частотному диапазону. Учитывая преимущества уже созданных на этой основе новых измерительных систем (лазерных деформографов и лазерных нанобарографов), можно было предвидеть успех предстоящего мероприятия.

В статье описываются принцип действия и технические характеристики лазерного из-

мерителя вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ), разработанного в ТОИ ДВО РАН, и предназначенного для измерения вариаций давления гидросферы до глубин 500 м в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц на уровне фоновых колебаний. Приведены некоторые результаты, полученные на данной установке при регистрации морских колебаний и волн естественного и искусственного происхождения.

Устройство установки и её технические характеристики

На рис. 2 приведён внутренний вид установки без системы регистрации. Данная установка предназначена для измерения вариаций гидросферного давления на глубинах до 500 м. Чувствительным элементом установки является мембрана с зеркальным напылением. Вариации давления, которое регистрирует лазерно-интерференционный измеритель вариаций давления гидросферы, можно рассчитать по формуле для круговой мембраны; закреплённой на краях [6]:

$$\Delta P = \frac{16 \cdot \Delta l \cdot h^3 \cdot E}{3 \cdot (1 - \sigma^2) \cdot R^4}, \quad (1)$$

где: Δl – смещение мембраны, h – толщина мембраны, E – модуль Юнга, σ – коэффициент Пуассона, R – диаметр мембраны.

В установке используется набор мембран разной толщины, изготовленных из нержавеющей стали. При R =5 см, h = 0,5 мм, E = $2{,}1 \cdot 10^{11}$ Н/м^2, $\sigma = 0{,}25$ имеем

$$\Delta P = 2{,}4 \cdot 10^7 \cdot \Delta l \text{ Па}.$$

В лазерном измерителе вариаций давления гидросферы применяется частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер ЛГН-303 с долговременной стабильностью $\Delta l / L = 10^{-8}$, где Δl – точность измерения микроперемещения мембраны, L – оптическая разность хода в плечах интерферометра. В нашем случае L=0,1 м и $\Delta l = 10^{-9}$ м. Применяемые методы интерферометрии позволяют измерять смещение мембраны с точностью на порядок выше, что может быть достигнуто при использовании в установке лазеров с лучшей стабильностью частоты. При использовании же в лазерном измерителе вариаций давления гидросферы частотно-стабилизированного лазера ЛГН-303 мы можем измерять вариации гидросферного давления с точностью $2{,}4 \cdot 10^{-2}$ Па в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц.

В ЛИВДГ предусмотрена система сброса уровней. Величина сброса привязана к частоте применяемого гелий-неонового лазера и равна 0,315 мкм. При достижении напряжения на рабочей пьезокерамике, соответствующего величине сброса уровней, оно сбрасывается в ноль, при этом система с одного интерференционного максимума перескакивает на соседний. Применение системы сброса уровней позволяет значительно расширить динамический диапазон установки. Для измерения вариаций давления гидросферы в инфразвуковом диапазоне он практически неограничен.

Все приборы сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, работающие на основе лазерно-интерференционного метода, оснащены специальными системами регистрации, обрабатывающими поток информации, идущий с каждого прибора. Эти системы работают по одной и той же принципиальной схеме, хотя элементная база и исполнение имеют некоторые отличия. Система регистрации лазерного измерителя вариаций давления гидросферы отличается еще и тем, что часть аналоговых узлов в ней удалена и их функции выполняются цифровыми микроконтроллерами. Однако принципы работы этой системы те же.

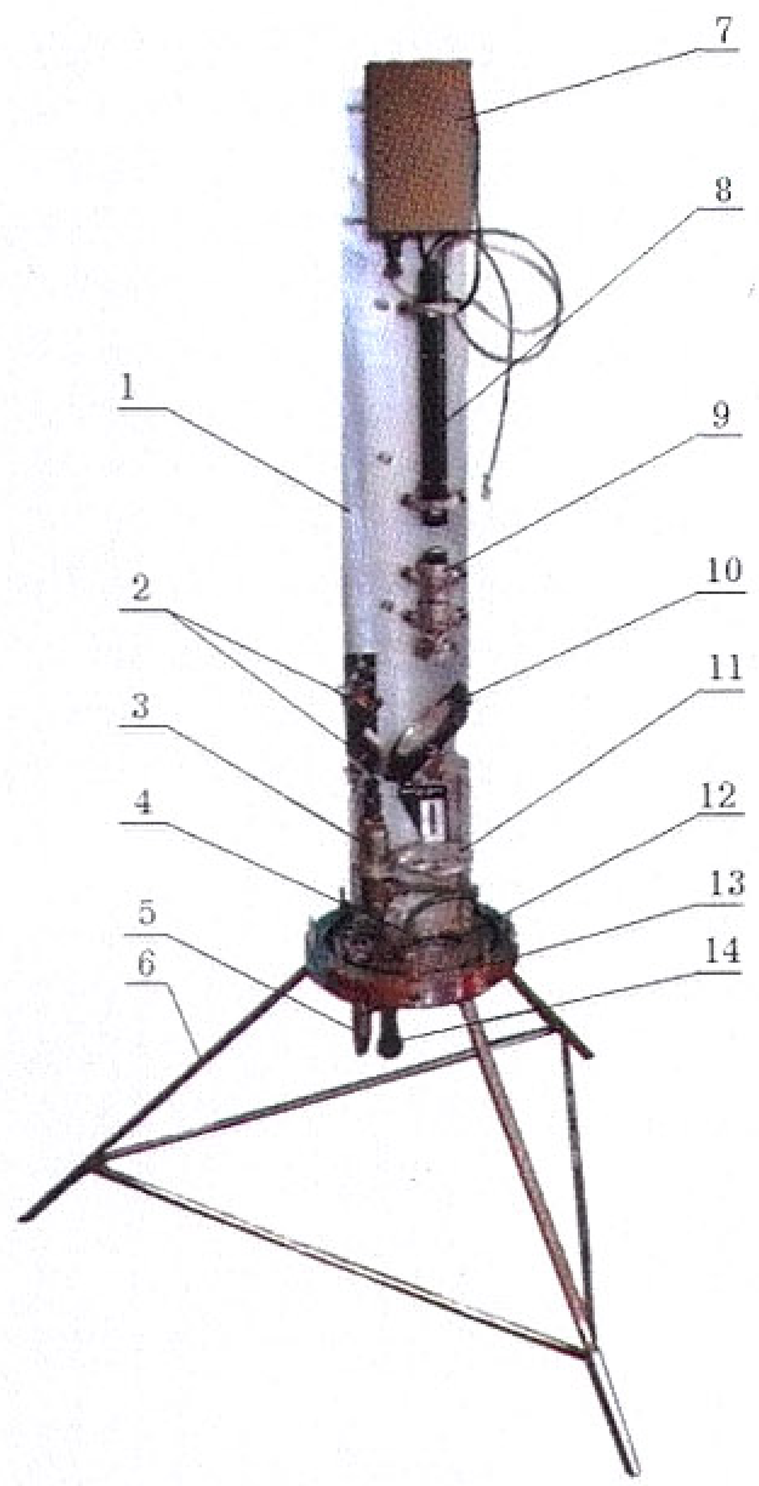

Рис. 2. Внутреннее расположение элементов лазерно-интерференционного сверхнизкочастотного измерителя вариаций давления гидросферы. 1 – оптическая скамья; 2 – подвижные юстировочные зеркала интерферометра; 3 – клапан системы компенсации наружного давления; 4 – воздушные шланги; 5 – гермоввод; 6 – опорное устройство; 7 – блок питания лазера ЛГН-303, 8 – лазер ЛГН-303; 9 – коллиматор; 10 – делительная пластина; 11 – линза; 12 – измерительная мембрана с отражающим покрытием; 13 – крепежные болты для установки герметичного корпуса; 14 – контрольный гидрофон

Система регистрации предназначена для получения электрического сигнала, пропорционального изменению разности хода лучей: опорного и измерительного.

Кроме того, система регистрации обеспечивает автоматическую подстройку интерферометра и выдает сигнал, пропорциональный разности длин плеч интерферометра в долях $\lambda/2$. Пределы сигнала: $\Delta l = \pm\lambda/2$ при равенстве $\Delta l = \Delta L - k\lambda/2$, где k – целое, равное целой части $2\Delta l/\lambda$. Изменение ΔL равно

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2}\left[(k_+ - k_-) + \frac{U_2 - U_1}{U_{\lambda/2}}\right], \quad (2)$$

где: k_+ и k_- – число сбросов положительной и отрицательной полярности, возникающих при изменении ΔL на величину $\pm\lambda/2$; $U_{\lambda/2}$ – нормирующий множитель, В; U_1, U_2 – значения выходного напряжения в начальный и конечный моменты времени.

Конструктивно система регистрации является экстремальным регулятором с пробным сигналом, удерживающим интерференционную картину на максимуме или минимуме (в зависимости от фазовых соотношений). Работает она по следующему алгоритму. Генератор опорной частоты вырабатывает пробные колебания, которые вводятся в систему. Это приводит к модуляции интенсивности интерференционной картины (настраиваемой на минимум/максимум интенсивности интерференционной картины), падающей на фотодиод. Необходимо, чтобы частота пробных колебаний превышала максимальную рабочую частоту в несколько (5–10) раз. Однако выбор слишком большой частоты пробного сигнала ведет к конструктивным трудностям при выполнении некоторых блоков системы регистрации. В частности, проблематично изготовить высоковольтный блок, управляющий пьезокерамиками, имеющий достаточное быстродействие на высоких частотах. Это связано с тем, что приходится работать с высокими напряжениями, а переходные процессы при работе с такими напряжениями слишком велики. Кроме того, необходимо выбирать частоту пробного сигнала так, чтобы не попасть в область электромеханического резонанса системы зеркало–пьезокерамика. С учетом всех перечисленных требований частота пробного сигнала была выбрана равной 25 кГц. Пробные колебания, выработанные генератором, используются в системе регистрации дважды: в качестве собственно пробного сигнала, для чего они подаются на пьезокерамику зеркала раскачки, и в качестве опорного сигнала на фазовый детектор. Под воздействием пробных колебаний пьезокерамика раскачки изменяет свои размеры, что, в свою очередь, вызывает изменение пространственного положения зеркала и, соответственно, яркости интерференционной картины на фотоприемнике. Амплитуда пробного сигнала выбирается такой, чтобы перемещение зеркала составляло 5–10 % от величины $\lambda/2$, где λ – длина волны гелий-неонового лазера, равная $0{,}63 \cdot 10^{-6}$ м. Практически это означает 5–10 В.

Фотоприемник является источником сигнала для резонансного усилителя, предназначенного для получения сигнала, поступающего на вход фазового детектора с нужными параметрами. Резонансный усилитель выполнен в виде отдельного блока и расположен на оптической скамье. Такое исполнение вызвано необходимостью защиты его от помех. Уже усиленный сигнал подается в систему регистрации. Резонансный усилитель выдает сигнал, пропорциональный изменению разности длин плеч интерферометра Δl. Усилитель сигнала фотоприемника выполнен резонансным в связи с необходимостью получить большой коэффициент усиления (порядка 10 000), уменьшить склонность к самовозбуждению, и, кроме того, узкополосный усилитель повышает помехозащищенность системы в целом.

Итак, сигнал частотой 25 кГц после резонансного усилителя подается на фазовый детектор, куда, как сказано выше, поступает опорный сигнал, задержанный линией задержки. Линия задержки используется для компенсации временной задержки сигнала, проходящего через интерферометр. Она позволяет изменить фазу выходного сигнала на $\pm\pi/2$ относительно входного. Знак и величина напряжения, вырабатываемого фазовым детектором, зависят от положения интерференционного максимума/минимума относительно плоскости фотоприемника. Таким образом, с помощью пробного сигнала удается определять не только факт наличия смещения интерференционного максимума из плоскости фотоприемника, но и направление этого смещения.

Выходное напряжение фазового детектора подается на интегратор для устранения статической ошибки регулятора. Выходное напряжение интегратора является, по сути, выходным напряжением системы регистрации. Оно же после необходимого усиления подается на пьезокерамику компенсации, которая вызывает перемещение соответствующего зеркала таким образом, чтобы компенсировать смещение, зарегистрированное системой. Так как реальные перемещения незакрепленного конца намного превышают величину $\lambda/2$, система регистрации оснащена дополнительной подсистемой

расширения динамического диапазона – системой сброса уровня. Выходной сигнал интегратора анализируется на предмет достижения границы динамического диапазона (как в положительную, так и в отрицательную стороны). По достижении этой границы с помощью аналогового ключа закорачивается накопительная емкость на интеграторе, и сигнал с интегратора обнуляется. Величины напряжений подобраны так, что, когда выходной сигнал с интегратора приближается к границе динамического диапазона, это означает, что компенсационное зеркало переместилось на величину, приближающуюся к величине $\lambda/2$. После скачкообразного уменьшения напряжения на пьезокерамике система переходит на следующий интерференционный максимум. При этом генерируется специальный импульс, поступающий на счетчик сбросов и позволяющий путем подсчета произошедших сбросов восстановить исходный сигнал (это производится в цифровой форме в компьютере, оснащенном АЦП и счетчиком сбросов).

Таким образом, блок регистрации поддерживает интерферометр в экстремуме зависимости $I(\Delta l)$ и с точностью 0,3 нм в диапазоне частот 0–1000 Гц выдает напряжение на выходе, пропорциональное изменению разности длин плеч интерферометра, соответствующее ближайшему экстремуму $I(\Delta l)$.

Этот сигнал вместе с сигналами положительных и отрицательных сбросов от системы сброса уровня передается по экранированным кабельным линиям в лабораторное помещение, где после коммутирующей коробки поступает в аналого-цифровой преобразователь. После оцифровки информация записывается на жесткий диск компьютера.

Система регистрации ЛИВДГ, как сказано выше, несколько отличается от систем регистрации остальных интерферометров. Для упрощения эксплуатации и повышения надежности системы регистрации было принято решение разработать её с аналогичным принципом работы, но с применением цифровых программируемых микросхем, на которые возлагается задача синхронного детектирования, вычисления величины сигнала компенсации, интегрирования, а также формирования выходного сигнала в цифровой форме, что соответствует принципу оцифровки «на месте». Кроме того, данная система должна быть универсальной и легко масштабируемой в рамках приведенной структурной схемы.

Испытания ЛИВДГ

Летом 2005 г. были проведены испытания ЛИВДГ в составе сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, состоящего из 52,5-метрового берегового лазерного деформографа, лазерного нанобарографа, метеостанции, приёмных и излучающих гидроакустических систем (рис. 3). ЛИВДГ был проверен на герметичность, испытана компенсационная система при его погружении на заданную глубину. Проведены кратковременные измерения вариаций давления гидросферы синхронно с измерениями вариаций микродеформаций земной коры лазерным деформографом.

На рис. 4 приведен пример одной из записей ЛИВДГ и лазерного деформографа. ЛИВДГ располагался недалеко от берега (около 15 м) на глубине 1,5 м. Расстояние между лазерным деформографом и ЛИВДГ составляло около 300 м. Питание на лазерный измеритель вариаций давления гидросферы подавалось из лабораторного помещения, а данные с него поступали в компьютер, который находился также в лабораторном помещении. Данные с лазерного деформографа поступали на другой информационный носитель. Общий характер записи лазерного деформографа совпадает с записью ЛИВДГ, за исключением отдельных мелких деталей.

В сверхнизкочастотной области спектра эти общие закономерности вызваны сгонно-нагонными явлениями и приливами. И это закономерно, так как лазерный измеритель

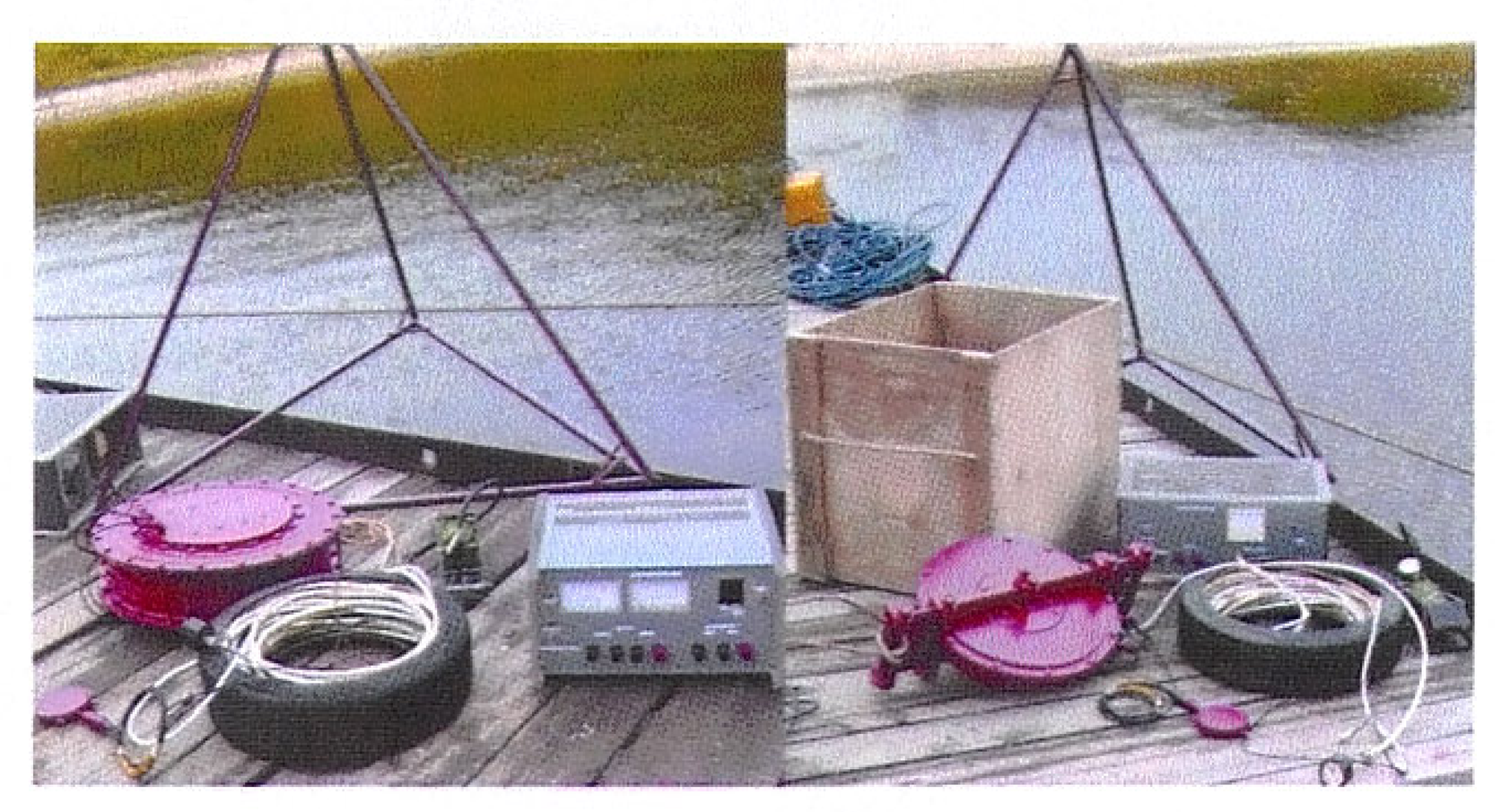

Рис. 3. Низкочастотные гидроакустические излучатели на 30–35 Гц (слева) и 230–250 Гц (справа)

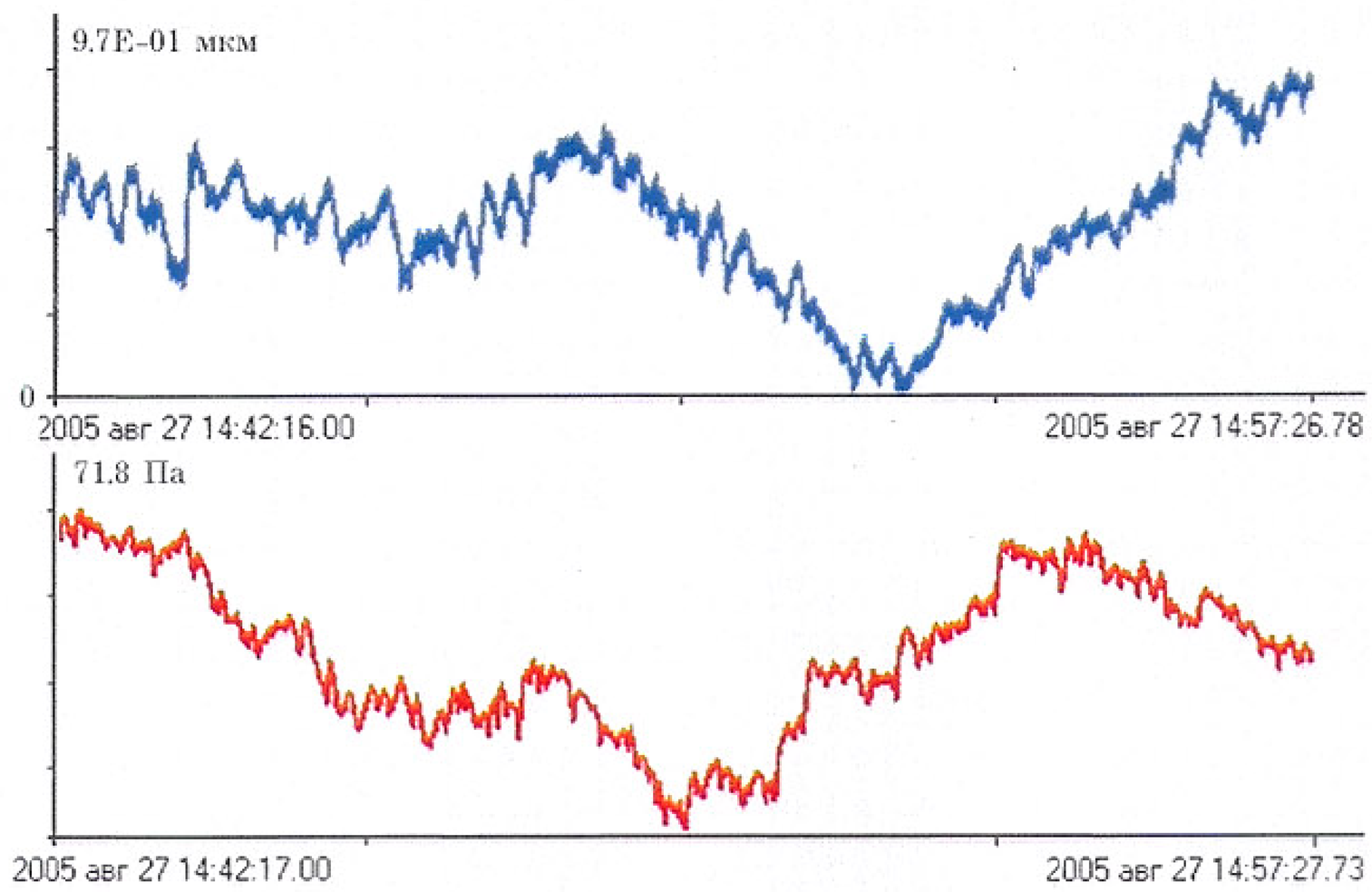

Рис. 4. Синхронные участки записей 52,5-метрового лазерного деформографа горизонтального типа (верхний график) и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (нижний график)

вариаций давления гидросферы регистрирует только сигналы, распространяющиеся в гидросфере, а лазерный деформограф регистрирует суммарные сигналы, распространяющиеся как в земной коре, так и в гидросфере и атмосфере. ЛИВДГ регистрирует сигналы в частотном диапазоне практически от 0 Гц, т. е. в его записи присутствуют все низкочастотные и высокочастотные колебания уровня моря, практически все вариации давления гидросферы в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц. А эти вариации вызываются как изменением уровня моря в данном диапазоне частот, так и внутригидросферными вариациями давления.

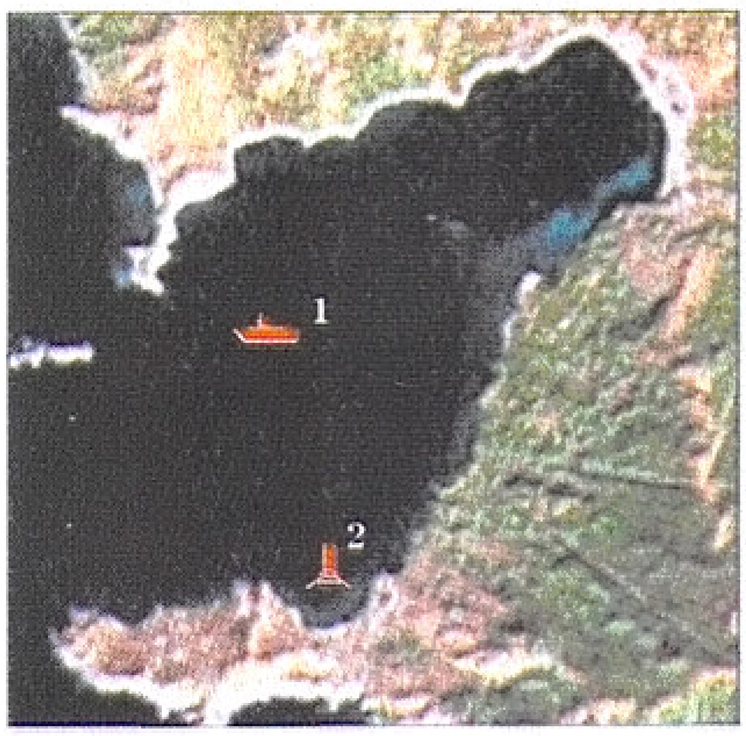

Рис. 5. Карта проведения эксперимента в бух. Витязь Японского моря. 1 – излучатель, 2 – приёмник

Как видно из записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (рис. 4), он фиксирует весь указанный диапазон колебаний и волн. К сожалению, запись была проведена пробная, и практически ничего важного из неё извлечь нельзя. Можно лишь отметить сходство с записью лазерного деформографа и после обработки обнаружить наличие совпадающих отдельных мощных спектральных составляющих в спектрах лазерного деформографа и ЛИВДГ.

При спектральной обработке синхронных записей лазерного деформографа и ЛИВДГ выделены мощные спектральные составляющие на частотах, соответствующих периодам в 22 с и 5,6 с. Данные колебания вызваны инфрагравитационными и гравитационными поверхностными морскими волнами. Период 5,6 с характерен для прогрессивных морских волн, которые зарождаются в Японском море в результате действия различных барических депрессий. Период 22 с характерен для инфрагравитационных волн Японского моря. Во время измерения наблюдался штиль с волнением крайне малой амплитуды. Подобные результаты были обнаружены и ранее при обработке только записей лазерного деформографа с привлечением данных различных гидрофонов и без них.

В период с осени 2005 г. по лето 2006 г. была выполнена модернизация системы регистрации ЛИВДГ, а осенью 2006 г. проведены её испытания при измерении естественных океанологических процессов и гидроакустических колебаний различной формы, создаваемых в воде низкочастотным гидроакустическим излучателем.

Экспериментальные исследования проводились в бух. Витязь с 28 октября по 1 ноября 2007 г. С помощью научно-исследовательского судна «Малахит» была выполнена постановка ЛИВДГ на глубине 7,5 м в месте с координатами 42°35,1′N, 131°09,8′E. Работа низкочастотного гидроакустического излучателя обеспечивалась с борта «Малахита» в точке с координатами 42°35,7′N, 131°09,7′E. Схема эксперимента указана на карте, приведённой на рис. 5.

Низкочастотный гидроакустический излучатель обеспечивал излучение простых гармонических колебаний и сложных фазоманипулированных колебаний. На рис. 6 приведена динамическая спектрограмма участка записи ЛИВДГ, на которой прослеживаются энергонасыщенные области, содержащие все разновидности излучённого сигнала.

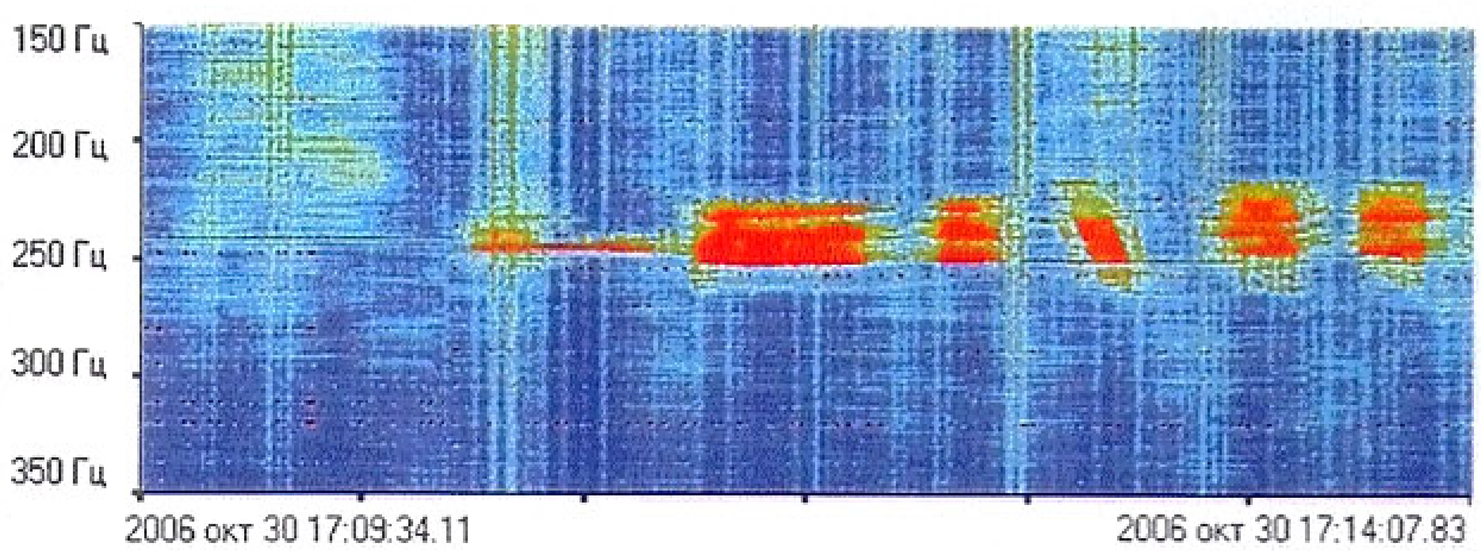

Рис. 6. Динамическая спектрограмма, полученная при обработке записи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы во время работы низкочастотного гидроакустического излучателя (230–250 Гц) в гармоническом и фазоманипулированном режимах

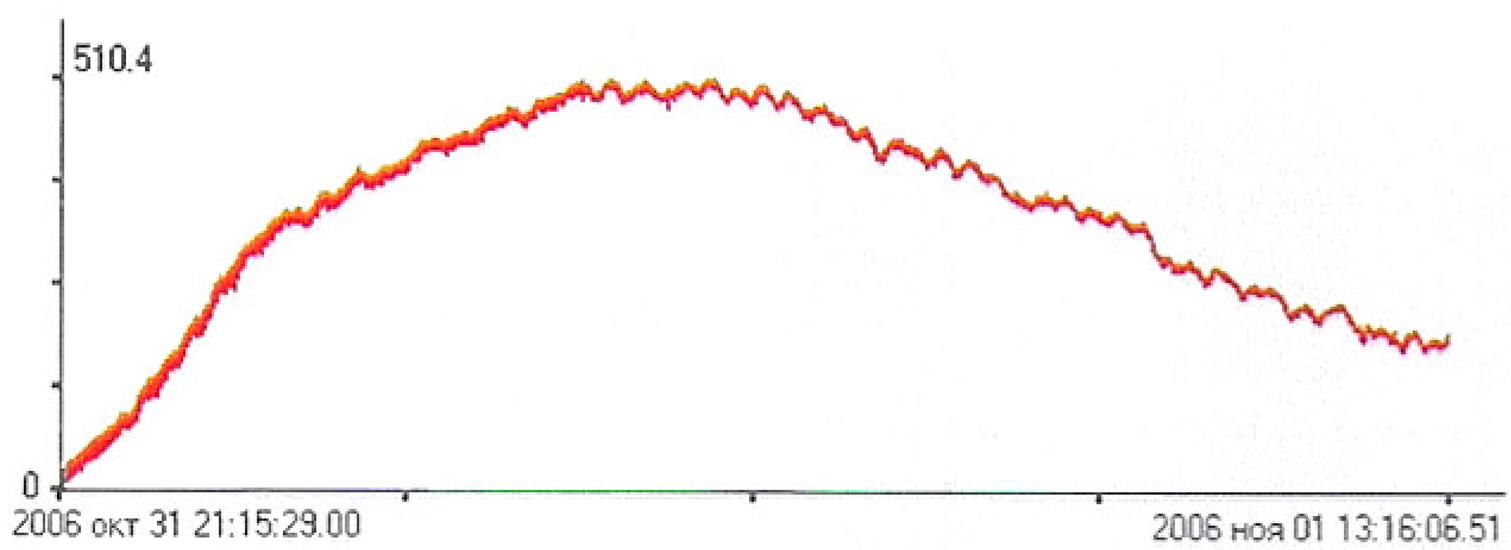

Рис. 7. Запись лазерного измерителя вариаций давления гидросферы. Давление приведено в относительных единицах

На рис. 7 приведена запись вариаций уровня микроколебаний давления гидросферы, зарегистрированная данной установкой. В результате спектральной обработки этой записи выделены мощные спектральные составляющие в инфразвуковой области, связанные с поверхностным волнением (периоды около 5 с) и собственными колебаниями водной массы залива (периоды около 17 мин).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан лазерный измеритель вариаций давления гидросферы со следующими характеристиками: точность измерения вариаций давления гидросферы – $2{,}4 \cdot 10^{-2}$ Па при использовании круговой стальной мембраны диаметром 5 см и толщиной 0,5 мм, частотный диапазон – от 0 до 1000 Гц с возможностью повышения граничной правой частоты до 10 000 Гц, динамический диапазон практически неограничен при измерении естественных процессов инфразвукового диапазона.

Установлены общие закономерности в записях берегового лазерного деформографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в инфразвуковом диапазоне, обусловленные сгонно-нагонными явлениями, приливами, инфрагравитационными и гравитационными морскими волнами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-05-64448-а, № 06-05-08043-офи, № 06-05-96040-р-восток-а) и ДВО (1-й раздел конкурса «ДВО-2007»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли. 2002. № 8. С. 69–73.

2. Laser interferometer gravitational wave observatory. Официальный сайт LIGO Laboratory www.ligo.caltech.edu

3. Shuzo Takemoto, Akito Araya, Junpei Akamatsu, Wataru Morii, Hideo Momose, Masatake Ohashi, Ichiro Kawasaki, Toshihiro Higashi, Yoichi Fukudo, Shinji Miyoki, Takashi Uchiyama, Daisuke Tatsumi, Hideo Hanada, Isao Naito, Souichi Telada, Nobuo Ichikawa, Kensuke Onoue, Yasuo Wada. 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.

4. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалёв 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 изучении бародеформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90.

5. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы «атмосфера–гидросфера–литосфера» // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 3. С. 120–122.

6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 7. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.