

УДК 551.463.2

ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИЕ СЛОИ – АКУСТИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ТОЛЩИ ВОД ОКЕАНА

© 1999 г. И. Б. Андреева

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 03.09.98 г.

Звукорассеивающие слои (ЗРС) – акустические неоднородности океана, сформированные дискретными рассеивателями – мелкими морскими организмами. В работе обобщены результаты исследований рассеивающих свойств таких организмов и зависимостей их сечений рассеяния от структуры тела, размеров, частоты и ракурса облучения. Результаты этих исследований в принципе позволяют расчетным путем перейти к численным значениям акустических характеристик ЗРС. Однако существующая количественная биологическая информация о фауне слоев разных регионов Мирового океана для этих целей явно недостаточна и оценку акустических характеристик ЗРС приходится делать по результатам прямых натурных акустических измерений. Большая часть исследователей-акустиков работала в диапазоне частот 2–20 кГц и общее число точек, где проводились измерения, на акватории Мирового океана заметно превышает тысячу. Нами просмотрены и частично уже внесены в компьютерную базу данных результаты измерений, выполненных как в Акустическом институте (при нашем участии), так и в большей части научных публикаций других исследователей. На основании анализа этих материалов оценены возможные пределы изменений таких характеристик ЗРС как коэффициент объемного обратного рассеяния, его интеграл по глубине (сила слоя), глубины залегания слоев и типичные зависимости этих величин от частоты, времени суток и некоторых географических особенностей акваторий. Рассмотрены возможности решения обратных задач – оценки характеристик фауны звукорассеивающих слоев по результатам измерения их акустических характеристик.

Акустико-механические свойства тканей тела любых организмов, обитающих в водах океана, в большей или меньшей степени отличаются от соответствующих свойств морской воды. Это делает каждый организм дискретной неоднородностью в толще воды, которая рассеивает акустические волны. Пространственно ограниченное скопление живых организмов в воде также можно рассматривать как акустическую неоднородность, образованную беспорядочно расположенными дискретными рассеивателями. Такими неоднородностями в океане, в первую очередь, являются звукорассеивающие слои (ЗРС), а также стаи рыб и рачков. Свойства таких неоднородностей зависят от акустических свойств отдельных рассеивателей, от их концентрации в пределах скопления, от размеров и конфигурации последнего. Характерные размеры обитателей ЗРС находятся в пределах от 1 до 20 см, а характерные размеры рыб в стаях могут быть заметно больше.

Характеристикой рассеивающих свойств отдельного морского организма является величина его поперечного сечения рассеяния, которая зависит, в основном, от двух факторов: (1) от структуры тела и акустической контрастности его тканей по отношению к воде; и (2) от отношения характерного размера L рассеивателя к длине λ

акустической волны, падающей на него. Полное сечение рассеяния σ_0 характеризует суммарную мощность, рассеиваемую неоднородностью по всем направлениям. Эта величина не дает информации об индикатрисе рассеяния и с трудом поддается экспериментальному определению, особенно в натурных условиях. В силу этих и некоторых других обстоятельств при исследованиях в океане измеряют сечение рассеяния в некотором выбранном, чаще всего в обратном (локационном), направлении. Мы будем обозначать его σ . Оно определяет мощность, рассеиваемую в выбранном направлении, в расчете на единицу телесного угла.

По характеристикам сечений рассеяния основную часть обитателей ЗРС можно разделить на четыре группы: рыбы с плавательным пузырем и другие животные, в теле которых есть газонаполненная полость; рыбы без пузыря, обладающие достаточно жестким скелетом; ракообразные, имеющие жесткий панцирь, и медузоподобные организмы, в теле которых отсутствуют как жесткие, так и газонаполненные включения. Анализ результатов многочисленных лабораторных измерений и модельных расчетов сечений рассеяния в обратном направлении, индикатрис рассеяния и угловых зависимостей сечений обратного

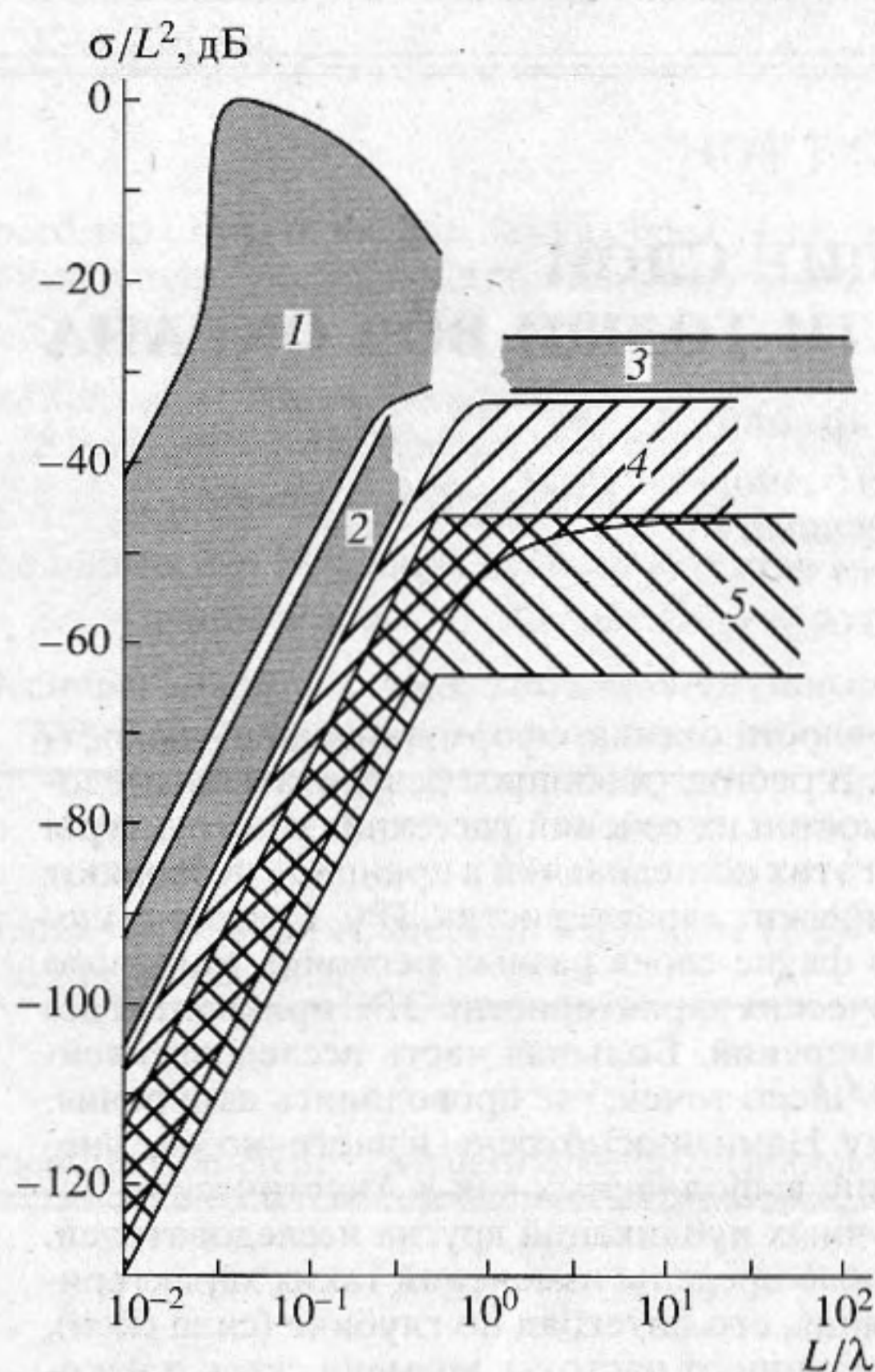


Рис. 1. Сечения обратного рассеяния мелких морских организмов. 1 – рыбы с плавательным пузырем, 2 – рыбы без пузыря, 3 – любые рыбы, 4 – ракообразные, 5 – медузоподобные.

рассеяния мелких морских и пресноводных организмов (см., например, [1–5]) позволил оценить типичные области значений величин σ для животных перечисленных выше групп (см. рис. 1). На этом рисунке обе шкалы нанесены в относительных единицах, что позволило объединить характеристики организмов одной группы независимо от их размеров. При этом величина сечения рассеяния (вертикальная ось на графике) нормирована на квадрат характерного размера L рассеивателя, а размер рассеивателя L (горизонтальная ось) – на длину акустической волны λ . Для каждого значения L эти кривые определяют вид частотной зависимости; единице на горизонтальной шкале соответствует частота, для которой $L = \lambda$.

Ширина каждой заштрихованной области определяется типичными вариациями величин σ , не учитываемыми принятой нормировкой. На высоких частотах, при $L > \lambda$, величина σ слабо зависит от частоты, примерно пропорциональна L^2 и сильно изменяется при смене ракурса облучения. Это в основном и определяет ширину заштрихованной на рисунке полосы на высоких частотах.

При $L < \lambda$ зависимость от ракурса облучения пропадает, и сечение рассеяния организмов без газовых полостей при понижении частоты почти сразу начинает уменьшаться как произведение четвертой степени частоты и квадрата объема рассеивателя (известный закон Рэлея). В этой области частот ширина заштрихованной полосы определяется в основном различиями свойств тканей и конфигураций (точнее величин объема) разных рассеивателей при одинаковых значениях их характерных размеров.

Для организмов, в теле которых есть газонаполненная полость, например, плавательный пузырь рыбы, частотная зависимость сечения рассеяния имеет более сложный характер, так как такая полость является акустическим резонатором. Свойства такого резонатора довольно давно изучены [1, 6]. Основным назначением газонаполненного плавательного пузыря рыб является обеспечение ее нейтральной плавучести на разных глубинах, т.е. компенсация избыточного, сравнительно с водой, веса тканей тела. Для мелких рыб это достигается при объеме полости в 4–6% от общего объема рыбы. Резонансные явления развиваются при L/λ равных 0.02–0.80, что меньше 1. При размерах организмов, обитающих в ЗРС, это соответствует частотам, лежащим в основном в области единиц кГц. Резонансная частота приближенно может быть рассчитана как [7]

$$f_r \cong \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{P + \mu}{\rho}}, \quad (1)$$

где a – радиус сферы, равной по объему полости плавательного пузыря, P – статическое давление на глубине обитания рыбы, μ – модуль сдвига тканей тела, окружающих пузырь, ρ – плотность воды. Влияние модуля сдвига заметно только при небольших глубинах, где статическое давление невелико. Величины σ организмов, имеющих газовую полость, достигают на резонансе максимальных значений, равных [7]

$$\sigma_r = a^2 Q^2, \quad (2)$$

где Q – добротность резонатора. Обычно она лежит в пределах 6–8 и трудно поддается априорной оценке. Резонансное значение σ_r во много раз больше сечений обратного рассеяния других животных того же размера. Резонансные процессы приводят к тому, что сечения рассеяния рыб с плавательными пузырями при $L/\lambda < 1$ не уменьшаются сразу с уменьшением L/λ , а начинают расти. Из-за некоторого разброса величин добротности и зависимости рассматриваемых процессов от глубины, в этой зоне происходит и расширение заштрихованной полосы, как это и видно на рис. 1. Только на частотах ниже области резонансов величина сечения рассеяния начинает быстро уменьшаться в соответствии с законом Рэлея для малых

рассеивателей (см. выше). В области резонансов индикатриса рассеяния сферична.

Звукорассеивающие слои открытого океана представляют собой горизонтально вытянутые скопления живых организмов, рассеивающих звук. Их протяженность составляет сотни и тысячи километров и они образуют непрерывную, хотя и неоднородную, пелену, которая тянется через все океаны от одного континентального склона до другого. Глубина залегания ЗРС и их вертикальная протяженность составляют сотни метров. Одной из количественных акустических характеристик ЗРС может быть коэффициент объемного рассеяния. Концентрация рассеивателей в ЗРС мала и это позволяет ограничиться в описании слоев приближением теории однократного рассеяния и рассчитывать этот коэффициент как сумму сечений рассеяния дискретных неоднородностей, находящихся в среднем в единице объема среды. Используя величины полного, (σ_0) или обратного (σ) сечений рассеяния, можно вычислить соответственно полный (m_0) или обратный (m) коэффициенты объемного рассеяния. Обе эти величины зависят от частоты и от глубины. Их распределения по глубине и частоте дают наиболее полное описание акустических свойств рассеивающего слоя, его интенсивности и положения в глубинах океана.

Большая горизонтальная протяженность звукорассеивающих слоев делает удобным использование еще одной количественной характеристики их акустических свойств. Эта величина – сила слоя M – характеризует суммарный эффект рассеяния звука вертикальной колонкой водной среды, “вырезаемой” в границах ЗРС и имеющей единичное сечение. Величина силы слоя определяется как

$$M = \int_{z_1}^{z_2} m dz. \quad (3)$$

Здесь z_1 и z_2 – глубины верхней и нижней границ рассеивающего слоя. Использование этой величины весьма распространено в научной литературе по акустике ЗРС, хотя и несет в себе значительно меньше информации, чем зависимости коэффициента рассеяния от глубины.

В работах [8, 9] применительно к объемным неоднородностям, образованным дискретными рассеивателями, получен критерий допустимости приближения теории однократного рассеяния. Если пренебречь эффектом поглощения в организмах-рассеивателях, что обычно делается при рассмотрении звукорассеивающих слоев, то этот критерий можно записать в простой и наглядной форме:

$$r < m_0^{-1}. \quad (4)$$

Здесь r – среднее расстояние, пробегаемое звуковыми волнами (прямой и рассеянной каждым препятствием) в пределах рассеивающей неоднородности. Значение m_0 в ЗРС практически всегда остается ниже 10^{-5} 1/м, и, следовательно, r не менее сотен км. В типичных случаях распространения звука в океане пробег звуковых волн в пределах ЗРС не превышает сотен метров. Иное дело стаи рыб и рачков, где концентрация рассеивателей много выше. В работе [9] показано, что в плотных стаях мелких животных величина r падает до десятков и даже до единиц метров. Это делает весьма сомнительным допустимость использования теории однократного рассеяния, которая заложена в принципе работы большинства акустических приборов рыбопромысловой техники, предназначенных для количественных оценок числа относительно мелких рыб и рачков в плотных скоплениях.

Исследования в области морской биологии внесли неоценимый вклад в изучение звукорассеивающих слоев, особенно на его первом этапе. Информация о видовом и размерном составе фауны ЗРС позволила понять физический механизм рассеяния звука этими и другими океаническими биоскоплениями. Однако, морская биология, как правило, не дает ответа на вопрос о количественном составе обитателей ЗРС. К сожалению, не существует и биологических моделей, то есть данных о вертикальном распределении концентраций и размеров организмов тех видов, которые на данной акватории и частоте являются основными рассеивателями звука в ЗРС. Отсутствие этих сведений не позволяет, несмотря на развитость биолого-акустических моделей отдельных организмов, расчетным путем построить акустические модели рассеивающих слоев, позволяющие дать прогностические количественные оценки их акустических характеристик не только в целом по акватории Мирового океана, но даже и по отдельным его районам. Это коренным образом отличает исследования акустики бионеоднородностей океана от исследований влияния на звуковые волны неоднородностей гидрологических природы (турбулентность, внутренние волны и т.д.). Как следствие, вся информация о количественных акустических характеристиках звукорассеивающих слоев океана была получена путем прямых натуральных акустических измерений частотных и глубинных зависимостей величин коэффициента m и силы слоя M в разных районах.

В течение последних десятилетий был накоплен обширный экспериментальный материал по акустическим характеристикам звукорассеивающих слоев. Он был получен исследователями разных стран и общее число точек, где в Мировом океане были проведены акустические измерения, равно многим сотням и даже тысячам. Как правило, измерения охватывали глубины до 1.0–1.5 км

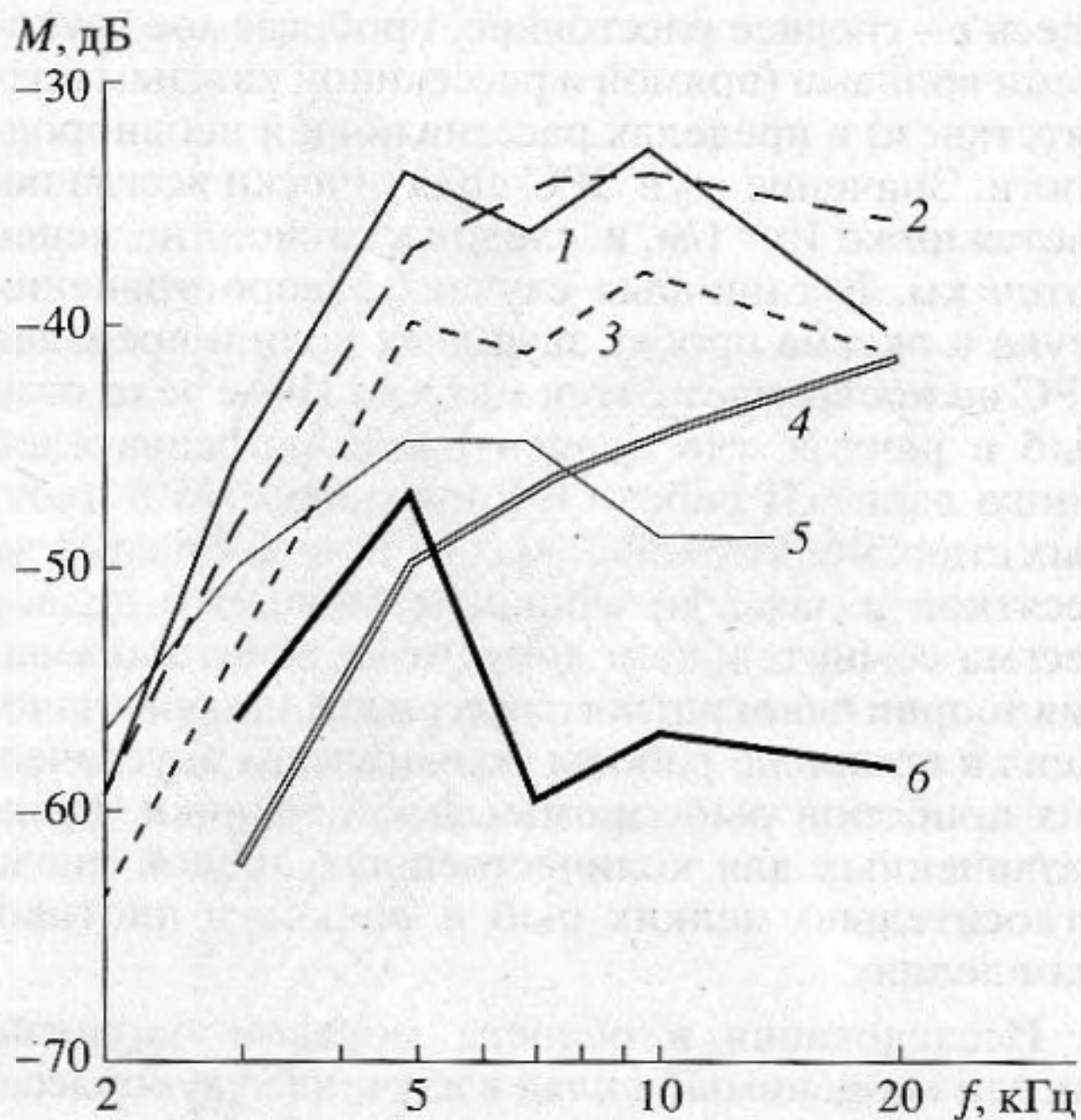


Рис. 2. Частотные зависимости силы слоя ЗРС в разных районах океана. 1 — тропическая зона Атлантики, 2 — центральная часть Индийского океана, 3 — Аравийское море, 4 — Восточная котловина в Тихом океане, 5 — район Тихого океана к востоку от Камчатки, 6 — Атлантика, к западу от Гибралтара.

и диапазон частот от 2–3 до 20 кГц. Но, к сожалению, далеко не вся полученная информация попала в доступные научные публикации. Российские данные, в основном, содержатся в отчетах организаций, выполнявших измерения в океане, и опубликованы лишь выборочно.

Мы задались целью объединить и обобщить доступные материалы по акустике ЗРС и составить, насколько это возможно, общее описание акустических свойств этих неоднородностей вод глубокого океана и закономерностей их пространственных изменений. Естественно, что в разных источниках экспериментальные данные приведены в различном виде, что требует, в большинстве случаев, их дообработки. К сожалению, большинство зарубежных авторов не описывает вертикальную структуру слоев и ограничивается только величинами силы слоя, не всегда указывая даже интервалы глубины, которым эта величина соответствует. Об этом приходится судить по некоторым косвенным признакам, связанным со способом измерений. Однако и такая неполная информация по акустике ЗРС все же представляет собой несомненную ценность.

Так как величина силы слоя ЗРС является величиной наиболее широко представленной в научных публикациях и отчетах, то, несмотря на ее ограниченную информативность, мы все же выбрали ее той акустической характеристикой ЗРС,

по которой проводится первоначальное обобщение. В нем мы рассматриваем величину M верхней, примерно километровой толщи вод океана, ее зависимости от частоты, от географических координат и от времени суток. Вторым анализируемым параметром является глубинная звукорассеивающих слоев и ее зависимости от тех же условий. Но эта последняя информация может быть почерпнута в основном только из отечественных источников, содержащих результаты широкополосных акустических измерений и силы слоя и стратификации рассеивателей. Эхолотные записи положения ЗРС в глубинах океана в подавляющем числе случаев сделаны только на одной частоте и не дают количественных оценок акустических характеристик рассеивающих слоев.

В настоящее время ведется сбор всех доступных материалов по акустике звукорассеивающих слоев, их необходимая дообработка и систематизация. Составляется компьютерная база данных, атлас информации об их акустических свойствах. В настоящей работе приводится общее описание физических характеристик ЗРС Мирового океана, которое может быть сделано на основании предварительного просмотра собранного материала и опыта наших многолетних исследований этого океанического явления.

На рис. 2 приведены частотные зависимости силы слоя, измеренные в экспедициях Акустического института в светлые часы суток в разных районах океана. Практически во всех измерениях в качестве источника звука использовался подводный взрыв небольшого заряда и широкополосный ненаправленный приемник. Точка взрыва и приемник располагались недалеко друг от друга (десятки метров), так что, во-первых, измерялись характеристики обратного рассеяния звука, а, во-вторых, все измерения можно было считать дистанционными. Это условие сохранялось независимо от глубины погружения заряда и приемника, так называемой точки излучения-приема. Глубина этой точки в разных опытах, в зависимости от поставленных задач, варьировалась от нескольких метров до нескольких километров. Возможная ошибка измерений акустических характеристик ЗРС не превышала 3–5 дБ на всех частотах. Кривые рис. 2 отражают основные особенности акустических свойств рассматриваемых неоднородностей и мы остановимся на них подробнее.

К настоящему времени твердо установлено, что для ЗРС любого района океана характерен малый уровень рассеяния на низких частотах. В светлое время суток это частоты 2–3 кГц и ниже, а в темные часы граница области низкой интенсивности рассеяния сдвигается до 1–2 кГц (о суточных изменениях характеристик ЗРС подробнее скажем ниже). Даже при небольшом повыше-

нии частоты относительно этой границы (днем до 5–6 кГц) везде происходит резкое возрастание силы слоя, достигающее часто сотен и тысяч раз (25–30 дБ на рис. 2). Участок зависимости $M(f)$ (f – частота), где резко возрастает интенсивность рассеяния, соответствует подходу к области резонансных явлений в плавательных пузырях наиболее крупных рыб, обитающих в ЗРС (длина до 10–15 см). Низкий уровень рассеяния в области ниже резонансов определяется практическим отсутствием как более крупных рыб с пузырями, так и любых организмов, с размерами, сопоставимыми с длиной акустической волны в этом частотном диапазоне. Для большей части методов измерений уровни рассеяния в ЗРС на частотах меньше 2–3 кГц оказываются ниже пороговой чувствительности.

Величина силы слоя в области резонансных явлений в ЗРС, то есть на частотах от 4 до 7 кГц в светлые часы суток, почти всегда близка к максимуму кривой $M(f)$, построенной в диапазоне частот от 1 до 20 кГц. Ход кривой и уровни рассеяния на частотах выше области резонансов сильно зависят от района океана. На многих акваториях величина силы слоя мало изменяется при росте частоты от 5 до 20 кГц (кривые 1–3 рис. 2). Однако, в некоторых районах сила слоя выше 5 кГц, хотя и медленно, но продолжает увеличиваться (кривая 4). Этот эффект наблюдался и при измерениях, выполнявшихся нами в районе Гольфстрима до значительно более высоких частот, до 100 кГц (методика локальных измерений описана в [10]). В небольшом числе районов выше четко выраженной области резонансов имеет место резкий спад интенсивности рассеяния (кривая б). Как видно из графиков, средняя величина силы слоя на частотах выше резонансной области изменяется от района к району в пределах примерно от –60 до –30 дБ, т.е. от 10^{-6} до 10^{-3} . Этими пределами в основном и исчерпывается возможный разброс величин силы слоя ЗРС в Мировом океане. В резонансной области, около 5 кГц, этот разброс несколько меньше и не превышает 20 дБ. Более высокие и более низкие значения этих величин встречаются лишь в очень редких случаях. К наиболее акустически сильным слоям относятся слои большей части вод Индийского океана, вод Атлантики на северо-восток от острова Ньюфаундленд, тропическая зона Атлантики, особенно ее восточная часть, восточная часть тропической зоны Тихого океана. К акустически слабым слоям – ЗРС циклонических круговоротов, север Тихого океана, Саргассова моря и восточной части Средиземного моря, а также некоторых других акваторий. Конечно, пока это очень приблизительное деление.

Форма и уровень частотных характеристик ЗРС позволяют сделать некоторые, хотя в основном качественные оценки особенностей фауны

этих слоев. Количественные оценки, определение типа организмов, их размеров и концентрации в ЗРС могут быть сделаны лишь в тех случаях, когда известно, что на данной частоте рассеяние создается организмами только одного типа. Классический случай – это существование на частотной зависимости четко выраженного пика (например, кривая б на рис. 2, пик на частоте 5 кГц). Это является бесспорным свидетельством того, что на этой частоте в процессах рассеяния доминируют рыбы с плавательным пузырем. Если при этом можно оценить глубину, с которой приходит рассеянный сигнал, то по формулам (1) и (2) и полученному объему резонансной полости легко определить и размеры рассеивающих рыб и их количество. С несколько меньшей уверенностью аналогичные оценки можно сделать (конечно, если известны глубины, с которых пришел рассеянный сигнал) и по значениям M , зарегистрированным на частоте резкого перелома частотной зависимости силы слоя у левого края резонансной области. На кривых 1–3 рис. 2 это относится к значениям M на частоте 5 кГц, так как с большой вероятностью можно утверждать, что интенсивность рассеяния и здесь определяется также только резонансным рассеянием на плавательных пузырях рыб определенного размера. По уровням рассеяния на более высоких частотах такие оценки сделать почти всегда невозможно, так как велика вероятность, что рассеянное поле создается здесь неизвестным конгломератом обитателей ЗРС. Возможно, что исключением могут оказаться однородные скопления рачков криля или других организмов, если известно, что они достаточно однородны по составу и размерам.

Кроме того, по виду кривых $M(f)$, типа приведенных на рис. 2, можно высказать и некоторые качественные соображения об особенностях фауны ЗРС. Во-первых, если выше области резонансов величина силы слоя остается на том же уровне или даже возрастает, то это свидетельство присутствия в слое большего числа относительно мелких организмов, размеры которых по мере повышения частоты становятся сопоставимыми с длиной волны λ , и их ткани постепенно начинают играть все большую роль в процессе рассеяния звука в ЗРС. Резкий спад силы слоя на частотах выше области резонансов свидетельствует об общей бедности фауны слоя.

Другой, весьма существенной характеристикой ЗРС как акустических неоднородностей океана, являются глубины их залегания, положения интервалов глубин, наиболее плотно населенных организмами, рассеивающими звук. Характерной особенностью ЗРС являются ежесуточные вертикальные миграции. В светлое время суток слои находятся в глубинах океана, а вечером поднимаются ближе к поверхности. Амплитуда миграций максимальна в тропиках и уменьшается при при-

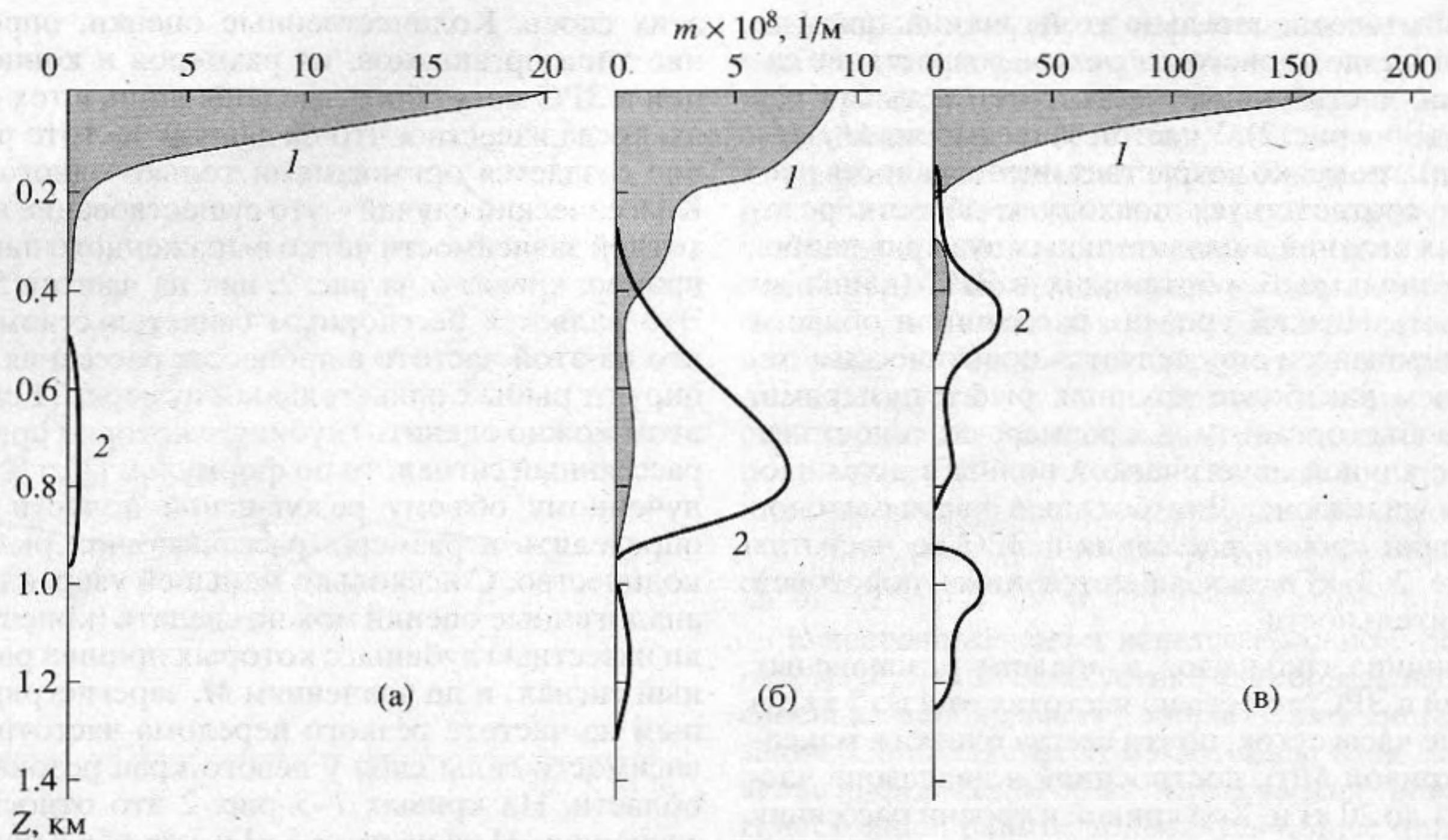


Рис. 3. Зависимость коэффициента обратного рассеяния в ЗРС от глубины в темное (1) и светлое (2) время суток на разных частотах: а – 3 кГц, б – 5 кГц, в – 20 кГц.

ближении к высоким широтам. Примерно вблизи 50° северной и южной широт вертикальные перемещения рассеивающих слоев практически исчезают. Главной акустической особенностью, связанной с миграцией слоев, является ночной рост интенсивности рассеяния на низких частотах, причиной которого является уменьшение резонансных частот плавательных пузырей рыб при подъеме их ближе к поверхности (см. (1)). Это приводит к сдвигу влево по оси частот всей области резонансных явлений, близкой к максимальным значениям силы слоя в рассматриваемом диапазоне частот. Сечения рассеяния организмов, лишенных газовых полостей, роль которых велика только в верхней части этого диапазона, остаются при этом практически неизменными.

На рис. 3 в качестве примера приведены вертикальные распределения коэффициента $m(z)$, зарегистрированные в светлое и темное время суток на нескольких характерных частотах. Для наглядности кривые приведены в линейном масштабе. Это результаты наших измерений, выполненных в июне 1984 г. в тропической зоне Атлантики (М.Ю. Андреев). Измерения велись обычным дистанционным методом при использовании взрыва небольшого заряда в качестве источника звука. Особенностью измерений было перемещение точки излучения – приема попеременно в положение над слоями, у поверхности, и в положение под слоями, на глубине около 1200 м. Это исключало мертвую зону под поверхностью океана и позволило более надежно регистриро-

вать форму как верхней, так и нижней акустических границ рассеивающих слоев.

На всех частотах рассеивающие слои в светлые часы суток наблюдались только на глубинах более 300–400 м. Их нижняя граница доходила до 1200–1300 м. Ночью они поднимались к поверхности, вблизи которой на всех частотах отмечались самые высокие значения коэффициента обратного рассеяния. В глубине океана уровень рассеяния резко уменьшался. Эти особенности характерны практически для всех акваторий, где ЗРС совершают заметные миграции по глубине. Конечно, численные вариации суточных изменений характеристик ЗРС на разных акваториях могут быть различными. Наиболее сильные изменения общего уровня рассеяния происходят на низких частотах. Так, при частоте рассеяния 3 кГц (рис. 3а) максимальное значение коэффициента m ночью выросло более чем в 50 раз, примерно от 3×10^{-9} до 2×10^{-7} 1/м. Соответствующая этому значению глубина изменилась от примерно 700 до нескольких метров, а величина силы слоя увеличилась в 15–20 раз. На частоте 5 кГц (рис. 3б) изменения менее разительны. Основной слой, рассеивающий на этой частоте, занимавший днем глубины 500–800 м, поднялся к самой поверхности, а нижняя граница интенсивного рассеяния оказалась около 400 м. При этом максимальное значение коэффициента m (8×10^{-9} 1/м) и величина силы слоя M (–45 дБ) остались почти неизменными – их суточные вариации оказались в пределах точности измерений, 2–3 дБ. Дневные глуби-

ны слоев на частотах 3 и 5 кГц совпадают, что позволяет предположить, что рассеяние в них происходит на рыбах с плавательными пузырями, резонанс которых близок к 5 кГц, а при частоте 3 кГц рассеяние соответствует левой ветви резонансной кривой.

Совсем иной характер вариаций характеристик ЗРС на частоте 20 кГц. Днем несколько слоев регистрировались на глубинах от 300 до 1200 м при величине коэффициента рассеяния m , не превышающей 3×10^{-7} 1/м. Ночью почти все рассеиватели поднялись в верхние 150 м и величина m возросла до 1.6×10^{-6} 1/м. При этом сила слоя днем и ночью оставалась практически неизменной и близкой к -40 дБ. Это говорит о доминировании упругих тканей тела в процессе рассеяния и об очень большой амплитуде суточных миграций рассеивателей (рачков или рыб без плавательных пузырей). Очень небольшая доля этих рассеивателей, 10–15%, осталась на глубине 300–500 м, что соответствовало глубине одного из слоев днем.

На рис. 4 приведены типичные отношения величин силы слоя в темные (M^*) и светлые (M) часы суток, вычисленные по результатам измерений на разных широтах разных океанов. Графики показывают, что это отношение почти всегда максимально на частотах около 3 кГц, где может достигать десятков и даже сотен раз (кривые 1–3). По мере увеличения частоты зондирования различие дневных и ночных значений силы слоя, как правило, уменьшается, и к 15–20 кГц кривые 1–3 приближаются к горизонтальной оси графика (0 дБ, отношение равно 1). Ход кривых лишний раз подтверждает, что на частотах в единицы кГц среди рассеивателей ЗРС доминируют плавательные пузыри рыб, а при десятках кГц – упругие ткани их тела. Подобный ход кривых $M(f)$ характерен практически для всех звуко-рассеивающих слоев, совершающих заметные вертикальные перемещения, независимо от района Мирового океана. Различия ограничиваются только численными значениями изменений силы слоя на низких частотах.

Вторая общая закономерность, которую иллюстрируют графики рис. 4, это уменьшение суточных низкочастотных изменений величин силы слоя на высоких, как северных, так и южных, широтах (кривые 4 и 5), где вертикальные миграции незначительны. Изменения силы слоя здесь почти не выходят за пределы точности измерений. Кроме того, следует отметить, что исходные данные для кривой 4 были получены в июне, когда освещенность круглосуточно была мала и почти неизменна. Материалы для кривой 5 относятся к августу, ближе к периоду равноденствия, когда освещенность изменялась в течение суток и вертикальные перемещения ЗРС были более вероятны.

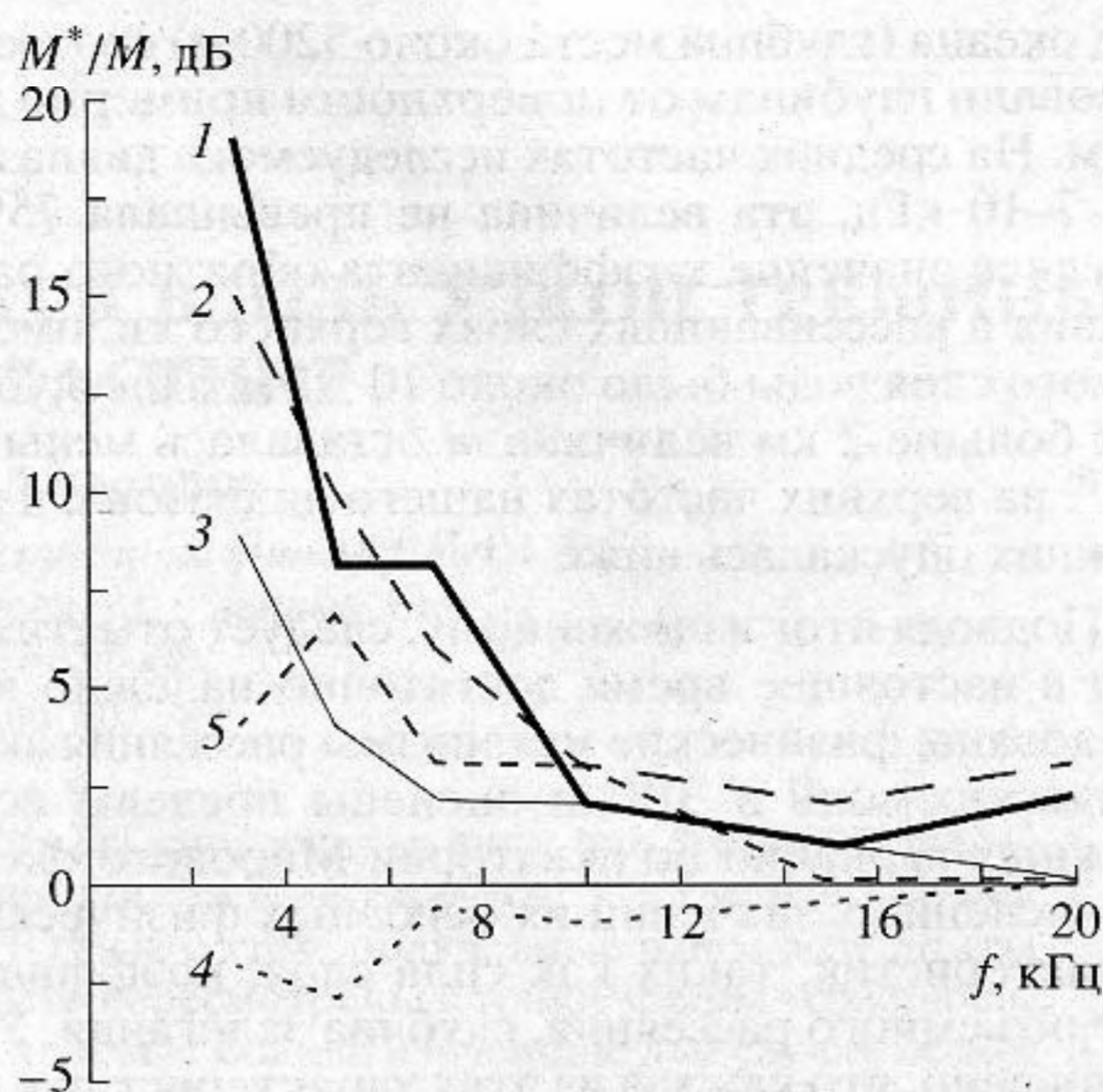


Рис. 4. Зависимость от частоты отношения величин силы слоя в темное (M^*) и светлое (M) время суток на разных географических широтах. 1 – Атлантика, 13° с.ш.; 2 – Тихий океан, экватор; 3 – Атлантика, 25° с.ш.; 4 – Тихий океан – 62° ю.ш., 5 – Атлантика, 62° с.ш. 1–3, 5 – материалы автора [4, 10].

Подавляющая часть измерений акустических характеристик звуко-рассеивающих слоев выполнена при зондировании с поверхности океана. При этом наиболее глубокие слои, особенно высокочастотные, во многих случаях могли оставаться незарегистрированными, как из-за поглощения звуковых волн при их распространении, так и из-за некоторого маскирующего действия вышележащих слоев. Это могло породить ошибочные представления о том, что высокочастотные слои в среднем лежат менее глубоко, чем низкочастотные. Однако, отметим, что в некоторых случаях, в частности, в области Гольфстрима, нам приходилось и на частоте 5 кГц регистрировать мощные слои на глубинах 900–1300 м с величиной силы слоя около 90% от общей величины, зарегистрированной на этой частоте. Пока мы не можем сказать насколько распространена в Мировом океане эта особенность вертикального распределения $m(z)$.

Аналогичные по методике измерения были проведены нами на глубинах до 5 км в восточной части Атлантики в точке около 41° с.ш. и 23° з.д. Опыты велись в мае 1967 г. в течение 10 суток. За счет большого удаления приемника от шумящего судна (глубины опускания точки излучения-приема были до 4–5 км), чувствительность измерительной системы увеличивалась, что позволяло измерять малые величины коэффициента обратного рассеяния. Было установлено, что на частотах 3–5 и 15–20 кГц более 95% от общей величины силы слоя, рассчитываемой от поверхности до

дна океана (глубина места около 5200 м) соответствовало глубинам от поверхности примерно до 1 км. На средних частотах исследуемого диапазона, 7–10 кГц, эта величина не превышала 75%. Среднее значение коэффициента обратного рассеяния в рассеивающих слоях верхнего километрового слоя воды было около 10^{-8} 1/м, а на глубинах больше 2 км величина m оставалась меньше 10^{-10} на верхних частотах нашего диапазона, а на нижних опускалась ниже 10^{-11} 1/м.

Подводя итог изложенному, следует отметить, что в настоящее время достаточно надежно исследованы физические механизмы рассеяния акустических волн в ЗРС и оценены пределы возможных вариаций по акватории Мирового океана численных значений их основных физических характеристик, таких как сила слоя, коэффициент объемного рассеяния, глубина залегания. Установлено, что каждая из этих характеристик и ее зависимости от частоты могут очень существенно изменяться от района к району, но закономерности этих изменений пока недостаточно изучены. Имеющийся обширный экспериментальный материал по акустическим исследованиям ЗРС глубокого океана позволяет приступить к изучению этих закономерностей, и мы надеемся получить в этом направлении новые и интересные результаты.

В заключение выражаю глубокую благодарность своим коллегам, Н.Н. Галыбину и Л.Л. Тарасову, принимавшим участие в многолетних исследованиях в океане, в обработке полученных материалов и их анализе. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 98-05-64849.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева И.Б. О рассеянии звука газовыми пузырями рыб в глубоководных звукорассеивающих слоях океана // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 1. С. 20–24.
2. Андреева И.Б., Самоволькин В.Г. Рассеяние акустических волн на морских организмах // М.: Агропромиздат, 1986. С. 104.
3. Love R.H. Target strength of an individual fish at any aspect // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 62. № 6. P. 1397–1403.
4. Macaulay M.C. A generalized target strength model for euphausiids, with applications to other zooplankton // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 62. № 5(1). P. 2452–2466.
5. Андреева И.Б., Тарасов Л.Л. Рассеяние акустических волн медузами и их скоплениями // Океанология, 1985. Т. 25. № 1. С. 43–48.
6. Feuillade C., Nero R.W. A viscous-elastic swimbladder model for describing enhanced-frequency resonance scattering from fish // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 6. P. 3245–3255.
7. Андреева И.Б. Рассеяние звука в океанических звукорассеивающих слоях // Акустика океана / Под ред. Л.М. Бреховских. С. 491–558. М.: Наука, 1975. 696 с.
8. 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.
9. Андреева И.Б., Белоусов А.В. О допустимости использования приближения однократного рассеяния акустических волн в задачах о скоплениях гидробионтов // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 4. С. 560–562.
10. Прозорова Н.П. Экспериментальные частотные характеристики резонансных рассеивателей в биологических скоплениях в океане // Океанология. 1972. Т. 12. № 6. С. 1091–1094.
11. Chapman R.P., Bluy O.Z., Adlington R.H., Robison A.E. Deepscattering layer spectra in the Atlantic and Pacific oceans and adjacent seas // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56. № 6. P. 1722–1735.

Sound Scattering Layers as Acoustic Inhomogeneities in the Ocean

I. B. Andreeva

Sound scattering layers (SSLs) are acoustic inhomogeneities observed in the ocean and formed of small sea creatures that play the role of discrete scatterers. This work summarizes the data on the scattering properties of such creatures and considers the scattering cross-sections of these creatures as the functions of their body structure and size as well as frequency and insonification aspect. In principle, these data are sufficient for calculating the acoustic characteristics of SSLs. However, the biological data available on the fauna of layers in different regions of the ocean are obviously insufficient for this purpose, which makes it necessary to estimate the acoustic characteristics of SSLs from direct full-scale acoustic measurements. For the most part, experimental data refer to the frequency range 2–20 kHz. The overall number of ocean areas where the measurements were carried out substantially exceeds a thousand. At the moment, we have at hand the experimental data obtained both at the Acoustics Institute (with our participation) and by other researchers. These data are partially included in our computer database. Based on their analysis, the possible limits of variability of different SSL characteristics are estimated. These characteristics include the volume backscattering coefficient, its integral value over the depth (the layer strength), and the layer depth. The typical behavior of these characteristics with frequency, time of day, and certain geographic features of ocean areas is also estimated. A possibility of solving the inverse problem of evaluating the SSL fauna characteristics from acoustic measurements is considered.