АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 4, с. 560–562

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 463.2

О ДОПУСТИМОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИБЛИЖЕНИЯ ОДНОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЗАДАЧАХ О СКОПЛЕНИЯХ ГИДРОБИОНТОВ

© 1996 г. И. Б. Андреева, А. В. Белоусов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 07.04.95 г.

В работе [1] рассмотрены эффекты многократного рассеяния подводного звука в плотных скоплениях объемных неоднородностей. Рассмотрение сделано применительно к стаям пелагических животных в океане и к относительно низкочастотному диапазону акустических волн (ниже 10 кГц). В настоящем сообщении приведены результаты расчетов для более высокочастотной области, 10–100 кГц, широко используемой в рыбопоисковой технике.

В [1] стая рассматривалась как ограниченное в пространстве облако случайно распределенных одинаковых рассеивателей, на которые падает монохроматическая звуковая волна от направленного источника, а рассеянное поле регистрируется направленным приемником, вынесенным за пределы облака. Задача решена методом переноса излучения, и исходное уравнение для расчета лучевой интенсивности записано в виде:

$$I(\mathbf{r}+D\mathbf{e},\mathbf{e}_0) = I(\mathbf{r},\mathbf{e})(1-\sigma_e N^{2/3}) + \\ + \frac{1}{4\pi}\int I(\mathbf{r},\mathbf{e}_0)\sigma(\mathbf{e},\mathbf{e}_0)N^{2/3}d\Omega_0 + \varepsilon(\mathbf{r},\mathbf{e}). \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $\mathbf{e}_0$ и $\mathbf{e}$ – единичные векторы, определяющие направления волн, соответственно излученной источником и рассеянной отдельным рассеивателем; $\mathbf{r}$ – расстояние рассеивателя от точки излучения; $\sigma(\mathbf{e}, \mathbf{e}_0)$ – сечение рассеяния отдельного рассеивателя в выделенном направлении; σ_e – сумма полных сечений рассеяния и поглощения каждого из них; $\varepsilon(\mathbf{r}, \mathbf{e})$ – функция эквивалентного источника, описывающая переход энергии от когерентной компоненты к некогерентной; D – среднее расстояние между рассеивателями; $N = D^{-3}$ – средняя концентрация рассеивателей в облаке. Интегрирование в (1) происходит по телесному углу, в пределах которого рассеянное поле приходит к приемнику, находящемуся в точке $\mathbf{r}$.

Было показано, что практически до самых высоких концентраций, имеющих место в натурных условиях, значения лучевой интенсивности могут вычисляться в рамках модифицированного борновского приближения. При этом в точке приема суммируются интенсивности волн, однократно рассеянных каждым рассеивателем, а эффект многократности учитывается ослаблением звука из-за рассеяния его на всех неоднородностях, встречающихся на пути распространения прямого и рассеянного сигналов. В ходе расчета было сделано несколько упрощающих предположений, и, в частности, диаграммы направленности описывались гауссовыми функциями, а рассеиватели считались изотропными. В результате была вычислена суммарная интенсивность рассеянного поля в точке приема. Полученная величина нормирована на интенсивность звука, приходящего в ту же точку от единичного рассеивателя, помещенного в точку пересечения осей диаграмм направленности. Эта нормированная величина имеет вид:

$$J = NVe^{-\beta_s\rho}, \quad (2)$$

где V – объем облака в зоне пересечения диаграмм, ρ – средняя величина суммы расстояний, пробегаемых в пределах облака прямым и рассеянным звуком. $\beta_s = N^{1/3} - \sigma_e N$ – коэффициент дополнительного затухания звука, из-за его ослабления при прохождении через рассеивающее облако (учитываемый эффект многократности рассеяния).

При малых концентрациях интенсивность J растет пропорционально N, что соответствует приближению однократного рассеяния. Однако с увеличением N растет и абсолютная величина показателя степени в (2), рост функции $J(N)$ замедляется, она достигает максимума (или насыщения) и дальше величина J может начать падать. Это свидетельствует о большой роли учтенного здесь эффекта многократного рассеяния. Значение N, соответствующего максимуму функции $J(N)$, принято как критерий для выбора метода решения задачи – приближения однократного или многократного рассеяния. Этот критерий может быть записан как

$$(N\rho)_{\text{кр}} = \sigma_e^{-1}. \quad (3)$$

Используем этот критерий для оценки условий, при которых необходимо учитывать многократное рассеяние при акустическом описании промысловых скоплений рыб и рачков в океане. Максимально возможные значения их концентраций равны $N_{max} = (2l)^{-3}$, где l – длина рыбы или рачка. Такие значения N_{max} могут наблюдаться только в скоплениях мелких организмов, $l \leq 30$ см. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [1]. Значения σ_e полного сечения экстинкции пока нам неизвестны, так как нет надежных оценок величин сечений поглощения отдельным морским организмом. В критерии (3) мы заменим сечение σ_e полным сечением рассеяния $\sigma_0(l, f) < \sigma_e(l, f)$ (f – частота) и, следовательно, оценки величины $(N\rho)_{кр}$ будут оценками сверху. Перепишем критерий (3) в виде:

$$\rho_{кр}(f, l) = [\sigma_0(f, l)N(l)]^{-1}. \quad (4)$$

Остановимся на максимальных значениях концентрации и значениях $\sigma_0(f, l)$, приведенных в [1] для организмов трех типов: рыбы с плавательным пузырем, рыбы без пузыря и мелкие рачки типа криля. Длина пути ρ распространения звука в пределах рассеивающего скопления не должна по порядку величины отличаться от протяженности скопления гидробионтов по направлению распространения звука. Значения $\rho_{кр}$, вычисленные согласно [4], можно рассматривать как оценку такого размера стаи, при котором уже требуется учет многократности рассеяния; приближение однократного рассеяния допустимо, строго говоря, лишь, если размеры стаи много меньше величины $\rho_{кр}$.

На рис. 1 приведены зависимости $\rho_{кр}(f)$ для плотных скоплений мелких рыб при концентрациях $N = N_{max} = (2l)^{-3}$. В области, лежащей ниже каждой из кривых, допустимо использование приближения однократного рассеяния, выше – необходимо учитывать его многократность. На частотах 10–30 кГц кривые $\rho_{кр}(f)$ могут опускаться ниже 20–30 м, и, следовательно, даже при столь незначительных размерах плотных стай мелких рыб, особенно рыб с плавательным пузырем, уже нельзя ограничиваться при расчетах приближением однократного рассеяния. На рис. 2 аналогичные кривые приведены для рачков типа криля ($N = (2l)^{-3}$) и для более крупных рыб, не образующих столь плотных стай. Для них кривые $\rho_{кр}(f)$ лежат заметно выше, чем на рис. 1 и величины $\rho_{кр}$ достигают единиц и десятков километров, что, как правило, много больше возможных размеров стай в океане. Для скоплений морских организмов этого типа в большинстве случаев достаточно точные результаты дает приближение однократного рассеяния. Исключением являются рачки криля при частотах 50–100 кГц, для которых величины $\rho_{кр}$ опускаются ниже 1 км.

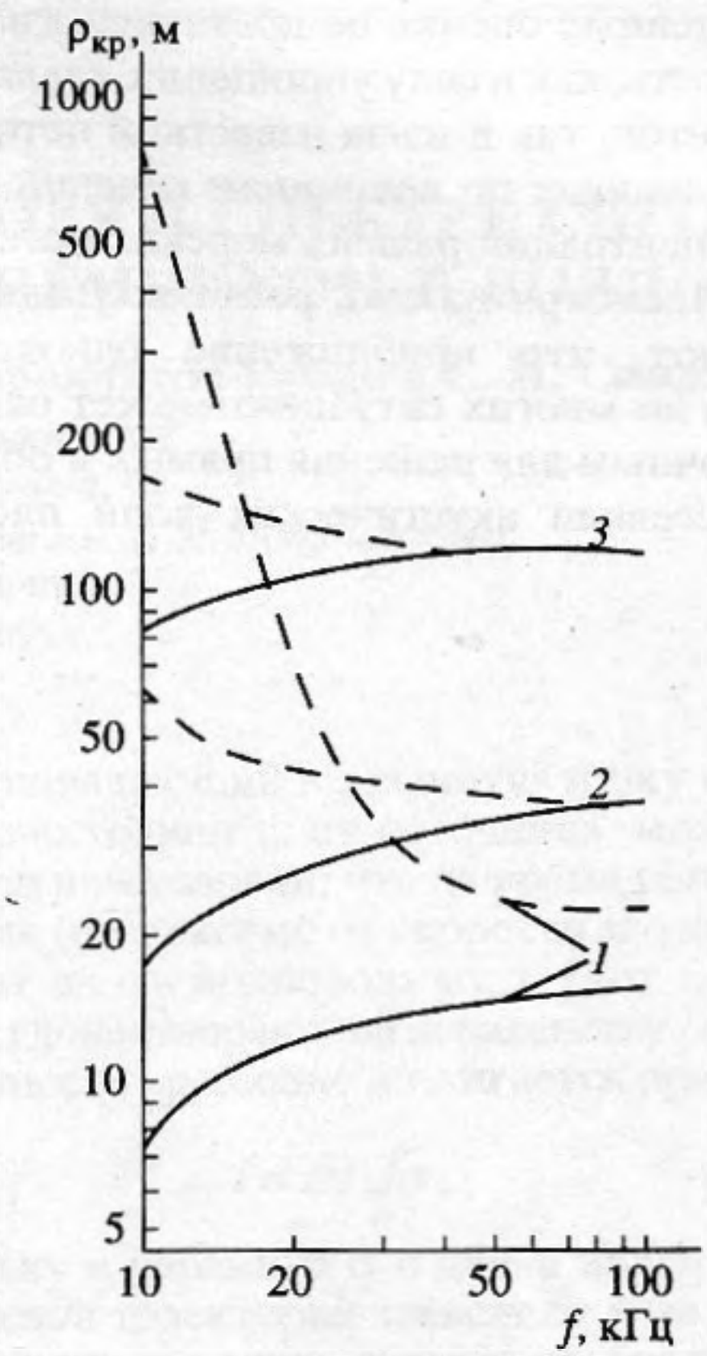

Рис. 1. Зависимости от частоты критической длины пути звука в скоплениях мелких рыб. Длина рыбы и концентрации: *1* – 5 см, 800 экз/м^3; *2* – 15 см, 20 экз/м^3; *3* – 30 см, 3 экз/м^3. Сплошные линии – рыбы с плавательным пузырем; штриховые линии – рыбы без пузыря.

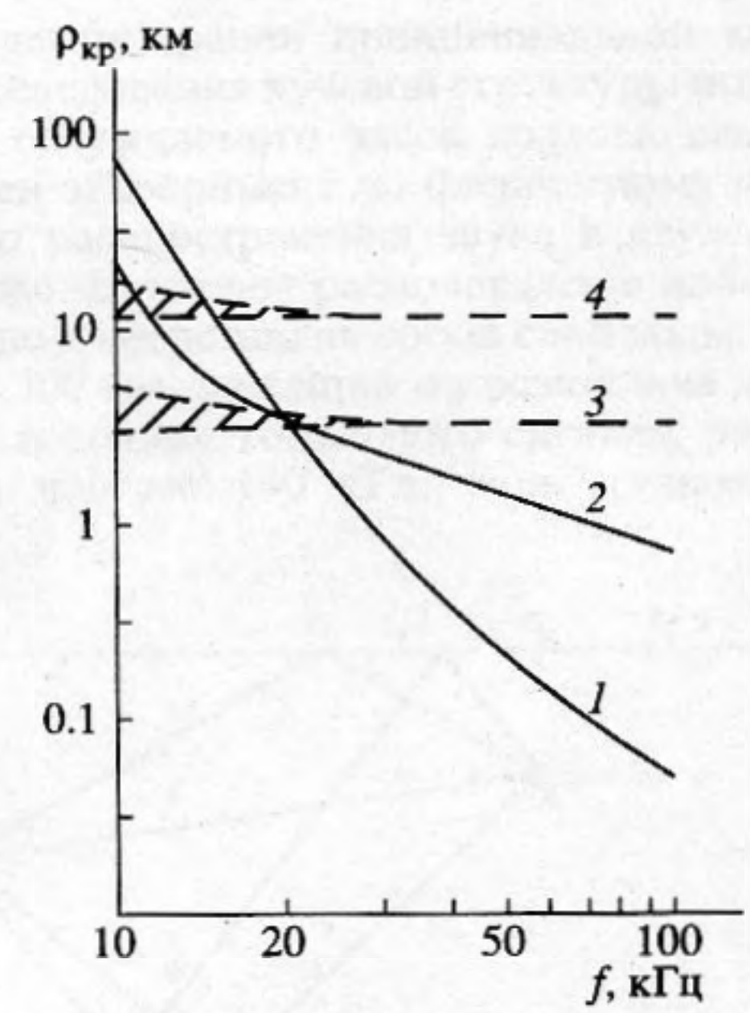

Рис. 2. Зависимости от частоты критической длины пути звука в скоплениях мелких рачков при $N = (2l)^{-1}$ и рыб среднего размера. *1* – рачек, длина 3 см; *2* – рачек, длина 10 см; *3* – рыба, длина 30 см, $N = 10^{-1}$ экз/м^3; *4* – рыба, длина 50 см, $N = 10^{-2}$ экз/м^3.

Приведенные оценки не претендуют на высокую точность, как в силу упрощений, сделанных в ходе расчетов, так и из-за известной неточности исходных данных по величинам сечений рассеяния и концентраций разных морских организмов в стаях. Несмотря на это, расчеты убедительно показывают, что приближение однократного рассеяния во многих ситуациях может оказаться недостаточным для решения прямых и обратных задач рассеяния акустических волн плотными стаями мелких морских организмов при частотах в десятки килогерц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда, грант N11 000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева И.Б., Белоусов А.В., Львовская Г.Ф., Тарасов Л.Л.* Акустические свойства плотных скоплений пелагических животных в океане // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 9–16.