

Особенности применения лазерно-интерференционного донного сейсмографа

Г. И. Долгих^{1,2}, С. Г. Долгих^{1,2}, А. А. Плотников¹, В. А. Чупин^{1,2}

¹Тихоокеанский Океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия, e-mail: lotos_toi@mail.ru

Описаны особенности применения лазерного измерителя вариаций давления гидросферы в качестве лазерно-интерференционного донного сейсмографа, способного регистрировать вариации смещения дна. Возможности данного сейсмографа продемонстрированы при регистрации сейсмических сигналов.

Ключевые слова: донный сейсмограф, лазерный интерферометр, лазерный гидрофон, лазерная интерферометрия, инфразвук.

Среди задач освоения Арктики первостепенными являются поиск и разведка богатейших полезных ископаемых арктического шельфа, в первую очередь нефти и газа. В [1] обоснована перспективность развития технологии донной сейсморазведки. Эта технология предполагает размещение регистрирующей аппаратуры на морском дне и имеет ряд очевидных преимуществ перед стандартными работами с плавающими косами. При этом необходимо использовать донные сейсмоприёмники с оптимальными техническими характеристиками. В настоящее время разработаны различные широкополосные донные сейсмостанции, применяющиеся при различных фундаментальных и прикладных исследованиях [2–6]. Однако большинство сейсмостанций основаны на датчиках пьезоэлектрического типа и малоэффективны при измерении сигналов частотами менее 1 Гц. Это стимулирует работы по поиску новых подходов к созданию современных донных сейсмографов.

В последние годы с использованием современных лазерно-интерференционных методов разработаны различные модификации лазерных измерителей вариаций давления гидросферы, предназначенных для измерения вариаций гидросферного давления при частотах от 0 (условно, т. е. ограничена временем измерения) до 1000 Гц [7, 8]. Чувствительным элементом данных конструкций является мембрана, закреплённая по краям. Одна сторона мембраны контактирует с водой, а другая обращена во внутрь прибора. Внутренняя сторона имеет в центре зеркало и является частью интерферометра Майкельсона. Вариации гидросферного давления приводят к вариациям смещения центра мембраны, которые фиксирует интерферометр Майкельсона. В бассейнах и в натурных условиях проведены калибровка и испытания лазерных измерителей вариаций давления гидросферы. Дальнейшее применение лазерных измерителей показало их большую эффективность при изучении природы различных геосферных процессов инфразвукового диапазона [8, 9]. После небольших конструктивных изменений лазерного измерителя вариаций давления гидросферы с его помощью можно будет регистрировать смещения морского дна.

Лазерно-интерференционный донный сейсмограф.

Схема сейсмографа приведена в [10]. В цилиндрическом корпусе расположен интерферометр Майкельсона, цифровая система регистрации и система компенсации внешнего давления. Чувствительный элемент донного сейсмографа – круглая мембрана – закреплена в крышке. Одна сторона мембраны через соединительный модуль системы компенсации давления контактирует с дном, в центре противоположной стороны мембраны закреплено зеркало. Соединительный модуль в виде полости, заполненной крупнозернистым песком, предназначен для защиты мембраны от повреждений при установке прибора на дно, а также обеспечения контакта мембраны с дном.

Система компенсации внешнего давления работает следующим образом. В момент погружения клапан открыт, поэтому воздух из ёмкости под действием гидростатического давления поступает в камеру, образованную мембраной, крышкой и оптическим окном. Резиновая накладка имеет отверстия, что позволяет воде проникать в песок, находящийся в модуле. За счёт этого при погружении системы поддерживается равенство давлений на внешней и внутренней сторонах мембраны и она остаётся в равновесии. При достижении дна клапан закрывается, и дальнейшие смещения центра мембраны измеряются. Таким же способом поддерживается равенство давлений при подъёме системы.

Измерительная часть лазерно-интерференционного донного сейсмографа основана на интерферометре Майкельсона. Луч лазера, проходя через коллиматор, падает на делительный куб, где делится на измерительный и эталонный лучи. Измерительный луч через линзу попадает на зеркало, закреплённое на мембране, а затем снова проходит через линзу и возвращается в делительный куб. Эталонный луч также возвращается в делительный куб, но через систему зеркал, установленных на пьезокерамических преобразователях раскочки и компенсации. Далее оба луча интерферируют друг с другом.

Для проведения измерений лазерно-интерференционный донный сейсмограф монтируется на дне таким образом, что

колебания грунта через резиновую накладку и модуль, плотно заполненный песком, передаются на мембрану. Закреплённое на мембране зеркало входит в состав измерительного плеча интерферометра Майкельсона. Колебания грунта вызывают смещения центра мембраны, что приводит к колебаниям яркости центра интерференционного пятна, максимальной в начальный момент измерений. Яркость зависит от оптической разности хода плеч интерферометра и имеет экстремальный характер (максимумы чередуются с минимумами). Изменения яркости регистрируются фотоприёмником и передаются в цифровую систему регистрации. На основе полученных данных формируется сигнал обратной связи, поступающий на пьезокерамический преобразователь. При этом расширяется или сужается база опорного плеча интерферометра и поддерживается максимум яркости интерференционной картины. Сигнал обратной связи пропорционален колебаниям грунта и является выходным сигналом лазерно-интерференционного донного сейсмографа.

Внутренний динамический диапазон системы регистрации ограничен длиной волны лазерного излучения $\pm\lambda/2$ (расстояниями между двумя соседними максимумами интерференционной картины). Для расширения диапазона предусмотрена система сброса уровней, которая работает следующим образом: при достижении выходным сигналом прибора значений $\pm U$, соответствующих изменению $\Delta l = \pm\lambda/2$ (Δl – смещение центра мембраны; λ – длина волны лазерного излучения), происходит обнуление значений $\pm U$, что соответствует перескоку интерференционной картины с одного максимума на другой. Так достигается неограниченный динамический диапазон при измерении линейных природных сигналов [11, 12]. В то же время разрешающая способность системы регистрации определяется внутренним динамическим диапазоном, который связан с половиной длины лазерного излучения и при использовании красного гелий-неонового лазера равен 0,315 мкм. Таким образом, разрешающая способность системы регистрации будет равна 0,45 нм, поскольку для формирования выходного сигнала, эквивалентного значению 0,315 мкм, используется половина динамического диапазона 12-разрядного цифроаналогового преобразователя.

Зависимость смещения центра закреплённой по краям мембраны от давления, приложенного к её поверхности, описывается уравнением равновесия для закреплённой по краям круглой пластинки [13]:

$$\Delta p = 16 \Delta l h^3 E / [3(1 - \sigma^2) R^4],$$

где Δp – изменение давления на мембране; h , R – толщина и радиус мембраны; E – модуль Юнга; σ – коэффициент Пуассона.

Данное соотношение справедливо только при малых прогибах мембраны: $\Delta l < h$. На мембрану из нержавеющей стали толщиной 1 мм и диаметром 100 мм должно действовать давление 0,086 Па, чтобы центр мембраны сместился на 0,45 нм. Можно утверждать, что мембрана будет реагировать и на меньшие изменения давления. Теоретически разрешающая способность системы донного типа ограничена разрешающей способностью системы регистрации и составляет 0,45 нм.

Оптико-механическая часть сейсмографа выполнена таким образом, что делительный куб и элементы, формирующие эталонное плечо (держатели пьезокерамических преобразователей) крепятся к оптической скамье, которая, в свою очередь, жёстко крепится к крышке на корпусе из толстой нержавеющей стали. В рассмотренном случае вариации внешнего давления или смещения грунта будут воздействовать только на измерительное плечо интерферометра (за счёт влияния на мембрану), а не на эталонное плечо, и измерительным элементом интерферометра Майкельсона будет только мембрана.

Слабым местом всех лазерно-интерференционных измерительных систем является чувствительность элементов конструкции интерферометров к изменениям температуры. Для уменьшения чувствительности большинство крепёжных элементов интерферометра выполнены из инвара, имеющего очень низкий температурный коэффициент линейного расширения. Помимо этого, основная часть интерферометра напрямую не контактирует с внешней средой (не учитывая место соединения оптической скамьи с крышкой прибора). Поэтому температура внутри сейсмографа изменяется очень медленно, и дрейфы выходного сигнала, обусловленные вариациями температуры, легко учитываются и при необходимости удаляются при обработке данных сейсмографа и показаний термодатчика.

Испытания лазерно-интерференционного донного сейсмографа. Испытания сейсмографа были проведены в ходе выполнения прикладных исследований в заливе Восток Японского моря в осенне-весенний период 2015–2016 гг. Прибор был установлен на дно на глубине 10 м в точке с координатами 42°53' СШ, 132°44' ВД.

По данным Геофизической службы РАН 6 января 2016 г. на территории КНДР в северо-восточной провинции Хамген-Пукто, в полусотни километров от города Кильчжув точке с координатами 41°28' СШ и 129°09' ВД на глубине 1 км произошло сейсмическое событие с магнитудой 5,2. Данное событие было зарегистрировано лазерными деформографами, установленными на мысе Шульца в точке с координатами 42°58' СШ и 131°16' ВД. При анализе спектров записей лазерных деформографов с плечами 52,5 и 17,5 м установлено, что зарегистрированные колебания находятся в характерном частотном диапазоне 7–12 Гц. С учётом частотного диапазона возбуждённых колебаний записи лазерных деформографов отфильтровали полосовым фильтром Хэмминга в частотном диапазоне 1–20 Гц. На рис. 1 приведены отфильтрованные записи лазерных деформографов с плечами длиной 52,5 м (а) и 17,5 м (б) и лазерно-интерференционного донного сейсмографа, установленного в заливе Восток (в). Можно наблюдать, что сейсмограф зарегистрировал сейсмическое событие позже, чем лазерные деформографы. Однако спектральная обработка фрагментов показала, что сейсмограф зарегистрировал событие, диапазон частот которого близок к событию, зарегистрированному лазерными деформографами. Таким образом, с учётом запаздывания времени приёма и близости зарегистрированных событий в частотном диапазоне, можно утверждать, что сигналы были зарегистриро-

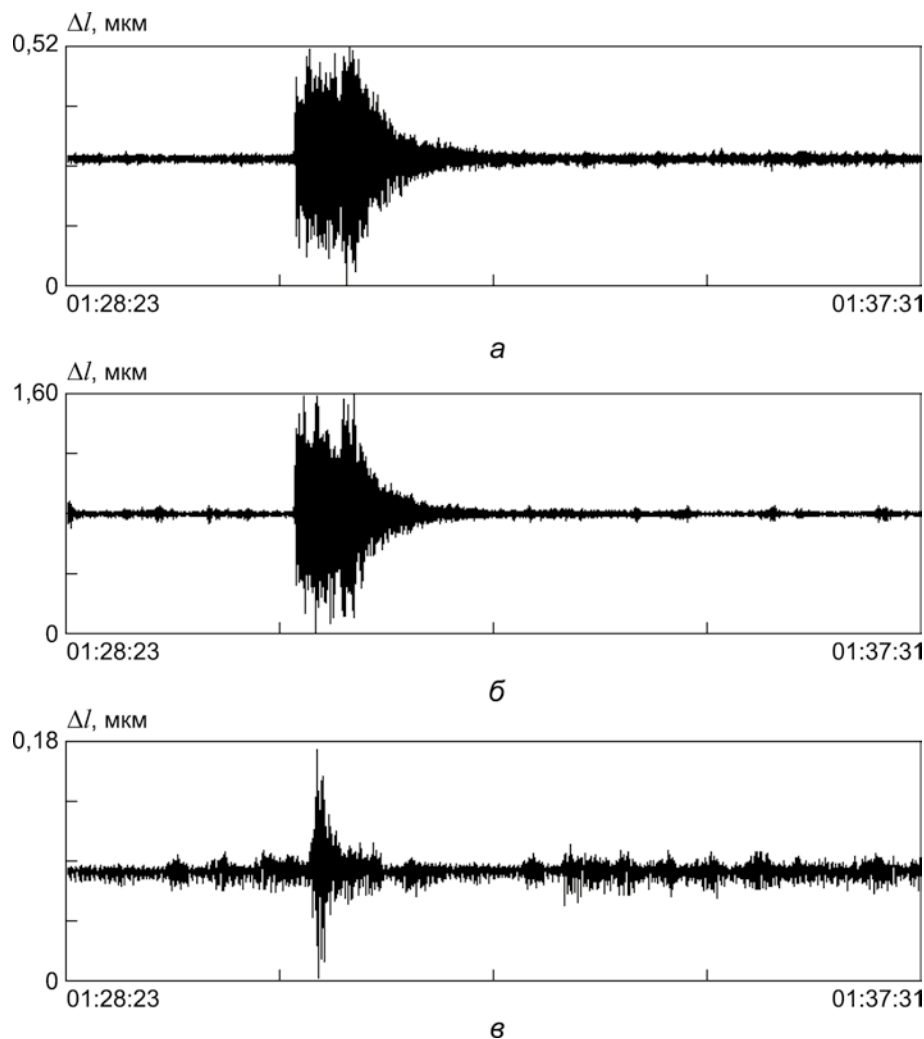


Рис. 1. Отфильтрованные записи лазерных деформографов с плечами длиной 52,5 (а) и 17,5 м (б) и лазерно-интерференционного донного сейсмографа (в)

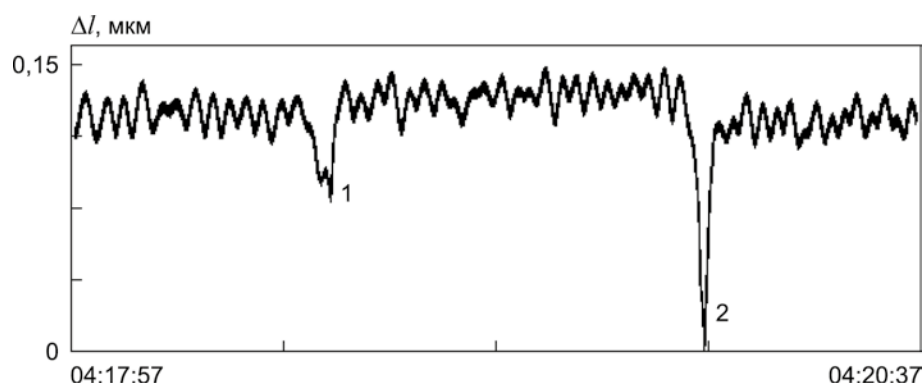


Рис. 2. Фрагмент записи обусловленных ветровым волнением колебаний придонного грунта с периодами около 3 с: 1, 2 – низкочастотные одиночные колебания грунта

ваны как береговыми лазерными деформографами, так лазерно-интерференционным донным сейсмографом.

Помимо этого, в записях сейсмографа присутствуют колебания, обусловленные процессами в инфраз-

вуковом частотном диапазоне. На рис. 2 приведён фрагмент записи, иллюстрирующий регистрацию возбуждённых ветровым волнением колебаний придонного грунта с периодами около 3 с. Природа низкочастотных одиночных неперiodических колебаний грунта 1, 2 на данный момент не ясна. Факт регистрации этих колебаний говорит о том, что высокая разрешающая способность (0,45 нм) лазерно-интерференционного донного сейсмографа позволяет регистрировать низкочастотные колебания, несмотря на то, что линейные размеры мембраны (чувствительного элемента системы) гораздо меньше длин волн инфразвукового диапазона частот. Для определения точных значений границ рабочего диапазона системы необходимо разработать дополнительное устройство (специальный калибровочный стенд), что является предметом дальнейших исследований. Верхняя граница ограничена возможностями используемой цифровой системы регистрации и составляет около 1000 Гц.

Заключение. В результате небольших конструктивных изменений лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был преобразован в лазерно-интерференционную систему донного типа, теоретически способную регистрировать смещения морского дна с погрешностью 0,45 нм. Регистрация сигналов, возникших в результате сейсмического события и распространившихся в морском дне, подтвердили возможность использования лазерно-интерференционного донного сейсмографа в качестве донного широкополосного сейсмического приёмника.

Работа выполнена при частичной поддержке РФ (соглашение № 14-50-00034, создание установок) и программы «Дальний Восток».

Литература

1. Лавёров Н. П., Рослов Ю. В., Лобковский Л. И., Тулупов А. В., Воронов М. А., Ганжа О. Ю. Перспективы донной

сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4–13.

2. Левченко Д. Г., Розман Б. Я., Утяков Л. Л., Шахрамьян М. А. Выносные донные станции для геофизического мониторинга и оперативного оповещения о землетрясениях и цунами // Сборник трудов МГИ. 1992. С. 57–61.

3. Kasahara J., Toshinori S. Broadband Seismic Observation in VENUS Project // Intern. Workshop Scient.: Use Submar. Cables. Japan, Okinawa. 1997. P. 126–130.

4. Delaney J. R. NEPTUNE: an Interactive Submarine Observatory at the Scale of a Tectonic Plate // Long-Term Observations in the Oceans: OHP/ION Joint Symposium. Japan, 2001. P. 309.

5. Левченко Д. Г., Леденёв В. В., Парамонов А. А. Современные донные станции для сейсморазведки и сейсмологического мониторинга // Научное приборостроение. 2003. Т. 13. № 4. С. 70–82.

6. Башилов И. П., Зубко Ю. Н., Левченко Д. Г., Леденёв В. В., Павлюкова Е. Р., Парамонов А. А. Донные геофизические обсерватории: методы конструирования и области применения // Научное приборостроение. 2008. Т. 18. № 2. С. 86–97.

7. 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.

8. Долгих Г. И., Привалов В. Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Дальнаука, 2009. 202 с.

9. Долгих Г. И., Будрин С. С., Долгих С. Г., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Шве́ц В. А., Яковенко С. В. Морские внутренние волны и атмосферные депрессии // ДАН. 2015. Т. 462. № 5. С. 601–604.

10. Пат. 2653099 РФ. Лазерно-интерференционный донный сейсмограф / А. А. Плотников, В. В. Овчаренко, В. А. Шве́ц, В. А. Чупин, Г. И. Долгих, С. В. Яковенко, С. Г. Долгих // Изобретения. Полезные модели. 2018. № 13.

11. Дубров М. Н., Алешин В. А. Высокоточные лазерные интерферометры в многокомпонентных измерительных системах // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 10. С. 7.

12. Шве́ц В. А. Контроллер-детектор регистрирующей системы лазерного деформографа // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 159–160.

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

Дата принятия: 04.07.2018.

Features of the use of laser-interference bottom seismograph

G. I. Dolgikh^{1,2}, S. G. Dolgikh^{1,2}, A. A. Plotnikov¹, V. A. Chupin^{1,2}

¹V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, e-mail: lotos_toi@mail.ru

Features of the application of a laser measuring instrument of hydrosphere pressure variations are described as a laser-interference system of the bottom type, capable of registering variations in the displacement of the bottom. The Possibilities of this system are demonstrated during the registration of seismic signals.

Key words: bottom seismograph, laser interferometer, laser hydrophone, laser interferometry, infrasound.