АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 41, № 2, с. 235 - 239

УДК 534.231

# ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОГРАФОВ В ГИДРОАКУСТИКЕ

© 1995 г. А. В. Давыдов, Г. И. Долгих, Н. Ф. Кабанов

*Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН*
*690032 Владивосток, ул. Балтийская, 43*

Поступила в редакцию 15.03.94 г.

Исследуются возможности 105-м лазерного деформографа равноплечего типа и 52.5-м лазерного деформографа неравноплечего типа при регистрации сигналов от низкочастотных гидроакустических излучателей, расположенных в воде на различных удалениях от берега в районе шельфа и свала глубин.

При исследовании сейсмоакустических процессов в частотном диапазоне 1 - 1000 Гц лазерными деформографами равноплечего и неравноплечего вариантов, расположенными на морской экспериментальной станции (МЭС) "Шульц" ТОИ ДВО РАН, установлено, что данный диапазон характерен присутствием сейсмоакустических шумов, вызванных морскими судами [1 - 3]. Поскольку шельфовая область Японского моря на юге Приморья является районом интенсивного судоходства, то вызванные им сейсмоакустические шумы в большей или меньшей степени практически постоянно присутствуют в записях лазерного деформографа в упомянутом диапазоне частот.

Для изучения законов генерации и распространения сейсмоакустического шума, вызванного морским судоходством, в ТОИ был проведен ряд экспериментов по генерации гидроакустических колебаний в шельфовой зоне Японского моря низкочастотными гидроакустическими излучателями и приему вызванных ими сейсмоакустических колебаний расположенным на берегу лазерным деформографом. Данные эксперименты представляют интерес и с той точки зрения, что при этом исследовался вопрос об эффективности использования лазерных деформографов в качестве детекторов гидроакустических сигналов. Этот интерес вызван тем, что в области низких частот сейсмоакустические поверхностные волны становятся доминирующим механизмом переноса акустической энергии в мелководной шельфовой зоне моря [4]. Экспериментальные исследования сравнительных уровней акустических шумов, регистрируемых гидрофонами и донными геофонами [4] показали, что на мелководном шельфе при частотах ниже 25 Гц в спектре записей гидрофонов наблюдается спадение, а в спектре записей геофонов – увеличение уровня спектральных составляющих.

Первые эксперименты по исследованию возможности регистрации береговым лазерным деформографом сейсмоакустических колебаний, возбуждаемых работой низкочастотных источников акустического излучения в прибрежных районах моря, были проведены на полигоне МЭС "Шульц" в 1987 и 1988 гг. [1, 5]. Акустические колебания в морской среде создавались излучателем [6].

Регистрация сейсмоакустических сигналов, вызванных работой низкочастотного гидроакустического излучателя в воде, проводилась в экспериментах 1987, 1988 гг. лазерным деформографом равноплечего типа с суммарной длиной плеч 105 м [1], блок-схема которого приведена на рис. 1. Луч лазера 1, пройдя оптическую систему 2, попадает в интерференционный узел 3, 4, 5, разделяется плоскопараллельной пластиной 3 на два пучка и по лучеводам 6 направляется на отражатели 7. Отраженные пучки сбиваются на плоскопараллельной пластине 3, интерферируют, и полученная таким образом интерференционная картина регистрируется фотодиодом 8. Далее электрический сигнал поступает в электронную систему регистрации прибора 9, работающую таким образом, что за счет системы обратной связи, выведенной на пьезокерамический цилиндр 5, на фотодиоде интерференционная картина поддерживается в минимуме. При достижении эталонного напряжения на пьезокерамике электронные ключи системы регистрации закорачи-ваются, и происходит сброс напряжения, поступающего на пьезокерамику, в ноль. При этом интерференционная картина "перескакивает" на ближайший минимум. Величина эталонного напряжения соответствует смещению пьезокерамики на ширину интерференционной полосы – $0.315 \times 10^{-6}$ м (половина длины волны He-Ne лазера). Сигнал подстройки к минимуму интерференционной картины и количество сбросов положительной и отрицательной полярности регистрируются приборами и системами записи аналогового и цифрового характера. Оптическая система деформографа вместе с лазером и отражателями устанавливается на трех гранитных

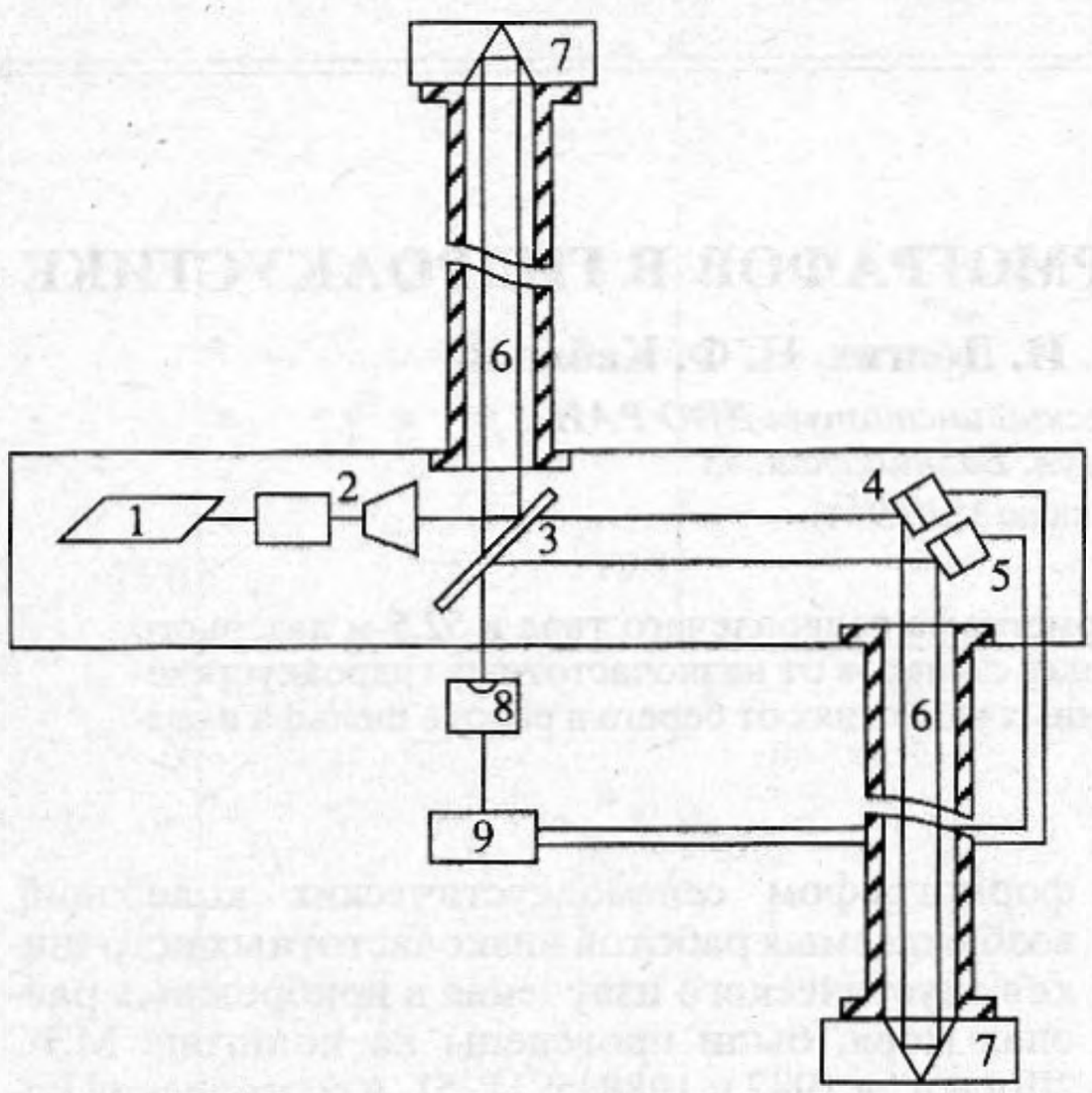


**Рис. 1.** Блок-схема лазерного деформографа. 1 – He-Ne лазер; 2 – оптическая система; 3, 4, 5 – интерференционный узел; 6 – лучевод; 7 – отражатель, 8 – фотодиод; 9 – система регистрации лазерного деформографа.

блоках для деформографа равноплечего типа (для деформографа неравноплечего типа – на двух), контактирующих с коренными породами. Вся система находится в специально отстроенном, термоизолированном помещении на глубине 5 - 7 м от поверхности земли. Применяемые методы интерферометрии позволяют измерять смещения устоев деформографа с точностью $10^{-10}$ м. Динамический диапазон прибора – более 120 дБ. Рабочий диапазон частот – 0 - $10^3$ Гц. Факторами, ограничивающими чувствительность данного метода регистрации низкочастотного гидроакустического сигнала, являются: нестабильность частоты лазера, вариации атмосферных параметров, а также шумы фотоэлектронной аппаратуры. Подробный анализ вышеуказанных факторов проведен в [7].

В экспериментах 1987, 1988 гг. электрический сигнал с выхода системы регистрации лазерного деформографа подавался на вход анализатора спектра СК4-72. С целью уменьшения дисперсии полученной спектральной оценки производились усреднения спектров, полученных по четырем последовательным реализациям. Копия спектров выводилась на графопостроитель Н-307. При проведении эксперимента 1988 г. были сделаны три станции излучения в шельфовой зоне моря, при этом на каждой станции варьировалась глубина погружения излучателя и излучаемая им амплитуда гидроакустической волны. В табл. 1 представлены характеристики эксперимента и экспериментально зарегистрированные амплитуды сейсмоакустических колебаний 1988 г.: $P$ – звуковое давление гидроакустического излучателя, приведенное к расстоянию 1 м от геометрического центра источника; $H$ – глубина моря в месте работы излучателя; $h$ – заглубление источника; $R$ – расстояние от источника до деформографа; $f$ – частота излучаемого гидроакустического сигнала; $A$ – амплитуда сейсмоакустического сигнала, зарегистрированного лазерным деформографом.

Исследования возможностей лазерных деформографов различных модификаций были продолжены в октябре 1992 г. Эксперимент проводился на гидрофизическом полигоне МЭС "Шульц". Приемником сейсмоакустических сигналов являлся лазерный деформограф неравноплечего типа с длиной плеча 52.5 м, в котором в качестве источника света используется частотностабилизированный He-Ne лазер типа "Драгун" с долговременной стабильностью порядка $10^{-11}$ (кратковременная стабильность – $10^{-12}$ - $10^{-13}$), что позволяет измерять смещения устоев деформографа при применяемых методах интерферометрии с точностью $10^{-10}$ - $10^{-11}$ м. Излучатель низкочастотных гидроакустических колебаний, используемый в эксперименте, отличался от излучателя, применяемого в экспериментах 1987, 1988 гг. В данном случае это был электромагнитный источник гидроакустических колебаний ГЗО, подробно описанный в [8].

**Таблица 1.** Данные эксперимента 1988 г.

| | Станция А | | | Станция В | | | Станция С | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | А/1 | А/2 | А/3 | В/1 | В/2 | В/3 | С/1 | С/2 | С/3 |
| $P$ (Па) | 1000 | 800 | 800 | 1100 | 850 | 650 | 900 | 820 | 350 |
| $H$ (м) | 39 | 39 | 39 | 41 | 41 | 41 | 44 | 44 | 44 |
| $h$ (м) | 18 | 18 | 30 | 15 | 25 | 35 | 15 | 25 | 35 |
| $f$ (Гц) | 16.0 | 16.8 | 19.5 | 16.0 | 18.3 | 20.5 | 16.5 | 18.8 | 20.3 |
| $R$ (км) | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.75 | 1.75 | 1.75 | 3.55 | 3.80 | 4.05 |
| $A$ (мкм) $\times 10^5$ | 78 | 62 | 16 | 81 | 77 | 16 | 41 | 47 | 5 |

В ходе проведения эксперимента было сделано четыре станции излучения низкочастотных гидроакустических колебаний. Расположение данных станций относительно берегового лазерного деформографа показано на рис. 2 (одна минута по широте соответствует приблизительно одной морской миле). Станции пронумерованы от 1 до 4.

На станции 1 судно стояло на якоре. На остальных станциях (2 - 4) – находилось в дрейфе. Скорость дрейфа составляла около одной морской мили за 15 мин. Направление дрейфа было практически восточным, так что излучатель за время проведения одной серии излучения длительностью около 15 мин смещался в восточном направлении (перпендикулярно оси лазерного деформографа) на расстояние около 1800 м.

Электрический сигнал, пропорциональный величине деформации на базе лазерного деформографа, вводился через аналогово-цифровой преобразователь, выполненный в стандарте КАМАК, с частотой дискретизации 100 Гц в ЭВМ "ЭРА-КАМАК-1300.01", где накапливался на жестком магнитном диске. Накопленные данные преобразовывались в отрезки длиной по 3072 точки, которые затем разбивались на 5 сегментов по 1024 точки с 50% перекрытием. После взвешивания каждого сегмента данных окном Блэкмана–Хэрриса для него вычислялся спектр мощности посредством БПФ. Результирующий спектр получался усреднением спектров, вычисленных по всем пяти перекрывающимся сегментам. На рис. 3 показан характерный вид полученного спектра мощности сейсмоакустических колебаний в диапазоне частот 1 - 50 Гц при отсутствии гидроакустического излучения, а на рис. 4 – при работе гидроакустического излучателя на ст. 3. Характеристики эксперимента и зарегистрированные лазерным деформографом амплитуды сейсмоакустических колебаний, вызванных работой гидроакустического излучателя, представлены в табл. 2. Обозначения аналогичны обозначениям табл. 1.

Промеренный профиль дна вдоль направления, соответствующего пунктирной линии на рис. 2, представлен на рис. 5. Вертикальными линиями отмечены расстояния от деформографа до начальных положений излучателя на каждой из станций 1 - 4.

Из табл. 1 видно, что когда излучатель расположен вблизи дна (A/3, B/3, C/3), амплитуды зарегистрированных сейсмоакустических колебаний сильно уменьшены по сравнению с амплитудами, зарегистрированными при бóльших удалениях излучателя от дна.

Для измерений A/1, A/2, B/1, B/2, C/1 и C/2 амплитуды зарегистрированных сейсмоакустических сигналов близки. Некоторое повышение уровня сигнала для B/2 и C/2 связано, видимо,

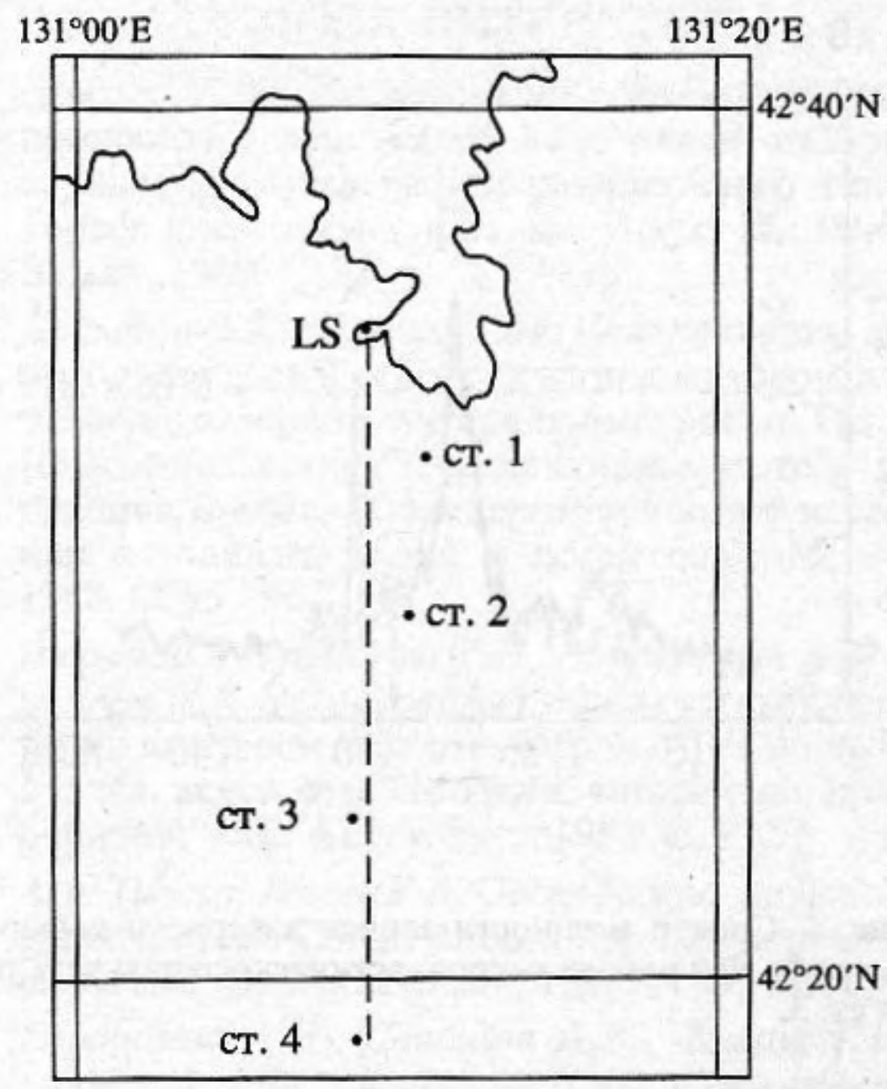


**Рис. 2.** Расположение станций гидроакустического излучения.

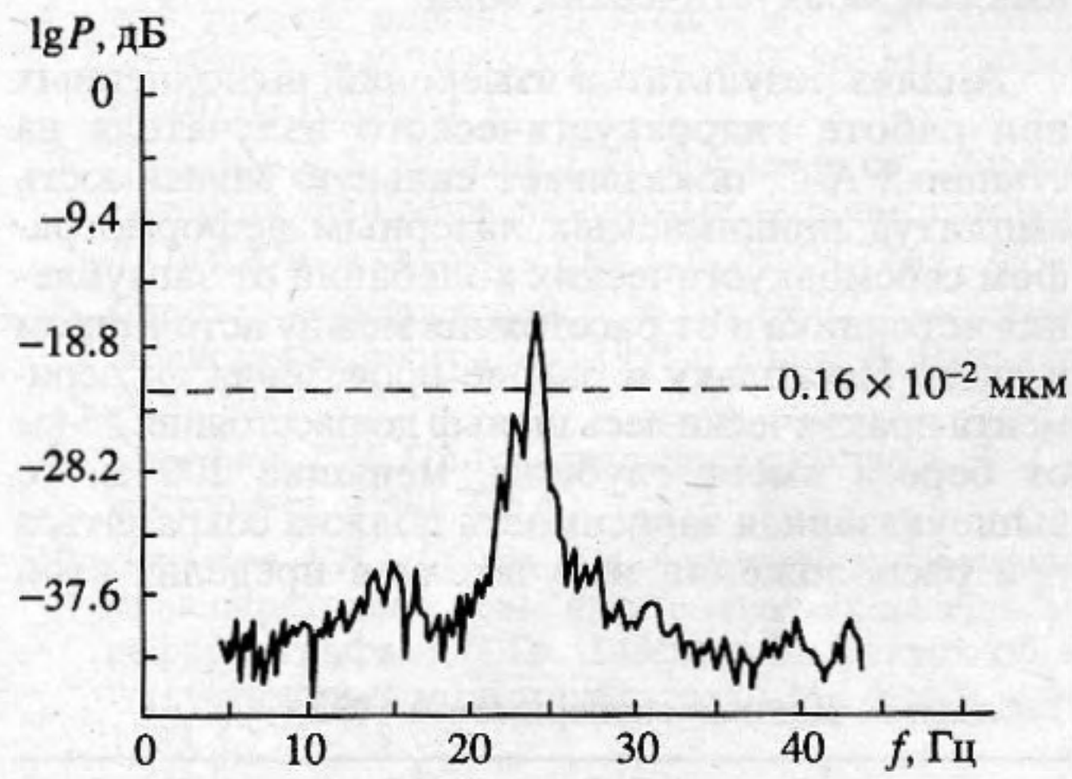


**Рис. 3.** Фоновый спектр мощности записи лазерного деформографа.

с тем, что при расположении источника вблизи поверхности воды, при $h/\lambda < 0.5$ (где $h$ – заглубление источника, $\lambda$ – длина гидроакустической волны), его поле соответствует полю диполя, и амплитуда звукового давления тем меньше, чем меньше $h$ [9].

Объяснить повышение уровня сигнала для измерений B/2 и C/2 можно влиянием различного заглубления источника. Малость амплитуд принятых сейсмоакустических сигналов для измерений A/3, B/3 и C/3 обусловлена тем, что в ближней (неволновой) зоне источника, когда $d \ll \lambda$

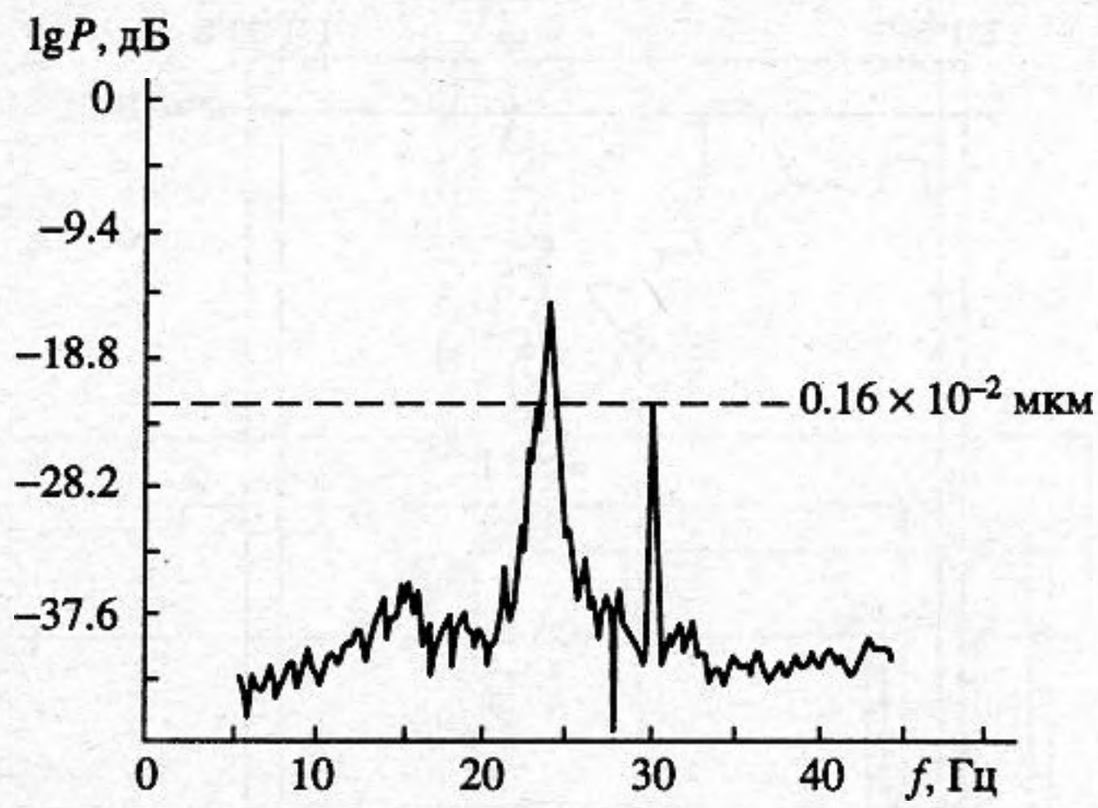


**Рис. 4.** Спектр мощности записи лазерного деформографа при работе гидроакустического излучателя на ст. 3.

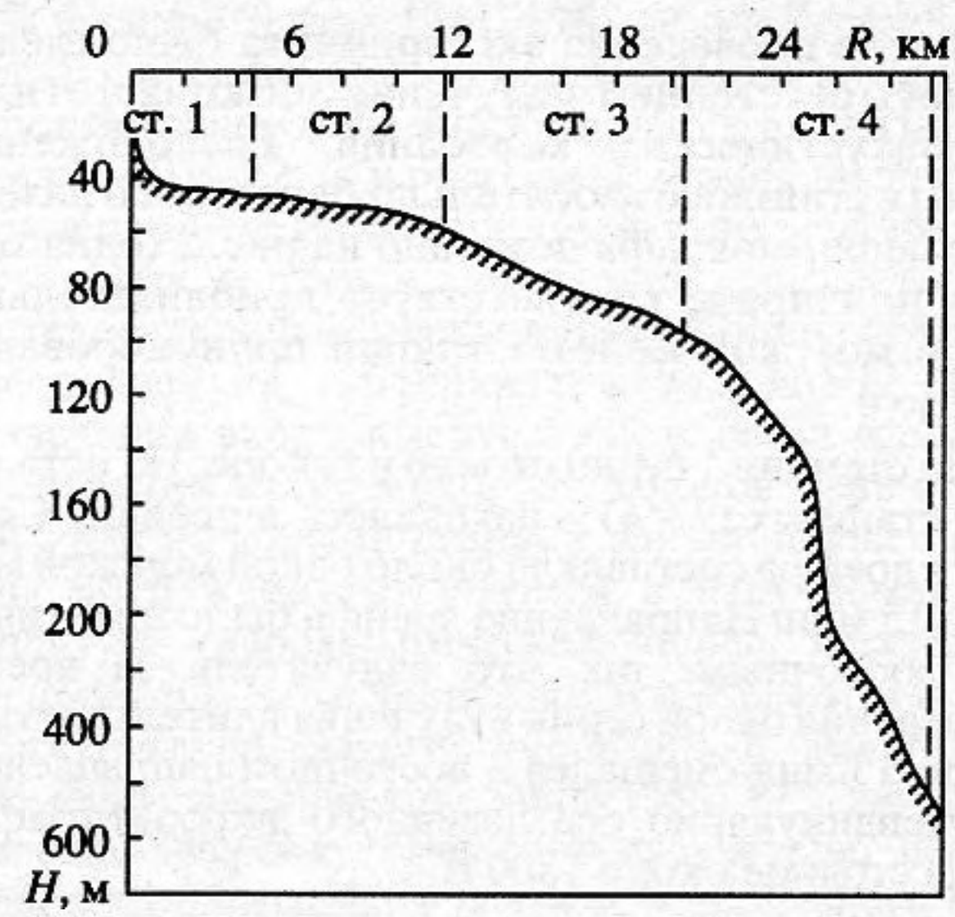


**Рис. 5.** Промеренный профиль дна вдоль трассы излучения.

($d$ – удаление источника от дна), звуковое поле имеет весьма сложный характер, не отвечающий условиям эффективной генерации поверхностных сейсмоакустических волн.

Анализ результатов измерений, выполненных при работе гидроакустического излучателя на станциях А-С, показывает сильную зависимость амплитуд принимаемых лазерным деформографом сейсмоакустических колебаний от заглубления источника и от расстояния между источником и дном. Поскольку в районе проведения эксперимента практически весь шельф до расстояния 25 км от берега имеет глубины, меньшие 200 м, то вышеуказанная зависимость должна сохраняться при расположении излучателя в пределах этой зоны. Количественный анализ измерений, выполненных при расположении излучателя на станциях А-С, оказался затруднительным, поскольку в этом эксперименте звуковое давление, приведенное к расстоянию 1 м от геометрического центра источника, известно с недостаточной точностью, так как расстояние между излучателем и контрольным гидрофоном не было строго фиксированным. В эксперименте, выполненном с применением другого излучателя на станциях 1 - 4, расстояние между излучателем и гидрофоном было постоянным, что дало возможность строго контролировать величину звукового давления и убедиться, что оно оставалось неизменным на протяжении всего эксперимента.

**Таблица 2.** Данные эксперимента 1992 г.

| | Станция 1 | Станция 2 | Станция 3 | Станция 4 |
|---|---|---|---|---|
| $P$ (Па) | 4200 | 4200 | 4200 | 4200 |
| $H$ (м) | 54 | 66 | 94 | 600 |
| $h$ (м) | 31 | 31 | 31 | 31 |
| $f$ (Гц) | 30.8 | 30.8 | 30.8 | 30.8 |
| $R$ (км) | 4.6 | 11.8 | 20.4 | 29.4 |
| $A$ (мкм) × $10^5$ | 94 | 120 | 156 | 33 |
| | 96 | 110 | 150 | 22 |
| | 95 | 89 | 144 | 15 |
| | | 76 | 124 | 12 |
| | | 64 | 120 | |
| | | | 100 | |

Предполагается, что в данных экспериментах лазерный деформограф регистрирует поверхностную волну рэлеевского типа, амплитуда которой спадает по закону $R^{-0.5}$ при увеличении расстояния $R$ от гидроакустического излучателя до деформографа [10].

Из табл. 2 видно, что зарегистрированные сейсмоакустические амплитуды для измерений, выполненных при работе излучателя на станциях 1 - 4, имеют значительный разброс. Поскольку на этих станциях судно находилось в дрейфе, такой разброс свидетельствует о том, что зона эффективной генерации поверхностной сейсмоакустической волны занимает сравнительно небольшую область на дне. Это приводит к тому, что при дрейфе судна область эффективной генерации медленно смещается по дну, и, попадая на участки дна с отличающимися характеристиками, приводит к вариациям амплитуд принимаемого лазерным деформографом сейсмоакустического сигнала.

При условии цилиндрической расходимости гидроакустической волны давление у берега, которое может зарегистрировать гидрофон, расположенный вблизи деформографа, будет составлять около 29 Па при работе излучателя на ст. 3.

При данном уровне шума (рис. 4) лазерный деформограф может легко обнаружить сигнал в 10 раз меньший по амплитуде, по сравнению с зарегистрированным на ст. 3. В идеале, применяемые методы интерферометрии позволяют измерить сигнал в 100 и более раз меньший по амплитуде. Общеизвестно, что с уменьшением частоты (ниже 30 Гц) потери в сейсмоканале уменьшаются, а в воде увеличиваются. Поэтому применение лазерных деформографов дает значительный выигрыш при регистрации гидроакустических сигналов на частотах ниже 30 Гц по сравнению с гидроакустическими приемниками.

Проведенные эксперименты по возбуждению гидроакустических колебаний низкочастотными излучателями и приему вызванных ими сейсмоакустических колебаний показали, что вся шельфовая область моря вплоть до свала шельфа является районом эффективной генерации сейсмоакустического шума. Высокая эффективность преобразования гидроакустических колебаний в сейсмоакустические заставляет тщательно учитывать вклад антропогенных и природных гидроакустических шумов в наблюдаемый береговыми деформографами фон микродеформаций земной поверхности. Экспериментально доказанная высокая эффективность применения лазерного деформографа как приемника гидроакустических колебаний делает незаменимым применение приборов такого типа для решения прикладных задач гидроакустики. Кроме того, с применением низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых лазерных деформографов могут решаться задачи акустического мониторинга шельфовых районов моря.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Долгих Г.И.* Исследование сейсмоакустических процессов в переходной зоне океан–материк лазерным деформографом равноплечего типа: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Ин-т физ. Земли, 1988.
2. *Давыдов А.В., Долгих Г.И.* Исследование случайных процессов в сейсмоакустике методом длиннобазовой лазерной интерферометрии // Тез. докл. III Всесоюз. конф. "Перспективные методы планирования и анализа экспериментов при исследовании случайных полей и процессов". М.: Наука, 1988. С. 95 - 96.
3. *Давыдов А.В., Долгих Г.И., Запольский А.М., Копвиллем У.Х.* Регистрация гидроакустических колебаний лазерным деформометром // Тез. докл. II межотрасл. акуст. сем. "Модели, алгоритмы, принятие решений". М.: Акуст. ин-т, 1988. С. 122.
4. *Akal Tuncay, Jensen F.B.* Ocean seismo-acoustic propagation // Progr. Congr. Acoust. Assoc. Symp. Underwater Acoust. Halifax. London, 1987. P. 493 - 500.
5. *Гореликов А.И., Давыдов А.В., Долгих Г.И., Запольский А.М., Кабанов Н.Ф., Копвиллем У.Х.* Генерация и прием низкочастотных акустических колебаний // Деп. в ВИНИТИ. 1988. № 3755-В88.
6. *Кабанов Н.Ф.* Способ возбуждения акустических колебаний резонатора с газонаполненной эластичной сферой: решение о выдаче а. с. от 29.10.87 по заявке № 4104683/25-28 от 04.08.86. МКИ4 B06 BI/2011G 10K9100.
7. *Давыдов А.В., Долгих Г.И.* Изучение сейсмоакустических процессов лазерными деформографами // Опт. атм. и океана. 1993. Т. 6. № 7. С. 844 - 857.
8. Отчет о работе в рейсе № 20 НИС "Академик Александр Виноградов" 1991 г. Книга II. Владивосток, 1991.
9. *Свердлин Г.Н.* Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение. 1990. 283 с.
10. *Давыдов А.В., Долгих Г.И.* Акустический мониторинг переходной зоны океан–материк лазерными деформографами // Тр. II Сессии Рос. акуст. об-ва "Акустический мониторинг сред". М.: Акуст. ин-т, 1993. С. 73 - 75.


## Hydroacoustic Applications of Laser Deformographs

**A. V. Davydov, G. I. Dolgikh, and H. F. Kabanov**

The capabilities of a 105-m equal-armed laser deformograph and a 52.5-m nonequal-armed deformograph are examined by recording signals from low-frequency hydroacoustic radiators located in water, at different distances from the shore, in a shelf region and over a slant bottom.