АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 36 1990 Вып. 6

УДК 534.24

© 1990 г.

А. В. Ефимов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ ЗВУКА В ОСАДКАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О КАУСТИКЕ ПЕРЕИЗЛУЧЕННЫХ ДНОМ СИГНАЛОВ

Предложен метод определения коэффициента затухания звука в осадках для низких частот. Он основан на измерении коэффициента отражения сферической волны от дна для двух частот в месте расположения первой каустики. Приведено выражение для определения коэффициента затухания, причем все необходимые параметры, входящие в это выражение, определяются из геометрии эксперимента. Используя экспериментальные данные о потерях при отражении от дна, дана оценка величины коэффициента затухания.

Для определения коэффициента затухания звука в осадках предложены различные методы, имеющие свои отличительные черты [1, 2]. В [1] предложен метод, основанный на интерференции в точке приема водного луча и донного луча, прошедшего слой осадков и отраженного от скального основания. При этом считается, что вклад луча, отраженного от границы раздела вода — осадки, в суммарное поле в точке приема мал. Для этого необходимо выполнение следующего условия: $|V_0| \ll |V_1| \exp(-\beta L)$, где V_0 и V_1 — коэффициенты отражения от границы раздела вода — осадки и скального основания соответственно, β — коэффициент затухания, L — длина пути луча в осадках. Таким образом, данный метод эффективен для не очень толстого слоя осадков при условии, что луч падает на основание под углами скольжения, меньшими угла полного внутреннего отражения. Отметим также, что этот метод требует использования тонального источника излучения.

Исходя из анализа амплитудных характеристик интерференционных и автокорреляционных картин принимаемого сигнала, образованного водным и донным (или рефрагированным) лучами, в [2] получены аналогичные оценки затухания звука в осадках. Преимуществом этого подхода является использование широкополосного сигнала, а также возможность использования для анализа картин рефрагированного в осадках луча.

Описанные методы работоспособны при условии, что измерение поля проводится вдали от каустики, образованной рефрагированными в дне лучами, или если точка R с координатами $\{r, z_0\}$ (r — горизонтальное расстояние от точки излучения до точки приема, z_0 — сумма глубин источника и приемника до дна) находится в зоне Фраунгофера относительно объема дна, ответственного за формирование отраженного поля. Для низкочастотных сигналов это условие может нарушаться и при их отражении от дна в области каустик может наблюдаться превышение коэффициента отражения сферической волны (нормированной амплитуды) над единицей (см., например, [3, 4]). На основании информации о положении каустики можно вычислить градиент скорости звука dc/dz в дне и показатель преломления скорости звука n_0 на границе раздела вода — дно [5]. Кроме этого, как будет показано ниже, зная модуль и фазу нормированной амплитуды в месте расположения первой каустики, можно определить коэффициент затухания звука в осадках.

Примем модель дна, для которой показатель преломления звука имеет вид $n(z)=n_0/(1+az)$, $z \geqslant 0$, а плотность постоянна. При этом поле отра-

женной сферической волны и нормированная амплитуда имеют вид [6]

$$p=p_0+\sum_{l=1}^{\infty}p_l, \tag{1}$$

$$V=V_0+\sum_{l=1}^{\infty}p_l/p_и, \tag{2}$$

где $p_0=V_0p_и$, $p_и=\exp(ik_0R)/R$. Слагаемые p_l описывают поле рефрагированных волн [6]:

$$p_l=\frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2\pi r}}\int_{-\infty}^{\infty}A_l(\xi)e^{iw_l(\xi)}\frac{\sqrt{\xi}\,d\xi}{\sqrt{k_0^2-\xi^2}}, \tag{3}$$

где $w_l=\xi r+\sqrt{k_0^2-\xi^2}z_0+l\varphi'$, $\xi=k_0\sin\theta$, θ — угол падения волны на дно, $A_l=(1-V_0^2)(-V_0)^{l-1}e^{-il\varphi''}$.
Здесь

$$\varphi'=\frac{2k_0}{a}\left(n_0\ln\frac{n_0+\sqrt{n_0^2-\sin^2\theta}}{\sin\theta}-\sqrt{n_0^2-\sin^2\theta}\right)-\frac{\pi}{2},$$

$$\varphi''=\frac{2k_0}{a}\alpha n_0\ln\frac{n_0+\sqrt{n_0^2-\sin^2\theta}}{\sin\theta},$$

α — тангенс угла потерь, $0<\alpha\ll1$.

Частотную зависимость поля p_l на каустике с номером l нетрудно получить из (3) (см. также [7]):

$$p_l=C_lk_0^{1/6}\exp(-l\varphi''+iw_l+i\pi/4), \tag{4}$$

где $C_l(\theta)$ — некоторая функция угла, не зависящая от частоты.

Угол зеркального отражения θ_{0l}, при котором наблюдается каустика, определяется из следующей системы уравнений:

$$\frac{dw_l}{d\xi}=0,\quad \frac{d^2w_l}{d\xi^2}=0,$$

которая принимает вид

$$\begin{cases} r_l=z_0\operatorname{tg}\theta+\dfrac{2l\sqrt{n_0^2-\sin^2\theta}}{a\sin\theta}, \\ z_0=\dfrac{2\ln_0^2\cos^3\theta}{a\sin\theta\sqrt{n_0^2-\sin^2\theta}}. \end{cases} \tag{5}$$

Разрешая эту систему относительно величины $\operatorname{tg}\theta_{0l}=r_l/z_0$, получаем

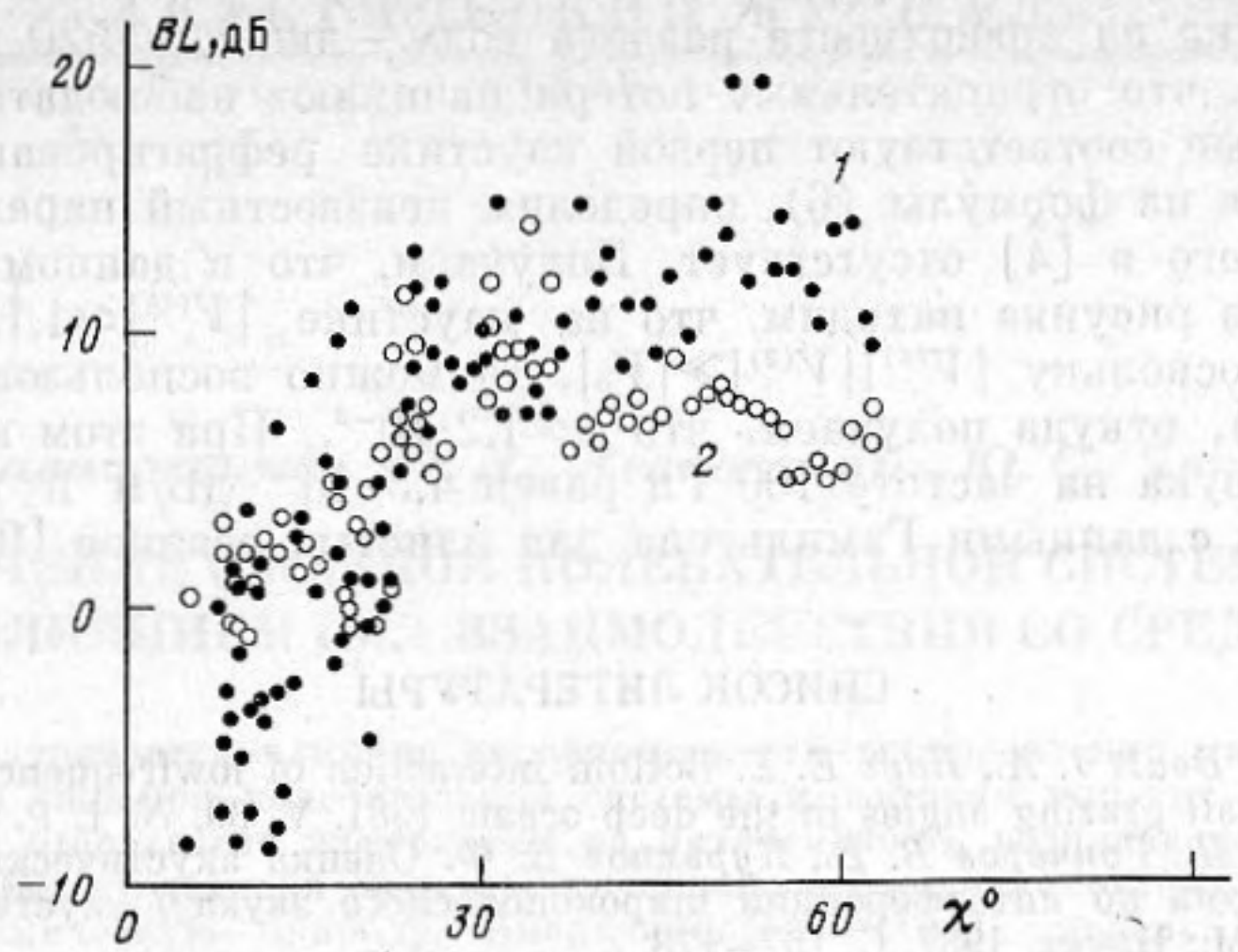
$$\operatorname{tg}\theta_{0l}=2n_0\sqrt{\frac{2l}{az_0}}. \tag{6}$$

Заметим, что угол падения волны на дно θ_l, соответствующий каустике, связан с θ_{0l} соотношением

$$\operatorname{tg}\theta_l=2\operatorname{tg}\theta_{0l}. \tag{7}$$

Отметим также, что из системы (5) нетрудно получить известные соотношения, связывающие параметры осадков a, n_0 с геометрическими параметрами каустики r_l, z_0 [5].

При выводе (6), (7) считалось, что $\cos^2\theta_m\gg n_0^2-1$, где θ_m — макси-



Угловая зависимость потерь в дне: *1* – центральная частота 100,0 Гц (полоса частот 95,1–105,1 Гц), *2* – центральная частота 177,0 Гц (полоса частот 157,7–198,7 Гц)

мальный угол падения волны, участвующей в формировании каустики, на дно.

Пусть теперь известны угловые зависимости нормированной амплитуды $V^{(1)}$ и $V^{(2)}$ для двух частот при неизменной величине z_0. Для угла $\theta_{01}=\mathrm{arctg}(2n_0\sqrt{2/az_0})$, соответствующего первой каустике ($l=1$), для величины p_1 из (2) имеем

$$p_1/p_и=V-V_0. \tag{8}$$

Для углов $\theta_0<\theta_{01}-\Delta\theta$, где $\Delta\theta\approx0{,}5(a/k_0)^{1/3}$ – угловая полуширина каустики [8], $V=V_0$, так как при этих углах наблюдается зона тени для рефрагированных в осадках волн [6].

С другой стороны, поле p_1 на каустике имеет вид (4). Определяя из (4) отношение $|p_1^{(1)}/p_1^{(2)}|$ для двух разных частот:

$$|p_1^{(1)}/p_1^{(2)}|=(k_0^{(1)}/k_0^{(2)})^{1/6}\exp(-\alpha\Delta\varphi),$$

где

$$\Delta\varphi(\theta_1)=\frac{1}{\alpha}(\varphi''^{(1)}-\varphi''^{(2)})=\frac{2n_0(k_0^{(1)}-k_0^{(2)})}{a}\ln\frac{\sqrt{az_0+2n_0^2}+\sqrt{az_0+2(n_0^2-1)}}{\sqrt{2}}$$

и учитывая (8), получаем следующее выражение для тангенса угла потерь:

$$\alpha=\frac{1}{\Delta\varphi}\left(\frac{1}{6}\ln\frac{k_0^{(1)}}{k_0^{(2)}}-\ln\left|\frac{V^{(1)}-V_0}{V^{(2)}-V_0}\right|\right). \tag{9}$$

В случае, когда вклад рефрагированных волн доминирует над вкладом отраженных волн от границы раздела вода – дно ($|V|\gg|V_0|$), имеем

$$\alpha=\frac{1}{\Delta\varphi}\left(\frac{1}{6}\ln\frac{k_0^{(1)}}{k_0^{(2)}}-\ln\left|\frac{V^{(1)}}{V^{(2)}}\right|\right). \tag{10}$$

В качестве примера оценим коэффициент затухания звука по данным работы [4]. На рисунке показаны экспериментальные зависимости потерь при отражении от дна BL в зависимости от угла скольжения χ ($\chi=\pi/2-\theta$), полученные на абиссальной равнине Гаттерас, для двух центральных частот $f^{(1)}=177$ и $f^{(2)}=100$ Гц. Установлено, что средний градиент скорости звука $dc/dz\simeq1{,}32$ с$^{-1}$, показатель преломления $n_0\approx1{,}0$, а

скорость звука на поверхности раздела вода — дно $c_0 \simeq 1520$ м/с. Из рисунка видно, что отрицательные потери начинают наблюдаться при $\theta_0 \simeq \simeq 70°$, которые соответствуют первой каустике рефрагированных в дне волн. Исходя из формулы (6), определим неизвестный параметр z_0, значение которого в [4] отсутствует. Получаем, что в данном случае $z_0 \simeq \simeq 1220$ м. Из рисунка находим, что на каустике $|V^{(1)}| \simeq 1{,}1$, $|V^{(2)}| \simeq 1{,}8$, $|V_0| \simeq 0{,}2$. Поскольку $|V^{(1)}||V^{(2)}| \gg |V_0|$, то можно воспользоваться выражением (10), откуда получаем, что $\alpha \simeq 1{,}2 \cdot 10^{-3}$. При этом коэффициент затухания звука на частоте 100 Гц равен $4{,}3 \cdot 10^{-3}$ дБ/м и находится в соответствии с данными Гамильтона для илистых осадков [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Frisk G. V., Doutt J. A., Hays E. E.* Bottom interaction of lowfrequency acoustic signals at small grazing angles in the deep ocean. 1981. V. 69. № 1. P. 84–94.
2. *Веденев А. И., Гончаров В. В., Курьянов Б. Ф.* Оценка акустических параметров морского дна по интерференции широкополосного звука // Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 162–173.
3. *Спофорд К. В.* Определение геоакустических параметров из данных о потерях в дне // Акустика дна океана. М.: Мир, 1984. С. 120–147.
4. *Ди Наполи Ф. Р., Поттер Д., Херстейн П.* Акустические волны, взаимодействующие с дном: модель и эксперимент // Акустика дна океана. М.: Мир, 1984. С. 174–185.
5. *Фриск Дж. В.* Определение профиля скорости звука с помощью информации о положении каустики // Акустика дна океана. М.: Мир, 1984. С. 115–119.
6. *Воловов В. И., Ефимов А. В., Ивакин А. Н.* Переизлучение сферической звуковой волны непрерывно-слоистым дном // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 5. С. 591–596.
7. *Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П.* Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. С. 95.
8. *Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. С. 91.
9. *Hamilton E. L.* Geoacoustic modelling of the sea floor // J. Acoust. Soc. Amer. 1980. V. 68. № 5. P. 1313–1340.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28.07.89

A. V. Efimov

DETERMINATION OF SOUND ATTENUATION IN SEDIMENTS ON THE BASIS OF DATA ABOUT A CAUSTIC OF SIGNALS RERADIATED BY A BOTTOM

A method of determination of sound attenuation in sediments is proposed. It is based on a measurement of a bottom reflection coefficent for two values of a frequency for a first caustic point of a reflected spherical wave. An expression for the attenuation coefficient, all parameters of which can be experimentaly determined, is cited. The attenuation coefficient is evaluated on the basis of experimental data about losses during bottom reflection.