АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 3, с. 358–361

УДК 534

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

© 1998 г. Г. И. Долгих

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

Поступила в редакцию 06.06.95 г.

Приведены экспериментальные результаты, полученные с помощью берегового лазерного деформографа, которые свидетельствуют о существовании модуляции сейсмоакустических сигналов различными низкочастотными процессами при расположении гидроакустического излучателя на шельфе и за свалом глубин.

При проведении первых работ по регистрации лазерным деформографом колебаний, возбуждаемых в воде низкочастотными гидроакустическими излучателями [1] было обнаружено, что принятые сигналы промодулированы более низкочастотными колебаниями. Для изучения потерь на распространение в гидроакустическом и сейсмоакустическом каналах, а также вариаций принимаемых лазерным деформографом сигналов и их зависимости от месторасположения гидроакустического излучателя были выполнены работы по генерации гидроакустических колебаний низкочастотным гидроакустическим излучателем в условиях мелкого и глубокого моря и приему данных колебаний приемной системой береговых лазерных деформографов неравноплечего типа. В таблице приведены данные одного из экспериментов, проведенных в 1993–1994 гг. В ней введены следующие обозначения: R_1 – расстояние от места излучения до лазерного деформографа; R_2 – глубина моря в месте излучения; R_3 – глубина погружения низкочастотного гидроакустического излучателя; P – давление, приведенное к расстоянию 1 м от геометрического центра излучателя; F – частота излучаемого сигнала; $A_и$ – средняя амплитуда сейсмоакустического сигнала, зарегистрированного лазерным деформографом неравноплечего типа с длинной плеча 52.5 м при работе низкочастотного гидроакустического излучателя в режиме непрерывного излучения; k_1 – коэффициент вариации амплитуды сигнала для низкочастотной составляющей модуляции (модуляция с периодом около 3 мин); k_2 – коэффициент вариации амплитуды сигналов для составляющей модуляции в микросейсмическом диапазоне частот (модуляция с периодами 13–18 с). Коэффициент вариации амплитуды принят равным

$$k = \frac{\sqrt{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}}{\langle A \rangle},$$

где A – амплитуда сигнала, $\langle\ \rangle$ означает усреднение.

Станции излучения располагались на значительном удалении от лазерного деформографа по его оси, ориентированной по линии север–юг. Подробное описание и оценка чувствительности лазерного деформографа приведены в [1].

Первые две станции излучения были сделаны на шельфе, а станции № 3 и 4 – за свалом глубин. В месте эксперимента шельф ровный, с небольшим уклоном, примерно равным 5 м/км. В качестве низкочастотного гидроакустического излучателя использовался электромагнитный источник гидроакустических колебаний ГЗО, подробно описанный в [2]. Работы проводились с НИС "Гидронавт". Излучатель был опущен с кормовой части судна на кабель-тросе. В местах расположения станций излучения дрейф судна в процессе работы на всех станциях практически отсутствовал. В начальной стадии эксперимента (ст. № 1) скорость ветра составляла 5 м/с, волнение – 1–3 бал-

Таблица

№ ст.	R_1, Км	R_2, м	R_{32}, м	P, кПа	F, Гц	$A_И$, нм	k_1	k_2
1	16	71	31	2.3	32	1.77	0.21	0.10
2	25	106	31	1.9	32	0.51	0.19	0.11
3	34	1300	31	1.9	32	0.61	0.07	0.13
4	43	2131	31	1.75	32	0.52	0.06	0.15

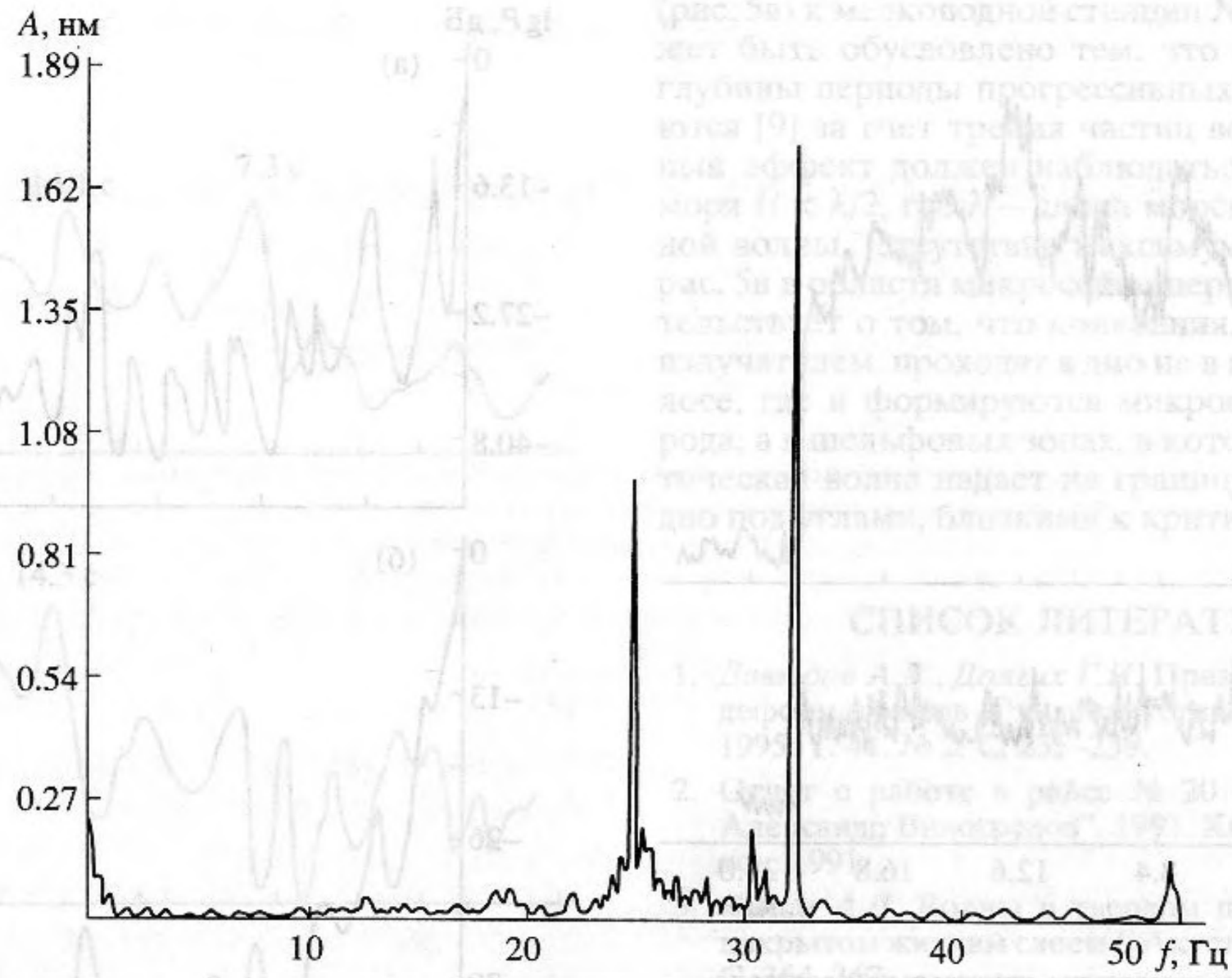

Рис. 1. Спектр, полученный при обработке данных лазерного деформографа во время работы излучателя в непрерывном режиме на станции № 1.

ла. К концу эксперимента (ст. № 4) волнение усилилось.

Длительность излучения в непрерывном режиме на каждой станции составляла 15 мин. Для всех станций излучения были получены динамические спектры принимаемых деформографом сигналов методом БПФ с применением линейного тренда, 4-х членного окна Блэкмана–Хэрриса, усреднения трех последовательных спектров с 50% перекрытием. По этим спектрам определялись вариации амплитуды принятых деформографом сигналов.

На рис. 1 приведен спектр, полученный при обработке записи лазерного деформографа во время работы гидроакустического излучателя на станции № 1. Сигнал на частоте 24 Гц обусловлен собственными шумами установки, а сигнал на частоте 32.0 Гц – работой излучателя.

Как показано в [3–5], основной вклад в микросмещения бызы деформографа, вызванные работой гидроакустического излучателя на шельфе, вносят поверхностные волны рэлеевского типа, обладающие цилиндрической расходимостью.

Из приведенных на рис. 2 временны́х зависимостей амплитуды сигналов видно, что при работе излучателя на мелководной станции № 1 (рис. 2а) амплитуда сигнала на частоте 32 Гц меняется с периодом примерно 3 мин. Амплитуда этих вариаций достигает величины 0.4 нм. При работе излучателя на глубоководной станции № 4 (рис. 2б) амплитуда принимаемых лазерным деформографом сигналов от излучателя не подвержена низкочастотным изменениям, но испытывает вариации с периодом 13–15 с, который характерен для прогрессивных морских поверхностных волн данного региона [6, 7]. Вариации примерно с такими же периодами видны и на рис. 2а для мелководной станции № 1.

Наблюдаемая низкочастотная модуляция амплитуды принятого лазерным деформографом сигнала на первой станции может быть связана с существованием в области шельфа устойчивых низкочастотных колебаний соответствующего периода, вызванных внутренними волнами зоны расположения излучателя [8], что подтверждается наличием в спектрах принятых лазерным деформографом сигналов пика на частоте 5.9 мГц, соответствующего периоду 2.8 мин (рис. 3а). Пик на такой же частоте присутствует и в спектре огибающей, приведенном на рис. 3б. Колебания с такими периодами характерны для внутренних волн мелководного региона шельфа и находятся близко к граничной частоте Брента–Вяйсяля зоны расположения излучателя (рис. 4, данные по рис. 4 взяты из работы [8]). Внутренние морские волны вызывают вариации давления в зоне их распространения. Эти вариации приводят к тому, что для излучателя внешние параметры среды изменяются. С учетом того, что амплитуда излучаемого

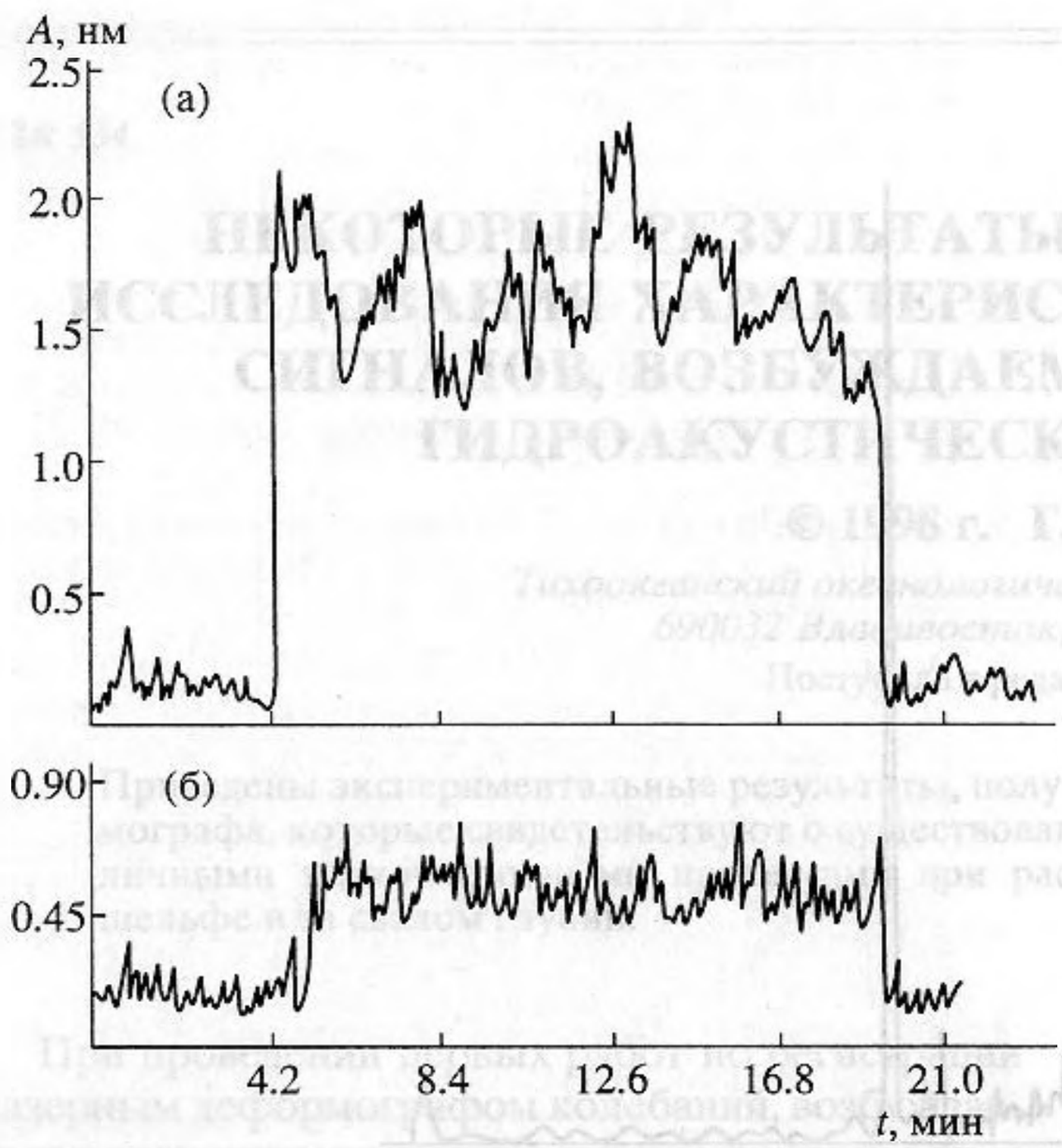

Рис. 2. Вариации амплитуды спектральной составляющей на частоте 32 Гц на участках до, во время и после работы излучателя на станциях № 1 (а) и № 4 (б).

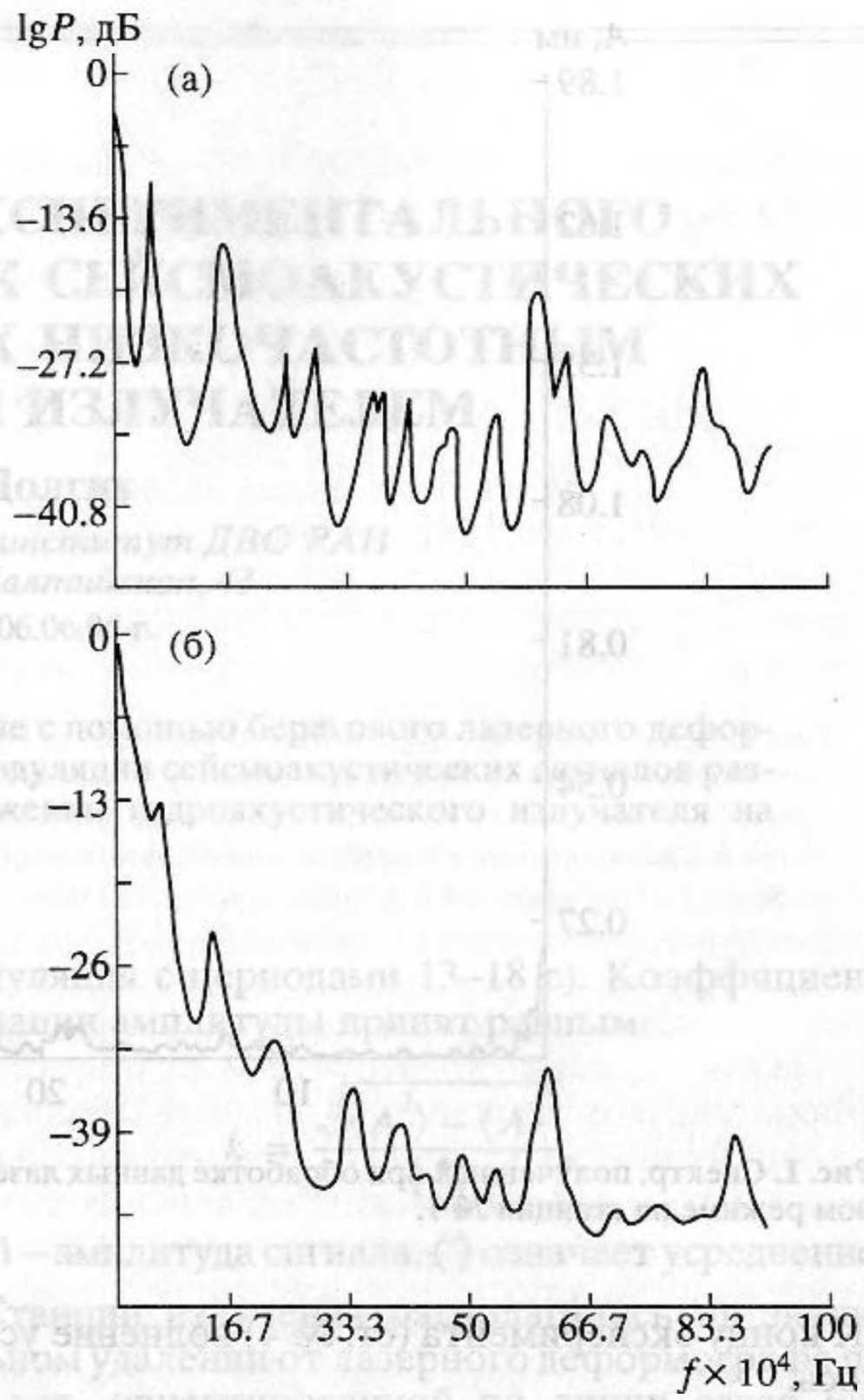

Рис. 3. Низкочастотные спектры выходного эффекта деформографа (а) и вариаций огибающей сигнала частоты 32 Гц, принятого деформографом при излучении на станции № 1 (б).

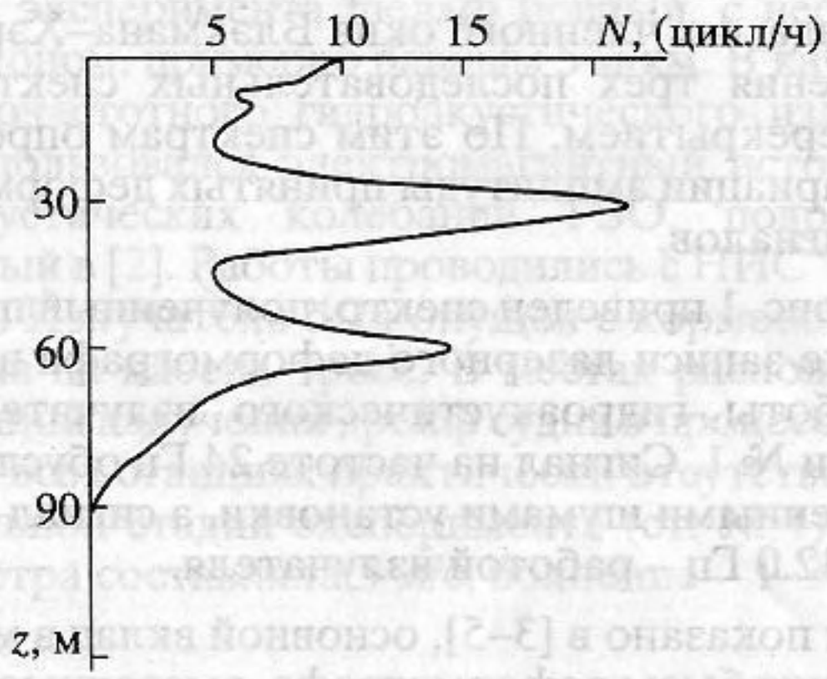

Рис. 4. Вертикальные профили частоты Брента–Вяйсяля.

сигнала зависит от величины внешнего давления, вышеуказанные вариации могут вызывать наблюдаемую низкочастотную модуляцию.

На рис. 5 приведены результаты спектральной обработки в микросейсмическом диапазоне частот выходного эффекта деформографа (рис. 5а) и вариаций амплитуды сигнала частоты 32 Гц, принятого лазерным деформографом при излучении соответственно на станции № 1 и № 4. При сравнении рис. 5а, рис. 5б и рис. 5в проявляется нижеследующее: 1) на рис. 5а отчетливо выделяются максимумы в области микросейсм первого и второго рода с периодами примерно равными 7.3 и 14.1 с соответственно; 2) на рис. 5б и рис. 5в нет отчетливого максимума в области микросейсм первого рода; 3) на всех рассматриваемых рисунках присутствует ярко выраженный максимум в области микросейсм второго рода.

Одной из возможных причин возникновения амплитудной модуляции сигналов на частотах микросейсмического диапазона является поверхностное волнение, которое приводит к вертикальным перемещениям излучателя и вариациям амплитуды излучаемого сигнала. Гидроакустическая волна, взаимодействуя с дном под углами, близкими к критическим, трансформируется в сейсмоакустическую, которую и регистрирует лазерный деформограф. Поэтому пик с периодом 14.8 с на рис. 5в обусловлен прогрессивными морскими волнами в зоне расположения станции № 4, а пик с периодом 14.3 с на рис. 5б обусловлен прогрессивными морскими волнами в зоне расположения станции № 1. Это предположение подтверждается и тем, что коэффициент вариации амплитуды в микросейсмическом диапазоне возрастает к 4-й стан-

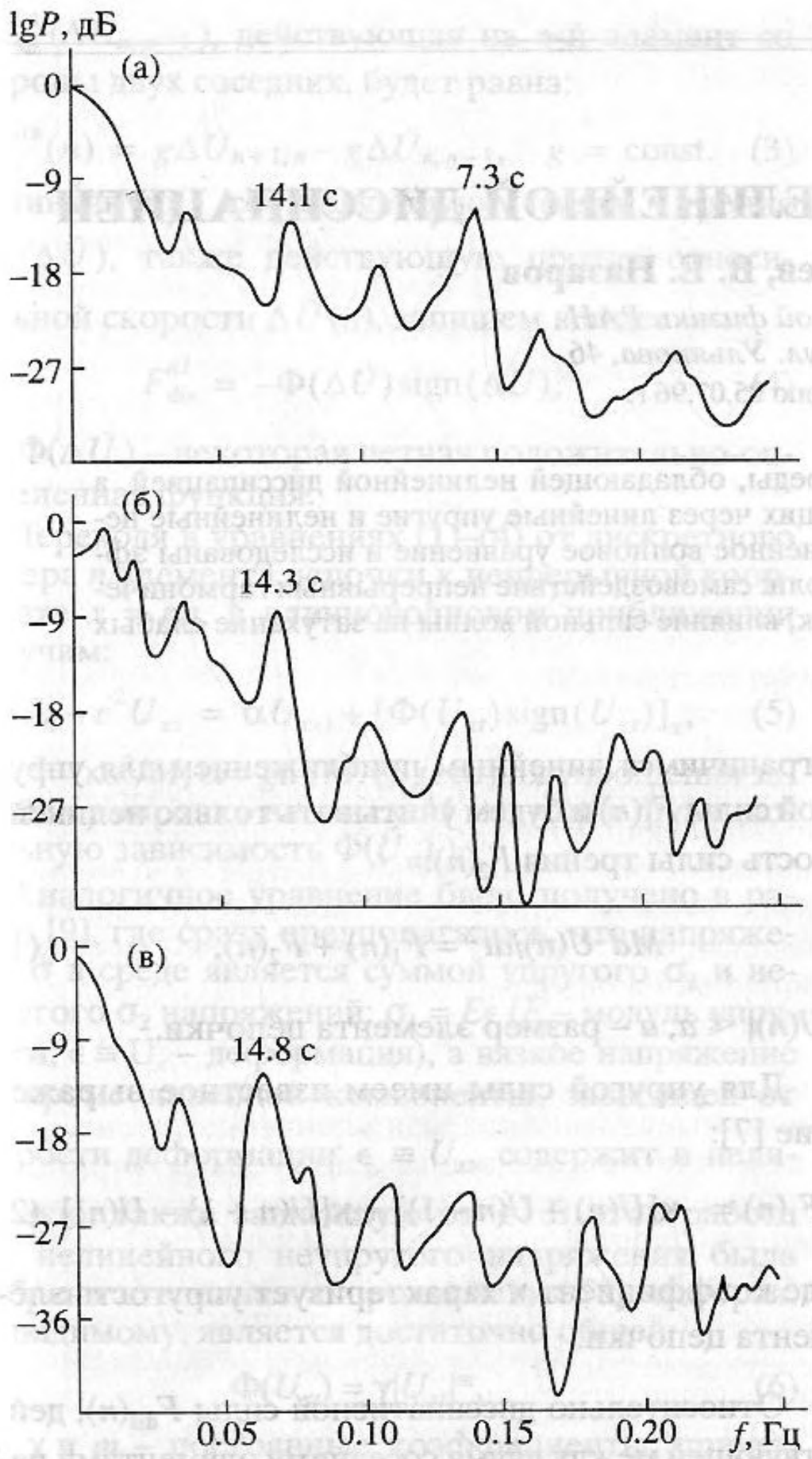

Рис. 5. Спектры микросейсмического диапазона выходного эффекта лазерного деформографа (а) и вариаций огибающей сигналов частоты 32 Гц, принятых деформографом при излучении на станциях № 1 (б) и № 4 (в).

ции в связи с усилившимся к этому времени волнением.

Некоторое уменьшение периода модуляции в области микросейсм второго рода, наблюдавшееся при переходе от глубоководной станции № 4 (рис. 5в) к мелководной станции № 1 (рис. 5б), может быть обусловлено тем, что с уменьшением глубины периоды прогрессивных волн уменьшаются [9] за счет трения частиц воды о дно. Данный эффект должен наблюдаться при глубинах моря $H < \lambda/2$, где λ – длина морской прогрессивной волны. Отсутствие максимумов на рис. 5б и рис. 5в в области микросейсм первого рода свидетельствует о том, что колебания, возбуждаемые излучателем, проходят в дно не в прибрежной полосе, где и формируются микросейсмы первого рода, а в шельфовых зонах, в которых гидроакустическая волна падает на границу раздела вода–дно под углами, близкими к критическим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давыдов А.В., Долгих Г.И.* Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 235–239.
2. Отчет о работе в рейсе № 20 НИС "Академик Александр Виноградов". 1991. Книга II. Владивосток. 1991.
3. *Лапин А.Д.* Волны в твердом полупространстве, покрытом жидким слоем // Акуст. журн. Т. 38. № 2. С. 364–367.
4. *Miller G.P., Pursey H.* The field and radiation impedace of mechanical radiators in the free surface of a semi-infinite isotropic sokid // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1954. V. 223. № 1155. P. 521–541.
5. *Гущин В.В., Докучаев В.П., Заславский Ю.М., Конюхов И.Д.* О распределении мощности между различными типами излучаемых волн в полубезграничной упругой среде // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 113–118.
6. *Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н.* Регистрация оптическим деформографом взаимодействия тропических циклов с океаном посредством сейсмического канала // В кн. "Тропическая метеорология". Л.: Гидрометеоиздат, 1981. С. 231–235.
7. *Долгих Г.И., Копвиллем У.Х., Павлов А.Н., Лысун В.Н.* Регистрация микросейсм лазерным измерителем деформаций // Тез. докл. Всес. Совещ. "Сейсмичность и сейсмостойкое строительство на Дальнем Востоке". Владивосток, 1982. С. 134–136.
8. *Навроцкий В.В.* Взаимодействие внутренних волн и тонкой структуры в океане // Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Владивосток, 1988.
9. *Монахов Ф.И.* Низкочастотный сейсмический шум Земли. М.: Наука, 1977. 95 с.

Experimental Investigations of Seismoacoustic Signals Excited by a Low-frequency Hydroacoustic Source

G. I. Dolgikh

Experimental results obtained with a coast-based laser deformograph are presented. They reveal that, when a hydroacoustic source is located on the shelf or behind the slope, the seismoacoustic signals are modulated by various low-frequency processes.