АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 3, с. 318–324

УДК 551.463.2

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОРСКИХ ОРГАНИЗМОВ, ОБРАЗУЮЩИХ ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИЕ СЛОИ ОКЕАНА

© 2003 г. **И. Б. Андреева, Л. Л. Тарасов**

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: tarasov@akin.ru

Поступила в редакцию 14.12.2001 г.

Рассмотрены акустические модели различных организмов, обитающих в звукорассеивающих слоях глубокого океана и формирующих рассеиваемое этими слоями акустическое поле. Эти организмы разделены на несколько акустически различающихся групп: рыбы с плавательным пузырем, рыбы без пузыря, ракообразные, мелкие кальмары и организмы, тело которых состоит из мягких тканей и лишено как жестких, так и газообразных включений. Выбраны нормализованные критерии для количественного сопоставления их рассеивающих свойств. Для организмов каждой группы приведены и проанализированы расчетные модели. Построены обобщенные графики, которые обеспечивают удобное количественное сравнение величин сечений обратного рассеяния организмов разных групп, разных размеров и при разных частотах облучения. Кроме того, эти графики дают возможность оценить абсолютные значения и частотные характеристики сечений рассеяния обитателей звукорассеивающих слоев в широких диапазонах частот и размеров.

Одной из распространенных акустических неоднородностей толщи вод глубокого океана являются звукорассеивающие слои (ЗРС) – горизонтально протяженные скопления мелких морских организмов. При построении акустической модели ЗРС необходима информация об акустических свойствах морских организмов, обитающих в этих слоях и создающих рассеянное поле. Их можно разделить на несколько акустически различающихся групп. Это рыбы с плавательным пузырем и рыбы без пузыря, ракообразные, мелкие кальмары и разнообразные организмы с мягкими тканями тела без жестких и газообразных включений. В настоящей статье приведены сравнительные оценки сечений рассеяния основных обитателей рассеивающих слоев, выполненные по теоретическим моделям и формулам, аппроксимирующим экспериментальные данные. Эти оценки несомненно являются приближенными по нескольким причинам. Во-первых, из-за многообразия форм и структур тела обитателей ЗРС, принадлежащих к каждой из групп; во-вторых, из-за невозможности отразить в моделях реальную форму деталей тела живых организмов; в-третьих, из-за ограниченности экспериментальных данных как по акустико-механическим свойствам живых тканей, так и по прямым измерениям рассеивающих свойств отдельных обитателей ЗРС. Одной из последних публикаций этого направления является работа [1].

Для устранения неоднозначности, связанной с различием размеров организмов одной группы, при сравнении будем пользоваться нормированными характеристиками. Это поперечное сечение σ обратного рассеяния, нормированное на квадрат характерного размера l организма, $\sigma^* = \sigma/l^2$, а также размер l, нормированный на длину акустической волны λ, $l^* = l/\lambda$; последняя величина в дальнейшем называется нормированным размером, или нормированной частотой, или просто частотой.

Характерные размеры обитателей рассеивающих слоев находятся в пределах, примерно, от 1 до 20 см, а диапазон частот, в котором наиболее подробно изучены акустические свойства океанических ЗРС, это 1–20 кГц. Будем относить значения $l^* < 1$ к низкочастотному, $l^* > 1$ – к высокочастотному диапазонам.

Начнем с низкочастотного диапазона и с моделей рыб с плавательным пузырем. Впервые такая модель была предложена в работе [2], где получены выражения для резонансной частоты (f_r) и сечений рассеяния при $ka \ll 1$, где a – радиус сферы, объем которой равен объему плавательного пузыря рыбы. Первое из этих выражений имеет вид:

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{a}\sqrt{\frac{3\gamma P + 4\mu}{\rho}}. \quad (1)$$

Здесь P – статическое давление на глубине, где находится рыба; $\gamma = c_p/c_v = 1.4$ – отношение тепло-

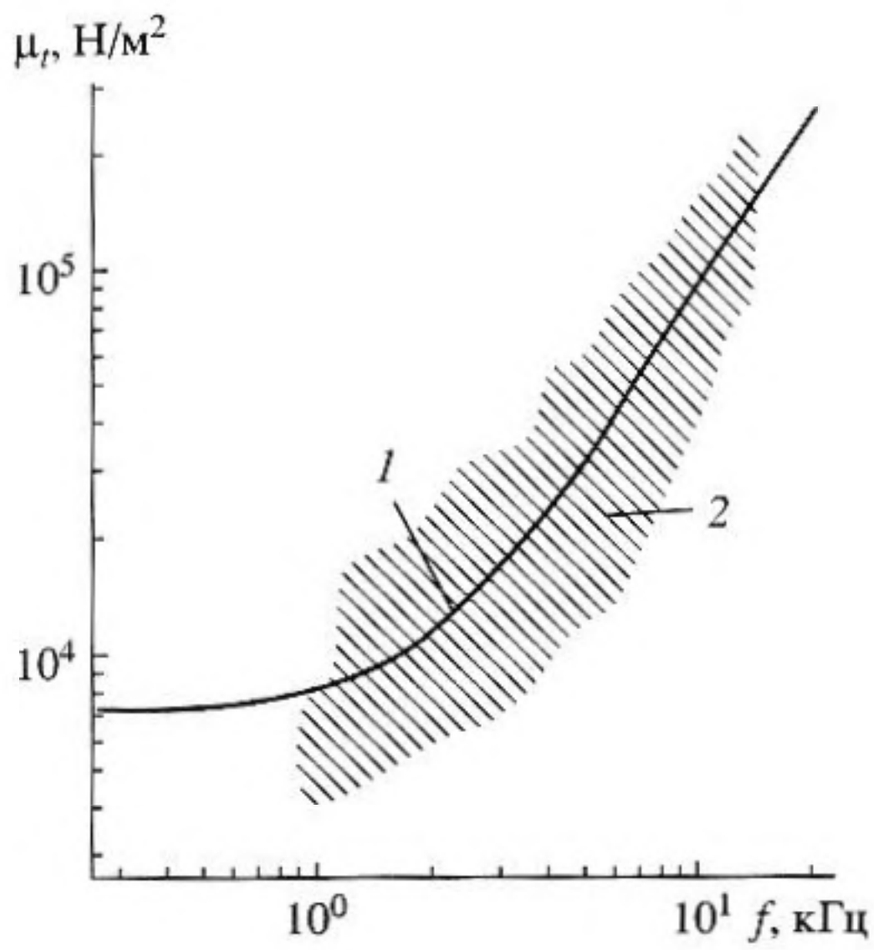

Рис. 1. Экспериментальные данные по модулю сдвига живых тканей. *1* – усредненное значение (приближенно), *2* – область разброса данных.

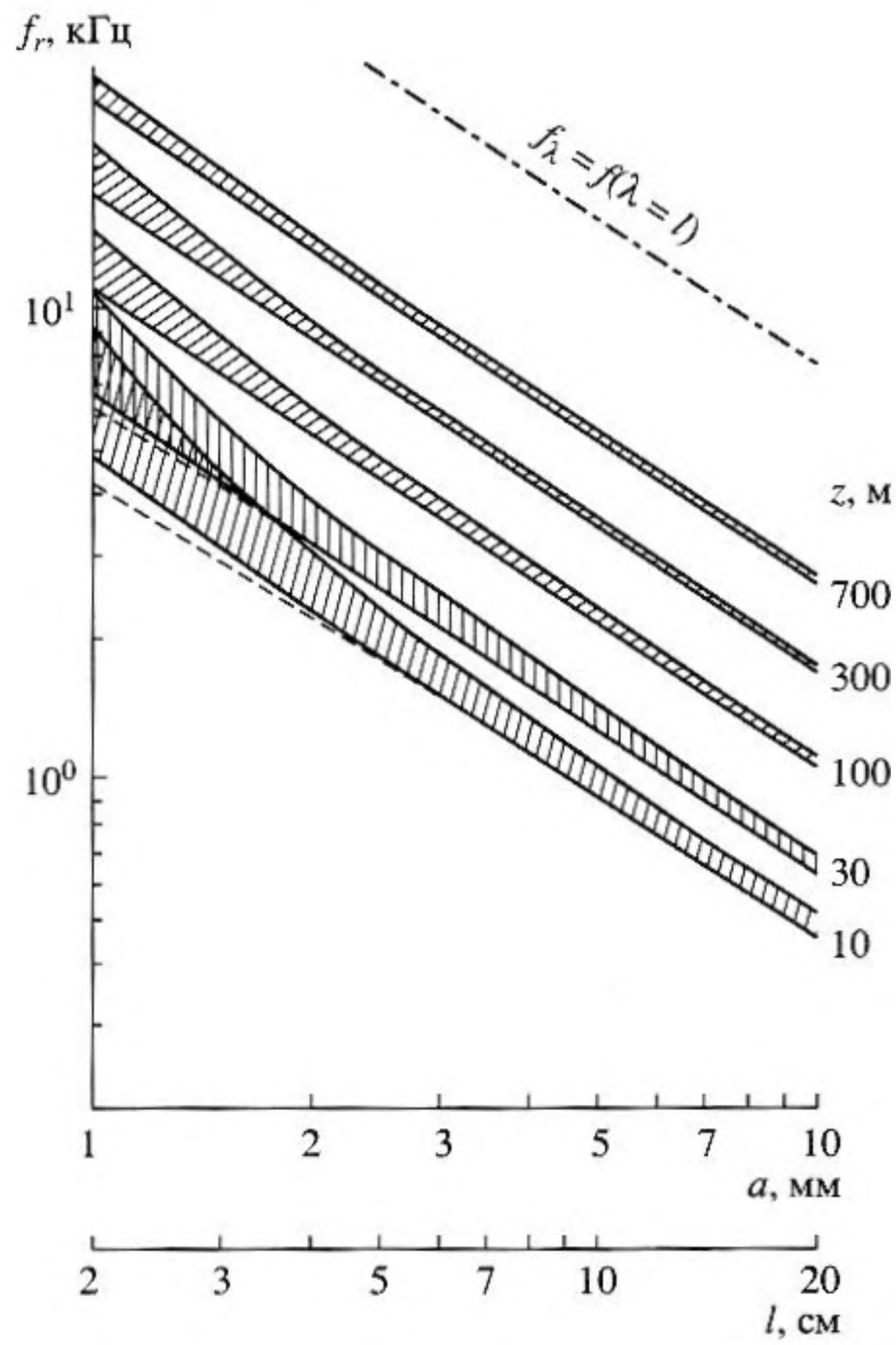

Рис. 2. Зависимости резонансной частоты от размеров рыбы, при разных глубинах z. Нижняя граница каждой заштрихованной области – $\mu = \mu_{min}$, верхняя граница – $\mu = \mu_{max}$. Пунктир – свободные пузырьки газа в воде.

емкостей газа при постоянных давлении и объеме, ρ – плотность воды, μ – модуль сдвига живых тканей, окружающих пузырь. Для открытопузырных рыб, объем плавательного пузыря которых почти не зависит от глубины, можно положить $a \cong 0.05l$ и, внеся соответствующие изменения в эту и последующие формулы, написать их в более удобном для практических расчетов виде.

Из величин, входящих в формулу (1), менее всего изучена величина модуля сдвига, и вся известная нам информация о нем содержится в работах Л.П. Лебедевой [3, 4], по результатам которых построена зависимость $\mu_t(f)$ (рис. 1). На этом рисунке заштрихованная область характеризует величину разброса экспериментальных данных. Из-за известной неопределенности этих результатов многие из дальнейших расчетов сделаны при двух значениях модуля сдвига: $\mu = \mu_{min} = 0.3\mu_t$ и $\mu = \mu_{max} = 3.0\mu_t$, что практически перекрывает большую часть заштрихованной области рис. 1.

На рисунке 2 изображены зависимости резонансной частоты от радиуса a и длины рыбы $l = 20a$ (нижняя горизонтальная шкала). Графики построены при разных глубинах расположения рыбы и при разных значениях модуля сдвига. Графики рис. 2 свидетельствуют, что отмеченный разброс величин модуля сдвига не приводит к существенной неопределенности значений резонансных частот; они в основном определяются размером рыбы и глубиной ее расположения. Резонансные частоты (если исключить самых крупных рыб на очень малых глубинах) остаются в диапазоне частот от единиц до одного–двух десятков кГц.

Сечение обратного рассеяния рыб с плавательным пузырем, согласно [2] и с учетом вышеприведенной связи размеров рыбы и ее пузыря, может быть записано в виде

$$\sigma = \frac{2.5 \times 10^{-3} l^2 Q^2}{\left(\frac{\omega_r^2}{\omega^2} - 1\right)^2 Q^2 - \frac{\omega_r^2}{\omega^2}}, \qquad (2)$$

где Q – добротность колебательной системы плавательный пузырь–ткани тела рыбы. Рассеяние звука рассматриваемой колебательной системы можно считать изотропным, что определяет простую связь полного и обратного сечений рассеяния рыбы с плавательным пузырем на низких частотах: $\sigma_0 = 4\pi\sigma$.

Физическая природа добротности рассмотрена в [5], где показано, что ее величина почти полностью определяется двумя видами потерь – потерями на рассеяние звука (η_s) и сдвиговыми потерями

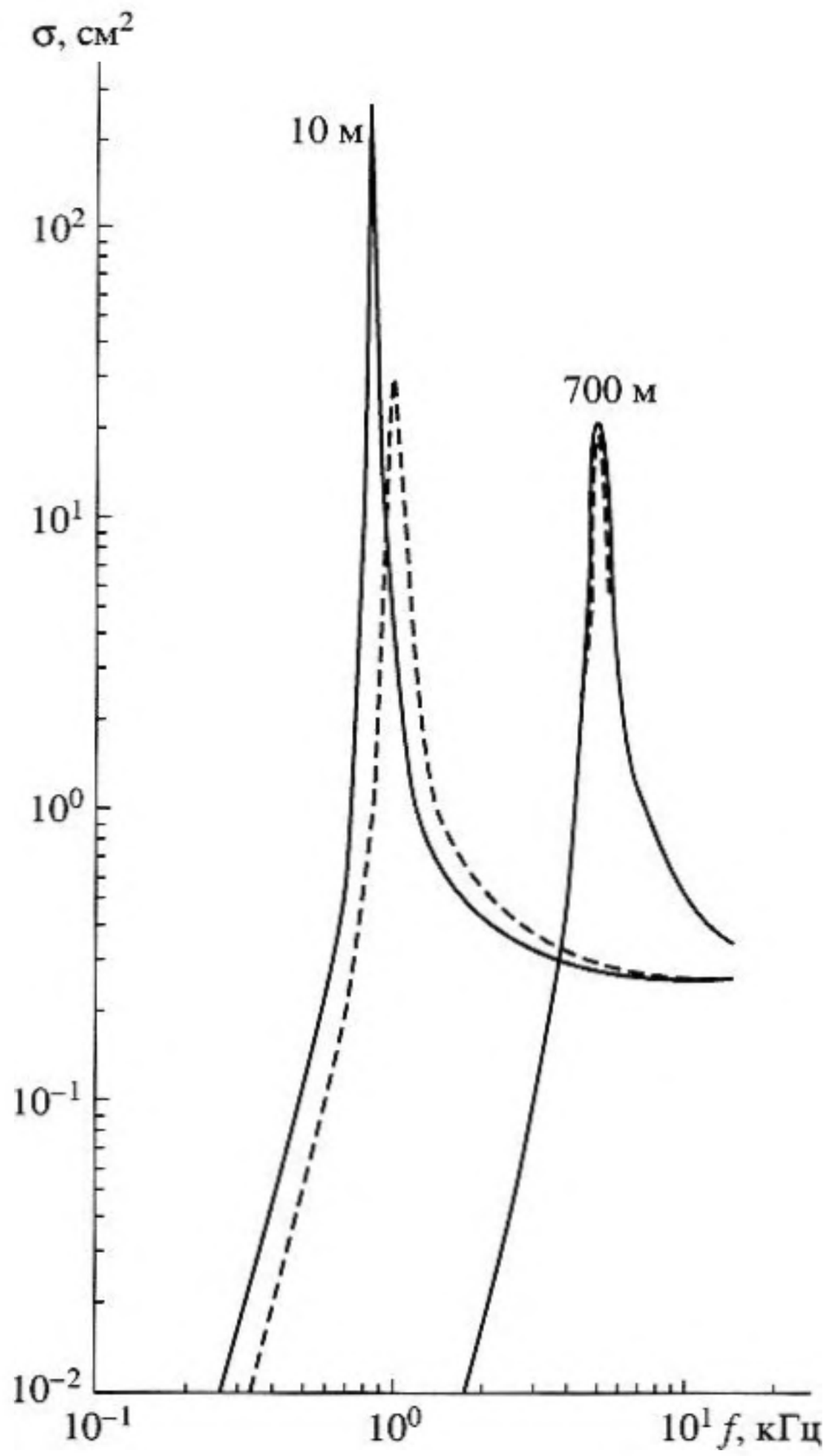

Рис. 3. Вид резонансных кривых сечений обратного рассеяния рыб с плавательным пузырем при длине 10 см, разных глубинах и разных значениях модуля сдвига. Сплошные линии – $\mu = 0.3\mu_r$, штриховые – $\mu = 3\mu_r$.

(η_μ) в живых тканях, окружающих плавательный пузырь. Величина добротности может быть записана в виде

$$Q = \left(\frac{1}{\eta_s + \eta_\mu}\right) = \left(\frac{1}{c}\sqrt{\frac{3\gamma P + 4\mu}{\rho}} + \frac{0.2\mu}{3\gamma P + 4\mu}\right)^{-1}. \quad (3)$$

Результаты расчета показывают, что соотношение компонент потерь этих двух видов зависит от размера рыбы, ее глубины и величины μ. Доля сдвиговых потерь максимальна для небольших рыб на малых глубинах, где она приближается к 100%, но эта доля падает почти до 50% при увеличении глубины до 1000 м; для относительно крупных рыб ЗРС ($l \cong 20$ см) сдвиговые потери на больших глубинах практически исчезают, и величина добротности определяется только потерями на рассеяние. Величины обеих компонент потерь зависят от величины модуля сдвига, а, следовательно, и от значения резонансной частоты. Все это делает неоднозначной зависимость добротности от размера рыбы; расчеты, выполненные по формуле (3), показали, что величина Q при реально возможных вариациях параметров, входящих в эту формулу, может изменяться в пределах, примерно, от 4 до 15.

На рисунке 3 приведены резонансные кривые $\sigma(f)$, соответствующие длине рыбы 10 см, двум глубинам и двум крайним значениям модуля сдвига. Резонансное сечение обратного рассеяния, σ_r, может достигать сотен см^2, ширина области резонанса невелика, частота резонанса сильно изменяется только при изменении глубины; величина модуля сдвига заметно влияет лишь на величину резонансного сечения рассеяния. На частотах ниже резонансной области, сечение рассеяния падает как f^4, выше – спад идет медленнее, и при $ka \cong \cong 0.3l^* \cong 0.3$ принятая модель перестает быть пригодной для оценок.

На относительно высоких частотах, при $l^* > 1$, роль плавательного пузыря в процессе рассеяния звука рыбой падает и рассеяние перестает быть изотропным. Измерения, выполненные в Акустическом институте, показали, что в высокочастотной области и индикатриса, и диаграмма обратного рассеяния рыб имеют максимумы, соответствующие облучению наиболее "плоских" частей тела рыбы (боковая поверхность, спинка, брюшко), и провалы, связанные с ракурсами головы и хвоста. Вид этих экспериментальных угловых зависимостей подробно описан в [6].

Большая работа по определению характеристик обратного рассеяния рыб в высокочастотной области была выполнена Р. Лавом. В своей обобщающей работе [7], исходя из обширных экспериментальных данных, он показал, что в области высоких частот сечения рассеяния рыб, имеющих и не имеющих плавательный пузырь, мало различаются между собой, могут быть объединены в единую группу и при $l^* \cong 1$–15 практически не зависят от параметра l^*. Лав рассмотрел зависимость величин сечений обратного рассеяния от ракурса облучения рыбы и привел их численные характеристики для всех возможных ракурсов. Для количественного описания им выбрана величина $4\pi\sigma^*$.

Приведем некоторые значения нормированных сечений обратного рассеяния, рассчитанные по данным работы [7]. При спинном ракурсе облучения $\sigma^* = \sigma_1^* = 3.3 \times 10^{-3}$, а величина, средняя по всем ракурсам облучения, равна $\langle\sigma^*\rangle = 1.6 \times 10^{-3}$. Эти величины практически не зависят от нормированной длины рыбы, если $l^* = 1$–15.

Для оценки сечений обратного рассеяния рыб без плавательных пузырей в низкочастотной области нам не известно надежных экспериментальных или расчетных данных. Приближенно такие оценки можно сделать, исходя из высоко-

частотных значений σ^* при $l^* \cong 1$, рассчитав в низкочастотном диапазоне зависимость $\sigma^*(l^*)$, соответствующую закону спада пропорционально $(l^*)^4$. В таких оценках следует опустить переходную область вблизи $l^* \cong 1$ и ограничиться значениями $l^* < 0.3$. Так, используя приведенную выше величину $\sigma_1^* = 3.3 \times 10^{-3}$, получаем при $l^* = 0.01$ нормированное сечение обратного рассеяния рыб без плавательных пузырей, равное $\sigma^* \cong 10^{-10}$, что много меньше величин, характерных для рыб с плавательными пузырями, не только в области резонансов, но и вне ее.

На рис. 4 приведены частотные зависимости нормированных сечений обратного рассеяния моделей рыб, описанных выше. На низких частотах для рыб с плавательным пузырем эти зависимости по указанным выше причинам неоднозначно связаны с размером рыбы и частотой облучения; поэтому на рисунке они представлены в виде заштрихованных областей 1 и 2. Область 1 приближенно ограничивает возможные значения сечений рассеяния σ_r^* на резонансной частоте плавательного пузыря. Расчеты величин σ_r^*, соответствующие области 1, сделаны для характерных размеров рыб от 3 до 20 см для глубин от 30 до 1000 м. Величины σ_r^* в области 1 находятся в пределах от 0.04 до 0.5 и соответствуют рыбам с нормированной длиной l^* от 0.03 до 0.3. Большое число влияющих факторов затрудняет более точное определение границ этой области, но для каждого частного случая расчет может быть сделан по вышеприведенным формулам. На частотах ниже резонансных величины сечения рассеяния уменьшаются по закону, который быстро приближается к четвертой степени частоты, $(l^*)^4$, что и определяет положение границ области 2.

Линия 3' на этом рисунке соответствует значению σ_1^*, а линия 3" – величине, средней по всем возможным ракурсам облучения, $\langle\sigma^*\rangle$ (по данным работы [7]. Линии 4' и 4" определяют в низкочастотном диапазоне оценочные зависимости для рыб, не имеющих плавательных пузырей, и они проведены, исходя из уровней 3' и 3" соответственно. Из-за недостаточной строгости таких оценок линии, соответствующие низкочастотным ветвям расчетных зависимостей $\sigma^*(l^*)$, так же, как и границы областей 1 и 2, нанесены пунктиром.

Второй, после рыб, группой обитателей ЗРС являются ракообразные с характерными размерами в единицы сантиметров. Наиболее массивная часть тела рачка состоит из мышечных тканей, окруженных тонким, но значительно более жестким, хитиновым панцирем. По форме эта часть похожа на несколько изогнутые цилиндр или эллипсоид вращения; ее длину будем считать характерным размером рачка, l. Описание рассеивающих свойств организмов этой группы шло по пути как разработки теоретических моделей, так и аппроксимации экспериментальных данных о величинах сечений рассеяния. Относительно подробно этот круг вопросов рассмотрен в работе [8], и здесь мы воспользуемся основными результатами этой работы.

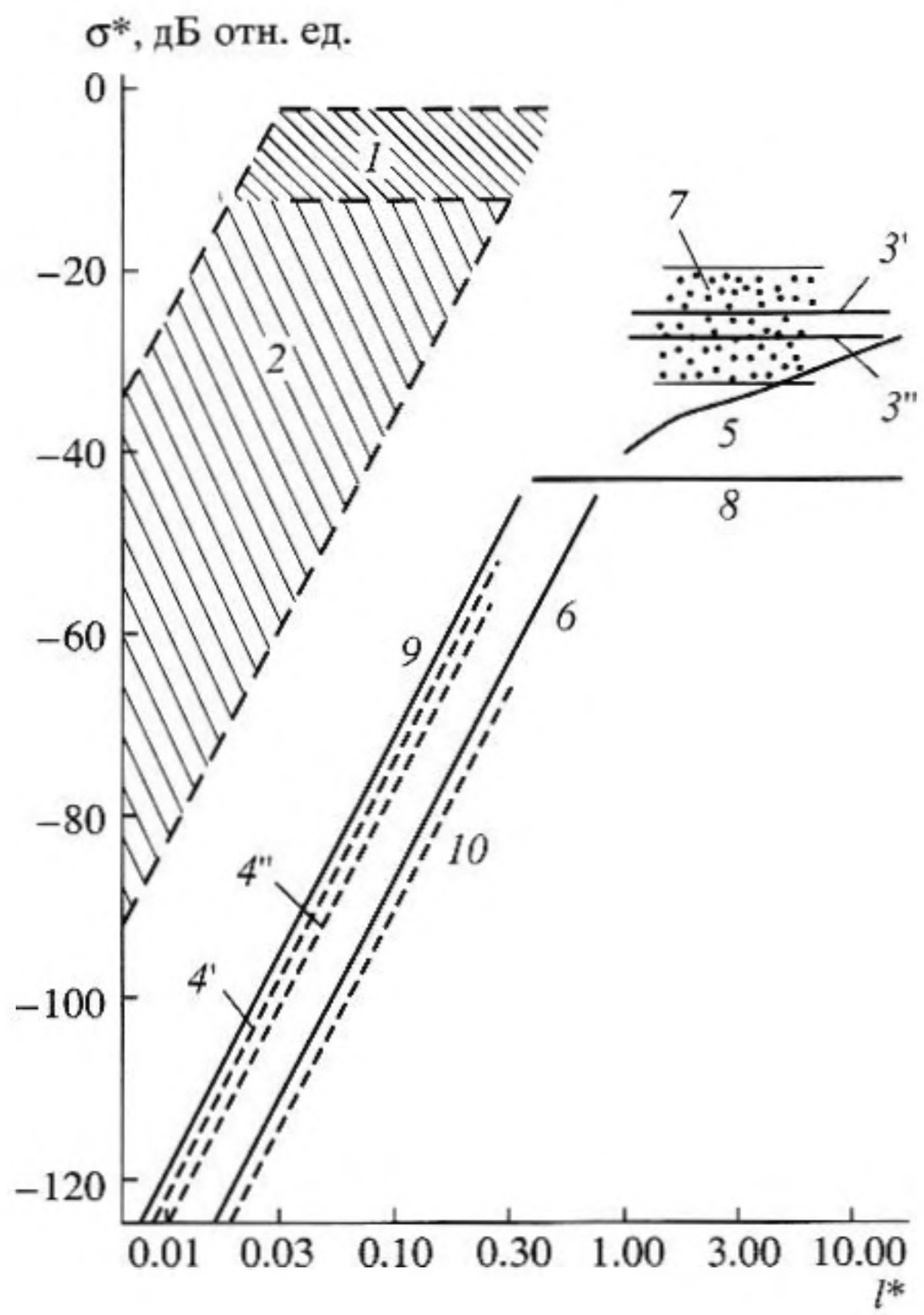

Рис. 4. Сравнительные оценки нормированных частотных характеристик и величин сечений обратного рассеяния обитателей ЗРС, относящихся к акустически разным группам.

1 – рыбы с плавательным пузырем на резонансных частотах, *2* – то же, на частотах ниже области резонанса; *3'* – рыбы по данным [7], спинной ракурс облучения, *3"* – то же, среднее значение по всем аспектам; *4'* и *4"* – рыбы без пузырей соответственно уровням *3'* и *3"*; *5* и *6* – рачки, соответственно формулы (4) и (5); *7* – кальмары; *8*, *9* – организмы с мягкими однородными тканями тела (соответственно формулам (6) и (7)), *10* – условный организм с такими же тканями.

Несмотря на кажущуюся простоту формы тела ракообразных, все расчетные модели выражаются очень громоздкими формулами. Их сложность, с нашей точки зрения, неадекватна степени точности исходных данных – скудости имеющихся материалов, как по свойствам живых тканей, так и по угловым зависимостям рассеяния звука живыми ракообразными. Для численных оценок нам представляется более целесообразным использовать относительно простые аппроксими-

рующие формулы, полученные по достаточно большим массивам экспериментальных данных. Однако теоретические модели дают возможность прояснить роль различных факторов, влияющих на процесс рассеяния звука рачками, и объяснить некоторые эффекты, которые наблюдаются при измерениях.

Большая часть данных, использованных для построения эмпирической зависимости $\sigma^*(l^*)$, была получена по мезопелагическим рачкам разных видов, обитающим в ЗРС [8]. Особняком стоят исследования пресноводных креветок, сходных по размерам и строению тела с морскими рачками [6]. Измерения свидетельствуют о близости их акустических характеристик и характеристик морских рачков; кроме того, в ходе экспериментов были получены уникальные записи индикатрис и угловых зависимостей обратного сечения рассеяния ракообразных, сделанные при плавном изменении углов облучения и рассеяния в пределах 360° [8].

Угловая диаграмма обратного рассеяния рачков похожа на диаграмму рыб – в высокочастотной области для нее также характерны максимумы, соответствующие боковым и спинному ракурсам облучения, и провалы со стороны головы и хвоста. Однако эксперименты показали, что есть и очень существенные отличия: эти максимумы не "монолитны" как у рыб, а представляют собой группы узких пиков, число которых и высота растут по мере роста частоты. Удовлетворительного способа количественного описания изрезанности угловых характеристик моделей рачков в высокочастотной области нам не известно. В большинстве случаев, при акустическом зондировании в натурных условиях скоплений рачков, изрезанность угловых характеристик каждого из них автоматически сглаживается: зондирующая диаграмма направленности охватывает одновременно большое количество особей, ориентация которых относительно горизонта подвержена небольшим и случайным вариациям. Анализ экспериментальных записей характеристик направленности обратного рассеяния показывает, что эффективное, "сглаженное", сечение рассеяния в 2§3 раза меньше расчетной величины σ_{max}, относящейся строго к спинному аспекту модели, рассмотренной в [8]. Все эти обстоятельства также говорят о преимуществе эмпирических формул по сравнению с результатами расчетных моделей.

В работе [8] совместно рассмотрены многочисленные результаты измерений сечений обратного рассеяния звука ракообразных при облучении их перпендикулярно (или примерно перпендикулярно) поверхности основной части их тела. Эксперименты выполнялись разными авторами на разных частотах при разных методах измерения. Эти результаты были пересчитаны к величинам $\sigma^*(l^*)$, выбранным нами для сопоставления акустических свойств различных организмов. На основании совокупности этих материалов для практических оценок величин сечения обратного рассеяния звука ракообразными, обитающими в ЗРС, в [8] предложены две эмпирические формулы, различающиеся частотными диапазонами. Для высоких частот при спинном (или боковом) аспекте облучения:

$$\sigma^* = 7 \times 10^{-5} \times 10^{-0.13 l^*}, \text{ при } l^* \cong 1.1\text{–}15. \quad (4)$$

Для низкочастотной области при любом аспекте:

$$\sigma^* = 10^{-4} (l^*)^4, \text{ при } l^* < 1.1. \quad (5)$$

Эти формулы соответствуют кривым *5* и *6* рис. 4. В высокочастотной части, в отличие от зависимости $\sigma^*(l^*)$ для рыб, наблюдается заметный рост нормированных сечений рассеяния рачков при увеличении частоты. В работе [9] предложена расчетная модель рачка, объясняющая эту особенность. Показано, что на низких частотах, при $l^* = 2$–3, рассеянное поле невелико и определяется, в основном, мягкими тканями тела рачка, а при возрастании l^* до 10–20 оно заметно возрастает за счет вклада, вносимого панцирем рачка.

Сведения об обратном рассеянии акустических волн мелкими кальмарами приведены в [1]. Они получены по нескольким видам кальмаров размером (длина мантии) l примерно от 1 до 5 см при облучении их с частотой 200 кГц. Это соответствует интервалу значений $l^* = 1.2$–6.2. В работе [1] в качестве величины, характеризующей сечение обратного рассеяния, принята величина силы цели, $TS = 10 \lg \sigma$ в дБ относительно единицы площади. После пересчета этих значений к нормированным сечению рассеяния и длине полученные данные нанесены на рисунке 4 в виде области 7. Вертикальная протяженность области отражает различие значений σ^*, соответствующих разным видам мелких кальмаров. Аппроксимации, соответствующие каждому, из обследованных авторами [1], виду кальмаров, показывают, что в рассматриваемом интервале значений l^* величина σ^* практически не зависит от l^*.

Перейдем к рассмотрению сечений рассеяния последней из выделенных групп обитателей ЗРС – группе организмов, тело которых состоит из мягких однородных тканей и лишено как жестких, так и газообразных включений. Результаты экспериментальных и теоретических исследований этого вопроса, полученные на примере черноморских медуз, приведены в [6, 10]. Эксперименты выполнялись в диапазоне частот от 20 до 200 кГц при $l^* > 1$; в низкочастотной области измерения выполнить не удалось из-за малости величин сечений рассеяния. При построении теоретической модели использован метод малых возмущений.

Экспериментально установлено, что сечение обратного рассеяния медузы в среднем не зависит от ракурса ее облучения; это позволило предложить модель сферической формы, равную по объему рассеивающему объекту; диаметр модели для удобства сравнений с рассеивателями других групп также обозначим l. Для такой модели предложены упрощенные полуэмпирические формулы, достаточно точно описывающие средние по ракурсам облучения величины сечений обратного рассеяния медуз в высокочастотном и низкочастотном диапазонах. На плоскости $\sigma(l)$ эти модели определяют два прямолинейных отрезка, аппроксимирующих теоретическую кривую с достаточной степенью точности. В высокочастотной части это горизонтальная линия $\sigma = \frac{l^2}{64}(\delta K)^2$, а в низкочастотной – наклонная: $\sigma = 1.9l^2(\delta K)^2(l/\lambda)^4$. Здесь $\delta K = (K - K_0)/K_0$, K_0 – модуль объемной упругости воды, K – то же, но для тканей рассеивателя. Величина δK выбиралась по результатам экспериментов, исходя из наилучшего согласия расчетных и измеренных величин σ в высокочастотном диапазоне; прямая в области $l^* \ll 1$ достаточно точно накладывается на расчетную кривую. Оптимальное положение границы между линейными высоко- и низкочастотными аппроксимациями в принятой модели соответствует $l \cong 0.3\lambda$ и практически не зависит от изменения величины δK в 2–3 раза. Переходя к нормированным значениям размера (частоты) и сечения обратного рассеяния, получаем формулы, простые и удобные для расчета характеристик $\sigma^*(l^*)$ медузоподобных обитателей ЗРС. В области высоких частот:

$$\sigma^* \cong 2.5 \times 10^{-5}, \text{ при } l^* > 0.3 \qquad (6)$$

в области низких частот:

$$\sigma^* \cong 3 \times 10^{-3}(l^*)^4, \text{ при } l^* < 0.3. \qquad (7)$$

Результаты расчета по этим формулам нанесены на рис. 4 в виде линий 7 и 8. Использовать эти выражения для оценок рассеивающих свойств организмов этой же группы, но имеющих существенно другую конфигурацию, можно лишь после дополнительных исследований возможности применения для их описания сферической модели.

Общее рассмотрение рис. 4 позволяет в широкой полосе нормированных частот, от $l^* \ll 1$ до $l^* \cong 10$–15, сравнить интенсивности обратного рассеяния звука организмами ЗРС, имеющими одинаковые характерные размеры, но принадлежащими к разным по акустическим свойствам группам.

Несмотря на всю приближенность сделанных выше оценок, ясно, что сечения рассеяния рыб с плавательным пузырем в низкочастотном диапазоне на несколько порядков больше сечений рассеяния любых других обитателей ЗРС того же размера. В области высоких частот, $l^* > 1$, нормированные величины сечений обратного рассеяния большей части организмов значительно выше, чем на низких частотах. Однако исключением и здесь остаются рыбы с плавательным пузырем, для которых высокочастотные значения σ^* остаются меньше резонансных, относящихся к низким частотам.

Обращает на себя внимание относительно высокий уровень низкочастотных сечений рассеяния медуз. По-видимому, это можно объяснить несовершенством принятой нормировки при существенных различиях в форме моделей. Объемы моделей рачков и рыб при одинаковых размерах l не сильно различаются между собой, так как и те и другие имеют сильно продолговатую форму; объем же сферической модели медузы при том же значении l значительно больше, и это не компенсируется на низких частотах принятой нормировкой. Если рассмотреть некий условный организм, близкий по форме тела к рачкам и рыбам, а по акустико-механическим свойствам к медузам, то можно показать, что на низких частотах величина его сечения обратного рассеяния будет по крайней мере на порядок меньше, чем показывает линия 8 на рис. 4; штриховая линия 10, нанесенная на этом рисунке, соответствует условному организму.

Увеличение нормированного сечения обратного рассеяния ракообразных в области высокочастотных значений l^* определяется особенностью строения их тела: наличием сплошного панциря, окружающего мягкие ткани; его вклад в поле, рассеянное рачком, заметно растет при повышении частоты. Ни рыбы, ни медузы не имеют аналогичных особенностей строения тела.

Графики рис. 4 позволяют оценивать и абсолютные значения сечений обратного рассеяния организмов, обитающих в ЗРС, и их частотные характеристики $\sigma(f)$. Каждому значению l^* при выбранном значении размера l соответствует частота звука $f = c(l^*/l)$, и, наоборот, каждой частоте f при выбранном размере организма соответствует нормированное значение $l^* = l/\lambda$. Это позволяет при любых конкретных значениях l и f определить по графикам рис. 4 нормированную величину σ^* организма каждой из групп и рассчитать абсолютную величину сечения обратного рассеяния как $\sigma(f) = \sigma^* l^2$.

В качестве примера рассмотрим численные характеристики рассеяния рачка длиной 5 см на частоте 5 кГц ($\lambda = 30$ см). Для этого случая нормированная величина $l^* = 0.17$ и нормированное сечение рассеяния, согласно кривой 6 на рис. 4, равно $\sigma^* = -75$ дБ относительно 1, или $\sigma^* \cong 3 \times 10^{-8}$. Значение абсолютной величины сечения обратного

рассеяния легко рассчитать как $\sigma = \sigma^* l^2 = = 7.5 \times 10^{-7}$ см^2. Для получения соответствующей частотной характеристики следует в высокочастотном диапазоне повторить расчет при других частотах, а в низкочастотном – воспользоваться тем, что изменения σ при постоянном l = const пропорциональны f^4.

Таким образом, графики рис. 4 не только дают наглядное представление о соотношении интенсивности рассеяния звуковых волн обитателями ЗРС разных групп, но и позволяют относительно просто оценивать абсолютные величины их сечений обратного рассеяния в широком диапазоне частот и размеров.

Мы глубоко благодарны безвременно ушедшему из жизни В.Г. Самоволькину, нашему коллеге, внесшему неоценимый вклад в экспериментальные исследования по тематике представленной работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 01-05-64735.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Benoit-Bird K.J., Whitlov W.L.* Target strengths measurements of Hawaiian mesopelagic boundary community animals // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 110. № 2. P. 812–819.
2. *Андреева И.Б.* О рассеянии звука газовыми пузырями рыб в глубоководных звукорассеивающих слоях океана // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 1. С. 20–24.
3. *Лебедева Л.П.* Измерение динамического комплексного модуля сдвига тканей животных // Акуст. журн. 1965. Т. 11. № 2. С. 197–200.
4. *Лебедева Л.П.* Исследование рассеяния звука на моделях морских животных / Диссертация. Акустич. ин-т и Ин-т океанологии АН СССР, 1966.
5. *Андреева И.Б.* Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях // Акустика океана / Под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 696 с.
6. *Андреева И.Б., Самоволькин В.Г.* Рассеяние акустических волн на морских организмах. М.: Агропромиздат, 1986. 104 с.
7. *Love R.H.* Target strength of an individual fish at any aspect // J. Acoust. Soc. Am. 1977. V. 62. № 6. P. 1397–1403.
8. *Андреева И.Б., Тарасов Л.Л.* Рассеяние акустических волн мелкими ракообразными // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 2. С. 149–153.
9. *Андреева И.Б., Лысак Д.П.* Рассеяние звука ракообразными и их скоплениями в океане // Океанология. 1985. Т. 25. № 3. С. 425–431.
10. *Андреева И.Б., Тарасов Л.Л.* Рассеяние акустических волн медузами и их скоплениями // Океанология. 1985. Т. 25. № 1. С. 43–48.

Acoustic Properties of Marine Animals Forming Deep Scattering Layers of the Ocean

I. B. Andreeva and L. L. Tarasov

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: tarasov@akin.ru

Acoustic models are considered for different animals that inhabit the deep scattering layers of the ocean and form a scattered acoustic field. These animals are divided into several groups that differ in their acoustic properties: fish with and without the swimbladders, crustaceans, small squids, and other animals whose body consists of soft tissues and has no hard or gaseous inclusions. Normalized criteria are chosen for the quantitative comparison of the scattering properties of the animals. For the animals of each group, computational models are presented and analyzed. Generalized curves are constructed for the quantitative comparison of the backscattering cross sections of animals from different groups and of different size at different sound frequencies. In addition, these curves allow one to estimate the absolute values and the frequency characteristics of the scattering cross sections of animals for wide frequency and size ranges.