АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2005, том 51, № 5, с. 628–632

УДК 534

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКУЮ ВОЛНУ

© 2005 г. Г. И. Долгих, В. А. Чупин

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43
E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 05.05.04 г.

На основе экспериментальных данных, полученных с помощью лазерного деформографа неравноплечего типа с длиной плеча 52.5 м при работе в условиях "глубокого" и "мелкого" моря низкочастотного гидроакустического излучателя, проводится оценка отношения потока энергии в волне Рэлея к излучаемой акустической мощности гидроакустического излучателя.

При регистрации береговыми лазерными деформографами колебаний, возбуждаемых в воде низкочастотными гидроакустическими излучателями [1], показана перспективность использования лазерных деформографов при изучении некоторых закономерностей в поведении сейсмоакустических и гидроакустических колебаний и волн на границе "гидросфера-литосфера" [2]. На базе ТОИ ДВО РАН МЭС "Шульц" установлен стационарный 52.5-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа, расположенный на глубине 5–7 м от поверхности земли и ориентированный по линии север-юг. Интерференционные узлы с частотно-стабилизированным лазером, коллиматором, оптическим затвором (диафрагма, поляроид, пластина $\lambda/4$) лазерного деформографа расположены в термоизолированном помещении. Уголковые отражатели установлены в отдельных термоизолированных камерах. Весь путь луча лазера между отражателем и интерференционным узлом расположен в световоде из труб из нержавеющей стали.

На рис. 1 приведена блок-схема системы регистрации лазерного деформографа. Для управле-

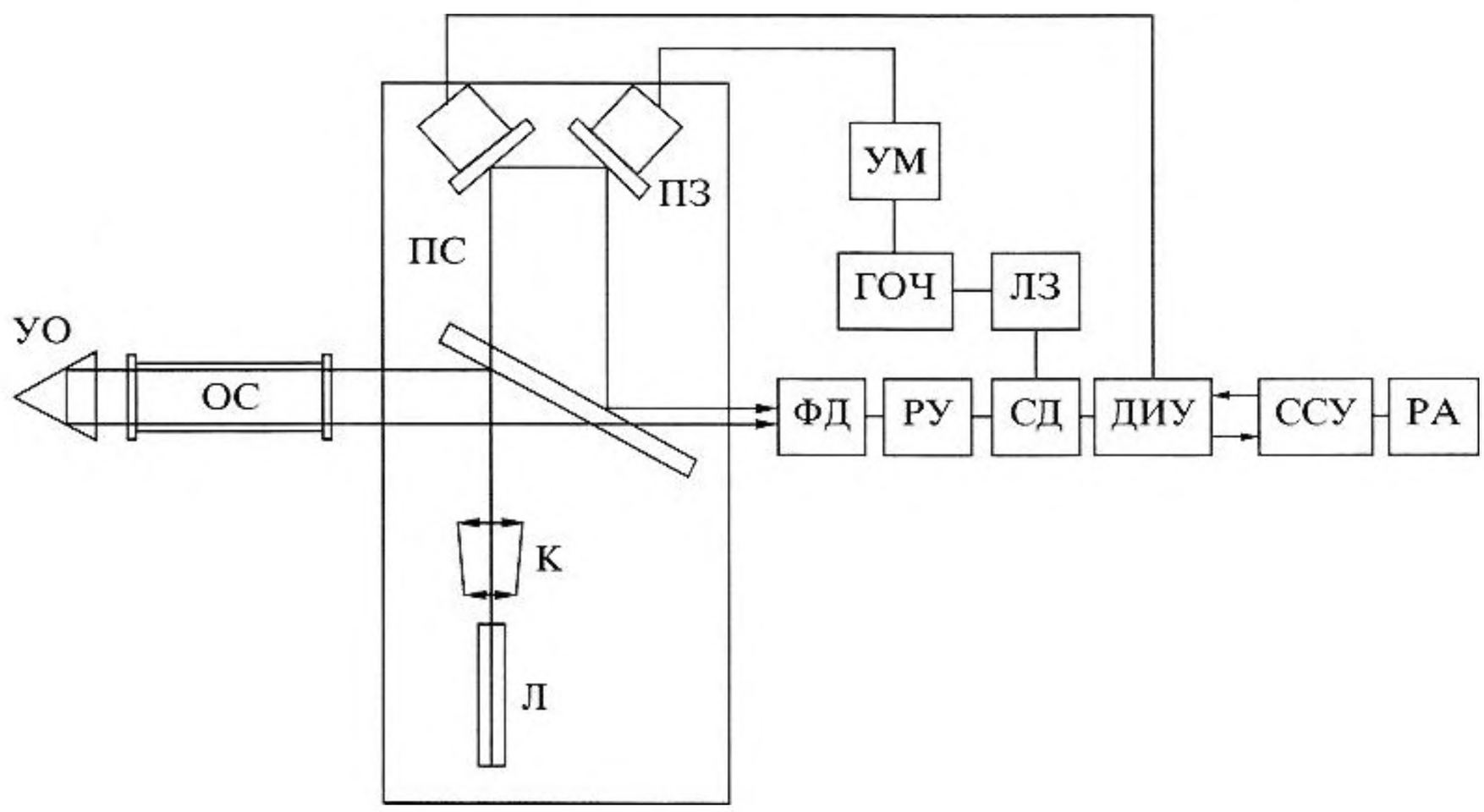

Рис. 1. Оптическая схема лазерного деформографа с блок-схемой системы регистрации: УО – уголковый отражатель; ОС – оптический световод; ПЗ – зеркала на пьезокерамике; ПС – плоскопараллельная стеклянная пластина; К – коллиматор; Л – He–Ne частотностабилизированный лазер; Д – фотодиод; РУ – резонансный усилитель; СД – синхронный детектор; ДИУ – дифференциальный интегральный усилитель; ССУ – система сброса уровней; УМ – усилитель мощности; ГОЧ – генератор опорной частоты; ЛЗ – линия задержки; РА – регистрирующая аппаратура.

ния интерферометром лазерного деформографа генератором опорной частоты (ГОЧ) вырабатывается электрический сигнал с частотой 25 кГц, амплитудой 5 В, скважинностью 2, который преобразуется в синусоидальный и усиливается усилителем мощности (УМ) для управления пьезокерамикой, изменяющей длину одного из плеч интерферометра на $0.1\lambda/2$ (λ – длина волны гелий-неонового лазера, равная 0.63×10^{-6} м). Это приводит к модуляции интенсивности интерференционной картины, падающей на фотодиод (ФД), с которого сигнал поступает на резонансный усилитель (РУ), обеспечивающий усиление в 10^4 раз на частоте 25 кГц при полосе пропускания 6 кГц. РУ выполнен в виде отдельного блока и расположен на оптической скамье. РУ выдает сигнал, пропорциональный изменению разности длин плеч интерферометра. Далее сигнал поступает на синхронный детектор (СД), на второй вход которого поступает опорный сигнал, задержанный линией задержки (ЛЗ). ЛЗ используется для компенсации временнóй задержки сигнала, проходящего через интерферометр. Она позволяет изменять фазу выходного сигнала на $\pm\pi/2$ относительно входного. СД выдает сигнал ±1 В, пропорциональный фазе входного сигнала. Далее сигнал попадает на дифференциальный интегральный усилитель (ДИУ). ДИУ вырабатывает сигнал ±130 В, управляющий второй пьезокерамикой, которая, смещая зеркало интерференционного узла, уравнивает разность плеч интерферометра в пределах $\pm\lambda/2$. Для отработки деформации, превышающей изменение $\Delta L = \pm\lambda/2$, предназначена схема сброса уровней (ССУ). ССУ сравнивает разность напряжений с выхода ДИУ с внутренним опорным ($U_{оп}$) и при достижении напряжения ДИУ $\pm U_{оп}$, что соответствует изменению $\Delta L = \pm\lambda/2$, вырабатывается импульс сброса, который обеспечивает сброс управляющих напряжений на выходе ДИУ от $U_{max} = \pm U_{оп}$ до $U = 0$ В в течение 1 мс. Это соответствует тому, что интерференционная картина с одного минимума перескакивает на другой, соседний. $U_{max} = +U_{оп}$ соответствует растяжению базы деформографа на $\lambda/2$, а $U_{max} = -U_{оп}$ – сжатию базы деформографа на $\lambda/2$. Система регистрации (СР) отрабатывает изменение базы деформографа с точностью $10^{-4}\lambda/2$ в диапазоне частот 0–1000 Гц. С аналогового выхода СР вырабатывает напряжение $U_{вых} = \pm5$ В, пропорциональное действию деформации $\Delta L = \pm\lambda/2$. С импульсного выхода СР вырабатывает импульс сброса (Uc^+ и Uc^-), сумма которых определяет сдвиг деформации в целых числах $\lambda/2$.

Таким образом, лазерный деформограф измеряет изменение "плеча" деформографа между интерференционным узлом и отражателем, установленных на отдельных фундаментах. Длина "плеча" деформографа равна 52.5 м. При этом деформограф обладает следующими характеристиками: чувствительность – 10^{-10}–10^{-11} ($\Delta L/L$, где ΔL – смещение базы деформографа, ΔL – длина деформографа, 52.5 м), точность измерения микроперемещений – 10^{-9}–10^{-10} м, рабочий диапазон частот – 0–1000 Гц, динамический диапазон неограничен.

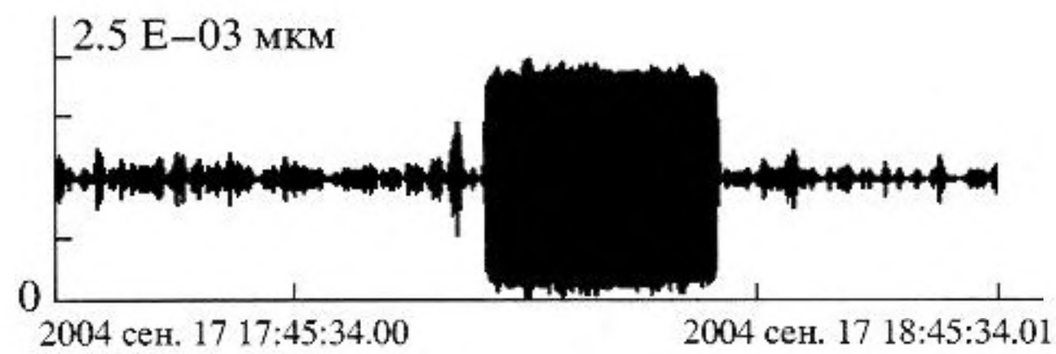

Рис. 2. Отфильтрованный участок записи лазерного деформографа при работе низкочастотного гидроакустического излучателя на частоте 32.6 Гц.

При изучении закономерностей в поведении сейсмоакустических и гидроакустических колебаний и волн на границе "гидросфера-литосфера", важное значение принимает знание о количестве гидроакустической энергии, преобразованной в сейсмоакустическую и принятую лазерным деформографом. На протяжении многих лет в Японском море и на его берегу проводятся комплексные эксперименты по возбуждению гидроакустических колебаний низкочастотным излучателем и приему вызванных им сейсмоакустических колебаний береговым лазерным деформографом. Основной вывод всех экспериментов: перспективность использования берегового лазерного деформографа при изучении закономерностей генерации, динамики и трансформации гидроакустических колебаний и волн на границе "гидросфера-литосфера". При этом необходимо отметить уверенную регистрацию лазерным деформографом сейсмоакустических колебаний, вызванных работой низкочастотных гидроакустических излучателей даже небольшой мощности на "мелкой" и "глубокой" воде. В качестве одного из примеров (рис. 2, 3) приведена отфильтрованная полосовым фильтром запись лазерного деформографа и ее спектр. Полосовой фильтр брался со следующими характеристиками: частоты среза – 32.5 и 32.7 Гц, длина – 12000, окно Хэмминга. На рис. 3 приведен участок спектра нефильтрованной записи лазерного деформографа при работе низкочастотного гидроакустического излучателя. Максимум на частоте около 22 Гц обусловлен одним из резонансов установки "лазерный деформограф". Данный эксперимент был проведен в 2004 г. в б. Витязь. Глубина погружения излучате-

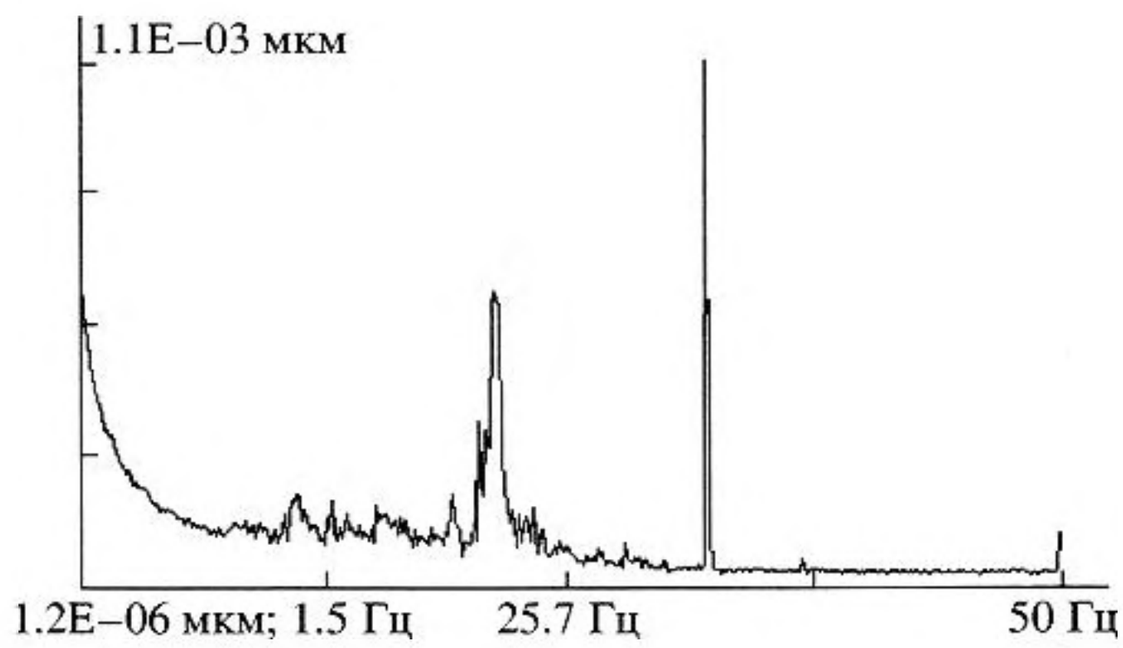

Рис. 3. Спектр участка записи лазерного деформографа при работе гидроакустического излучателя на частоте 32.6 Гц.

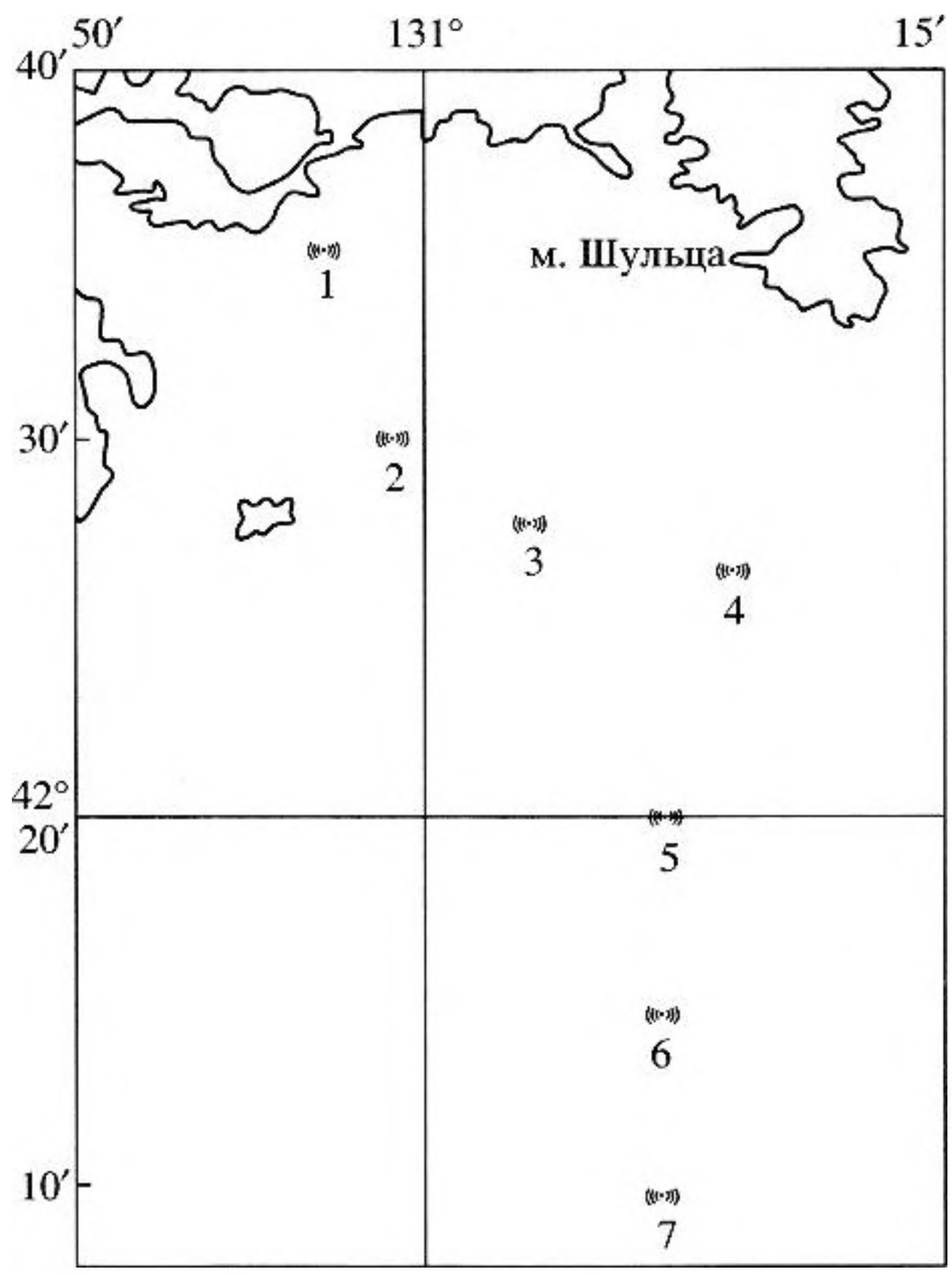

Рис. 4. Расположение станций гидроакустического излучения: (((_))) – номер станции.

ля составляла 12 м при глубине моря 12.6 м, расстояние до деформографа 1.5 км. Давление, приведенное к расстоянию 1 м от геометрического центра излучателя, равно 1.25 кПа.

Мы считаем, что распределение поля давления, вызванное работой низкочастотного излучателя в гидросфере, подчиняется тем же условиям, что и работа точечного источника излучения в упругой среде [3]. В [3] приведены выражения для волн сжатия, сдвига и Рэлея. Распределение энергетического баланса в этом случае будет выглядеть так:

$$W_l \approx 0.0852\frac{\omega^2 P^2}{\pi\rho c_l^3}; \quad W_t \approx 0.2993\frac{\omega^2 P^2}{\pi\rho c_l^3};$$

$$W_r \approx 0.822\frac{\omega^2 P^2}{\pi\rho c_l^3};$$

где: P – амплитуда полной вертикальной силы, c_l – скорость продольной волны в дне, ρ – плотность воды, W_l – мощность излучения в продольной волне, W_t – мощность излучения в поперечной волне, W_r – мощность излучения в волне Рэлея, ω – циклическая частота.

Исходя из этого распределения энергетического баланса для точечного источника излучения, можно судить о преобладании мощности излучения в волне Релея по отношению к другим типам упругих волн в рамках данного эксперимента. Поэтому в дальнейшем все расчеты будем делать, предполагая доминирующий вклад волны Рэлея в записи деформографа.

В данной работе по экспериментальным данным, частично опубликованным в [2], оценим отношение потока энергии в волне Рэлея к излученной акустической мощности. Расположение станций излучения в этом эксперименте приведено на рис. 4. Экспериментальные данные [4] приведены в таблице. Оценки проведем для экспериментальных данных, полученных на станциях № 6 и № 7, которые удовлетворяют условиям глубокого моря ($H \gg \lambda$, где: H – глубина моря в месте расположения станции излучения, λ – длина волны возбужденных гидроакустических колебаний).

Как показано в работе [5], при малом заглублении излучателя h, его поле соответствует полю диполя и амплитуда звукового давления тем меньше, чем меньше h. В соответствии с [5] запишем мощность приповерхностного источника в виде:

$$P_a = \frac{4\pi P_m^2}{\rho c}\left(1 - \frac{\sin(4\pi h/\lambda)}{4\pi h/\lambda}\right), \qquad (1)$$

где: P_m – эффективное акустическое давление, приведенное к расстоянию 1 м от геометрического центра источника, λ – длина акустической волны в воде, c – скорость звука в воде.

Из [6], имея суммарную плотность потока энергии переносимого поверхностной акустической волной Рэлея $E(z)$, выразим коэффициент А через амплитуду $U_x(0)$ горизонтальной компонен-

ты смещения, измеренной лазерным деформографом:

$$U_x(z) = Ak_r\left[\exp(-q_r z) - \frac{2q_r s_r}{k_r^2 + s_r^2}\exp(-s_r z)\right],$$

где: A – коэффициент, вычисляемый по измеренной амплитуде волны Рэлея на поверхности в точке наблюдения;

k_r – волновое число волны Рэлея;

k_l – волновое число продольной волны;

k_t – волновое число поперечной волны;

$q_r = \sqrt{k_r^2 - k_l^2}$, $s_r = \sqrt{k_r^2 - k_t^2}$.

На поверхности ($z = 0$) это нам дает:

$$A = \frac{U_x(0)(k_r^2 + s_r^2)}{k_r(k_r^2 + s_r^2 - 2q_r s_r)}.$$

Плотность потока энергии в волне Рэлея равна $E(z)c_r$ [7]. Следовательно, для полного потока энергии Φ_r имеем следующее выражение:

$$\Phi_r = c_r\int_0^\infty 2\pi R E(z)dz =$$

$$= \frac{A^2\rho\omega^4 c_t^2}{2c_r^4}\left(\frac{A_1(\nu)}{2q_r} - \frac{A_2(\nu)}{q_r + s_r} + \frac{A_3(\nu)}{2s_r}\right)2\pi R c_r,$$

где:

$$A_1(\nu) = 4 + \eta_r^2 - 4\eta_r^2\xi^2,$$

$$A_2(\nu) = \frac{2\sqrt{1-\eta_r^2\xi^2}(\sqrt{1-\eta_r^2} + \sqrt{1-\eta_r^2\xi^2})(2 + \eta_r^2 + 2\sqrt{1-\eta_r^2}\sqrt{1-\eta_r^2\xi^2})}{2-\eta_r^2},$$

$$A_3(\nu) = \frac{4(1-\eta_r^2\xi^2)(4-3\eta_r^2)}{(2-\eta_r^2)^2},$$

$$\eta_r = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1+\nu},$$

$$\xi = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}},$$

c_r – скорость волны Рэлея,

c_t – скорость поперечной волны в дне,

ν – коэффициент Пуассона.

Выражая A через $U_x(0)$, получим:

$$\Phi_r = \left[\frac{A_1(\nu)}{2q_r} - \frac{A_2(\nu)}{q_r + s_r} + \frac{A_3(\nu)}{2s_r}\right]\times$$

$$\times\frac{(k_r^2 + s_r^2)^2 U_x^2(0)c_r}{k_r^2(k_r^2 + s_r^2 - 2q_r s_r)^2}\frac{\rho\omega^4 c_t^2}{2c_r^4}2\pi R.$$

Формулу можно привести к виду, более удобному для анализа, используя обозначения для уравнения Рэлея в полиномной форме: $\eta = k_t/k_r = c_r/c_t$; $\xi = k_l/k_t = c_t/c_l$. При этом:

$$\Phi_r = \pi R\rho U_x^2(0)\omega c_t^2\times$$

$$\times\left[\frac{A_1(\nu)}{2\sqrt{1-\eta_r^2\xi^2}} - \frac{A_2(\nu)}{\sqrt{1-\eta_r^2\xi^2} + \sqrt{1-\eta_r^2}} + \frac{A_3(\nu)}{2\sqrt{1-\eta_r^2}}\right]\times \quad (2)$$

$$\times\left(\frac{2-\eta_r^2}{2-\eta_r^2 - 2\sqrt{1-\eta_r^2\xi^2}\sqrt{1-\eta_r^2}}\right)^2.$$

Используя выражения (1) и (2), найдем отношение потока энергии в волне Рэлея Φ_r к излученной акустической мощности приповерхностного источника P_a для станций № 6 и № 7. В районе проведения эксперимента были взяты и проанализированы пробы грунта. В соответствии с анализом были приняты следующие значения упругих постоянных для расчета волны Рэлея: коэффициент Пуассона – 0.3; скорость поперечных

Данные эксперимента 1995 г.

№ станции	R, км	H, м	h, м	F, Гц	P_m, кПа	A_1, нм
1	16	34	31	32	1.87	0.23
2	16	35	31	32	2.3	0.30
3	16	53	31	32	1.9	0.29
4	16	71	31	32	2.3	1.77
5	25	106	31	32	1.9	0.51
6	34	1300	31	32	1.9	0.61
7	43	2131	31	32	1.75	0.52

Примечание. R – расстояние от места излучения до лазерного деформографа; H – глубина моря в месте излучения; h – глубина погружения низкочастотного гидроакустического излучателя; P – давление, приведенное к расстоянию 1 м от геометрического центра излучателя; F – частота излучаемого сигнала; A_1 – средняя амплитуда сейсмоакустического сигнала, зарегистрированного лазерным деформографом неравноплечевого типа с длиной плеча 52.5 м при работе низкочастотного гидроакустического излучателя в режиме непрерывного излучения.

волн – 3400 м/с, плотность пород дна – 2600 кг/м^3. Тогда, при учете экспериментальных данных табл. 1, имеем:

$$\text{для станции № 6 } \frac{\Phi_r}{P_a} = 9.89 \times 10^{-3},$$

$$\text{для станции № 7 } \frac{\Phi_r}{P_a} = 11.07 \times 10^{-3}.$$

Из вышеприведенных оценок следует, что около 1% излученной акустической энергии гидроакустическим излучателем трансформируется в энергию упругих волн Рэлея.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 03-05-65216а, 04-05-79089к) и ФЦП “Мировой океан”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давыдов А.В., Долгих Г.И., Кабанов Н.Ф.* Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 235–239.
2. *Долгих Г.И.* Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным гидроакустическим излучателем // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 3. С. 358–361.
3. *Гущин В.В., Докучаев В.П., Заславский Ю.М., Конюхова И.Д.* О распределении мощности между различными типами излучаемых волн в полубезграничной упругой среде. – В кн.: Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками / М.: Наука. 1981. С. 113–118.
4. *Долгих Г.И.* Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами. Владивосток: Дальнаука, 2000. 160 с.
5. *Свердлин Г.М.* Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. 320 с.
6. *Викторов И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
7. *Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А.* Колебания и волны. Лекции. М.: Изд-во физ. фак. МГУ, 2001. 144 с.

Experimental Estimate for the Transformation of Underwater Acoustic Radiation into a Seismoacoustic Wave

G. I. Dolgikh and V. A. Chupin

Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Division, Russian Academy of Sciences, ul. Baltiĭskaya 43, Vladivostok, 690041 Russia

e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

Abstract—On the basis of experimental data obtained from a nonequal-armed laser deformograph with an arm length of 52.5 m in the presence of a low-frequency hydroacoustic source operating in a deep sea and in a shallow sea, an estimate is obtained for the ratio of the energy flux in the Rayleigh wave to the acoustic power emitted by the hydroacoustic source.