

ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИЕ СЛОИ ОТКРЫТОГО ОКЕАНА

Доктор физ.-мат. наук И.Б. Андреева

Канд. физ. мат. наук Н.Н. Галыбин

Л.Л. Тарасов

Звукорассеивающие слои открытого океана впервые были обнаружены эхолотами промера глубин и получили название "призрачное дно", так как запись на регистраторах была по виду неотличима от записи дна, но соответствовала глубинам, которые были значительно меньше, чем реальная глубина океана в данной точке. Довольно быстро была установлена биологическая природа звукорассеивающих слоев (ЗРС) и начато активное изучение этого явления.

Было установлено, что ЗРС - это горизонтально протяженные скопления мелких морских организмов, зоопланктона и рыб размером ~1-20 см. Обитатели ЗРС скапливаются на определенных глубинах, которые по тем или иным причинам являются для них предпочтительными. Днем эти скопления находятся, в основном, в интервале 300-1300 м, образуя почти горизонтальные слои, толщиной от 100 до 500 м. Ночью, в темноте обитатели ЗРС поднимаются ближе к поверхности. В дневные часы ЗРС часто состоят из нескольких ярусов, либо разделенных промежутками чистой воды, либо сильно различающихся величинами коэффициента рассеяния. По горизонтали ЗРС простираются через все океаны от одного материкового склона до другого. Акустически они воспринимаются как полупрозрачная пелена, которая слабо поглощает падающие на нее звуковые волны, но весьма интенсивно рассеивает их по разным направлениям, в том числе обратно в сторону излучателя.

Организмы, населяющие ЗРС, акустически можно рассматривать как совокупность дискретных рассеивателей, расположенных в пространстве случайным образом и настолько удаленных друг от друга, что при теоретическом описании явления достаточно ограничиться первым приближением теории рассеяния. В этом приближении коэффициент объемного рассеяния, равен средней сумме сечений рассеяния отдельных рассеивателей, находящихся в единице объема. При повышении концентрации рассеивателей, повышается, естественно, коэффициент объемного рассеяния, m_0 . В работах [1, 2] показано, что учитывать многократность процессов рассеяния звука в скоплении дискретных неоднородностей становится необходимым, если выполняется неравенство $m_0 > 1$,

где m_0 – коэффициент объемного рассеяния, а g – суммарная длина пути, пробегаемого в пределах рассеивающего слоя падающей и рассеянной волнами. В ЗРС эта величина, как правило, на несколько порядков меньше 1, но в стаях, характерных для плотных промысловых скоплений мелких рыб и рачков (например, криля), она может быть больше 1.

Активное изучение звукорассеивающих слоев стимулировалось рядом прикладных значений проблемы. ЗРС являются основной причиной возникновения объемной реверберации в океане, которая создает помехи работе многих гидролокационных устройств. С другой стороны, звукорассеивающие слои обеспечивают возможность [визуализации некоторых гидрологических неоднородностей](#), таких как слой скачка, внутренние волны и др. И, наконец, изменения интенсивности рассеяния звука в ЗРС, в известной мере, являются, показателем экологического состояния пелагиали океана.

Звукорассеивающие слои можно рассматривать как акустические неоднородности толщи воды, рассеивающие акустические волны в широком диапазоне частот. К сожалению, в морской биологии отсутствуют надежные количественные данные о концентрации в ЗРС организмов разных видов и размеров. Это не позволяет расчетным путем, исходя из хорошо развитых к настоящему времени акустических моделей морских организмов, оценивать характеристики звукорассеивающих слоев, как акустических неоднородностей толщи вод океана. Натурные измерения акустических характеристик ЗРС являются практически единственным источником количественной информации об этих характеристиках.

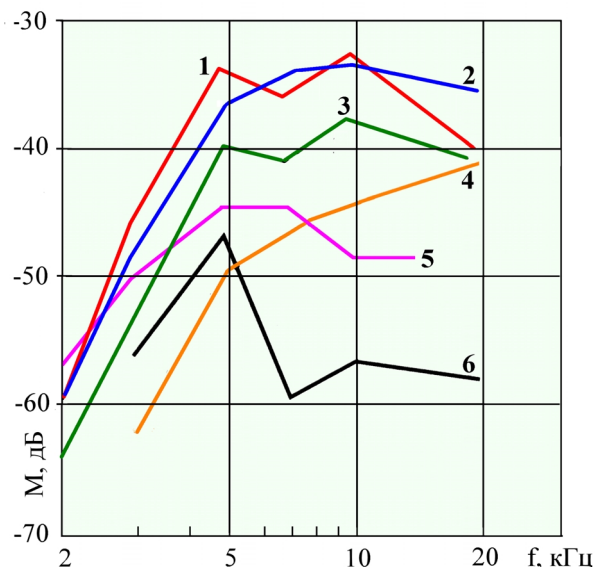
Целью большей части натурных экспериментов является определение зависимостей от глубины z и частоты f величин коэффициента объемного обратного рассеяния звука в толще воды, $m(z,f)$, и силы слоя $M(z,f)$; размерностью первой величины является m^{-1} , а величина силы слоя M , равная интегралу по глубине от коэффициента m , имеет размерность равную 1. Как правило, обе величины выражаются в дБ относительно их единичных значений и существенно зависят от частоты и глубины. В зависимости от пределов интегрирования различают полную величину силы слоя, M , и силу слоя отдельного яруса ЗРС, M_i .

В первом случае интегрирование происходит практически от поверхности океана до наибольшей в данном опыте глубины регистрации ЗРС; во вто-

ром - между верхней и нижней границами i -того яруса рассеивающих слоев. Величина M характеризует общую акустическую интенсивность ЗРС в данной точке океана на данной частоте.

Развитые к настоящему времени [методы натуральных измерений](#) акустических характеристик ЗРС различны и определяется задачами исследования. Подавляющая часть опытов проводилась исследователями разных стран при подповерхностном положении точки излучения-приема, причем широкополосным излучателем служил подводный взрыв небольшого заряда. Общее число измерений, сделанных на акватории Мирового океана этим и некоторыми другими более информативными методами, превышает несколько тысяч, и результаты большей их части занесены в разработанный в Акустическом институте [банк данных \(БД\)](#) [3].

Полная величина силы слоя M на частотах в диапазоне 3-20 кГц является наиболее широко представленной в научной литературе акустической характеристикой ЗРС. Вид ее частотной зависимости различен в разных районах океана [4].

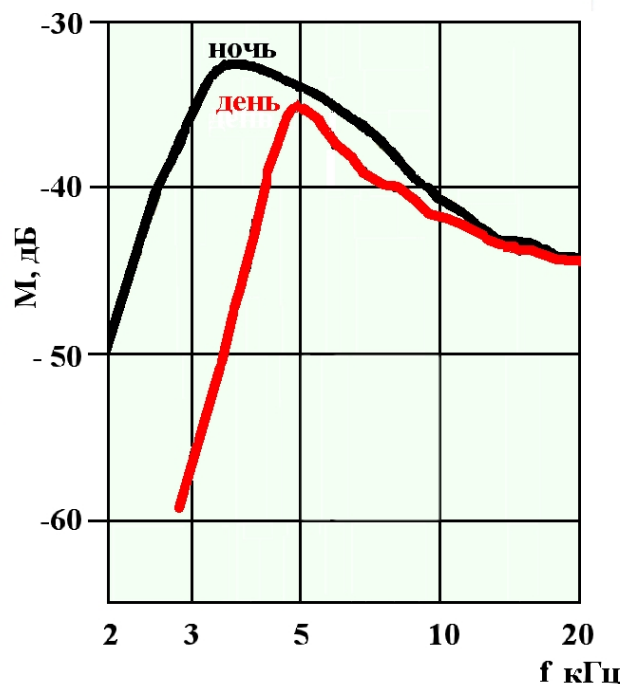


- 1—тропическая зона Атлантики,
- 2—центральная часть Индийского океана,
- 3—Аравийское море,
- 4—Восточная котловина в Тихом океане,
- 5—район Тихого океана к востоку от Камчатки,
- 6—Атлантика, к западу от Гибралтара.

*Частотные зависимости силы слоя M ,
в разных районах океана в светлое время суток*

Твердо установлено, что для звукорассеивающего слоя любого района океана характерен малый уровень рассеяния на низких частотах. В светлое вре-

мя суток это частоты 2 - 3 кГц и ниже. При повышении частоты до 4 - 5 кГц, происходит резкое возрастание силы слоя, которое может достигать сотен и тысяч раз, то есть, 25-30 дБ. Анализ показал, что на частотах до 7-8 кГц доминирует резонансное рассеяние на газонаполненных плавательных пузырях рыб, обитающих в ЗРС [5]. Малый уровень рассеяния на низких частотах свидетельствует об отсутствии в ЗРС крупных организмов с размерами, сопоставимыми с длиной акустической волны на этих частотах, а также рыб длиной больше 15-20 см, обладающих плавательным пузырем. На относительно высоких частотах, 15-20 кГц и выше, в ЗРС доминирует рассеяние на живых тканях [4] всей совокупности их обитателей. Сила слоя в области резонансного рассеяния во многих районах характеризуется более или менее выраженным локальным максимумом кривой $M(f)$, высота которого может достигать 10 -15 дБ и более.



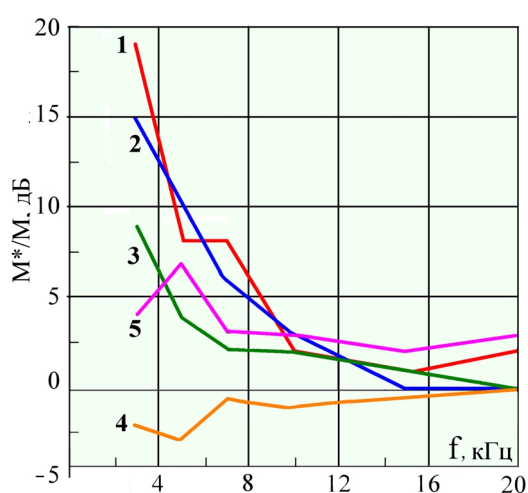
Характерные изменения частотных зависимостей

силы слоя от дня к ночи

При ночном подъеме звукорассеивающих слоев частотная характеристика силы слоя изменяется. На рисунке приведены две частотные зависимости силы слоя, зарегистрированные в одной и той же точке океана с интервалом в несколько часов в светлое и темное время суток.

Суточные изменения силы слоя сильно зависят от географической широты точки наблюдений, которая влияет на амплитуды вертикальных миграций ЗРС. Амплитуда миграций максимальна в тропической зоне, где достигает многих сотен метров, и уменьшается в зоне высоких широт, где суточные изменения освещенности заметно меньше.

От дня к ночи величина силы слоя M существенно возрастает на низких частотах в области резонансного рассеяния и остается практически без изменений на частотах выше 15 кГц, где доминирует рассеяние на упругих живых тканях обитателей ЗРС. Частота среза кривой $M(f)$ в нижней части диапазона, определяемая нижней границей резонансной области, которая ночью сдвигается влево (с 3-4 до, примерно, 1,5-2,0 кГц), что и приводит к значительному повышению уровня рассеяния на низких частотах. Этот эффект связан с понижением частоты резонансного рассеяния газовой полости при уменьшении глубины (статического давления).



1 – Атлантика, 13⁰ с.ш.;

2 – Тихий океан, экватор;

3 – Атлантика, 25⁰ с.ш.;

4 – Тихий океан, 62⁰ ю.ш.;

5 – Атлантика, 62⁰ с.ш.;

1-3,5 – материалы Акустического института

4 – Chapman R.P. (1974)

Отношение ночных значений величины силы слоя M^ к дневным значениям M на разных широтах.*

Из графиков видно, что ночной рост силы слоя M^*/M , почти всегда максимален в области резонансных частот около 3 кГц. На высоких частотах 15-20 кГц вариации величины силы слоя минимальны, имеют случайный характер и остаются в пределах ошибок измерений. На этих частотах резонансные эффекты в звукорассеивающих слоях незначительны, а рассеяние звука на упругих живых тканях практически не зависит от статического давления.

С использованием материалов [банка данных](#), сделаны некоторые обобщения характеристик ЗРС на акватории Мирового океана. Разработан метод и построены карты пространственного распределения акустической интенсивности ЗРС (величин силы слоя) в Атлантическом океане. Эти карты строились двумя различными способами: по изолиниям величин силы слоя M и по результатам стандартной статистической обработки всех имеющихся экспериментальных данных по этому параметру. В последнем случае учитывалось гидрологическое своеобразие районов океана, и в результате на разных частотах были выделены ЗРС однородные зоны, которые и были нанесены на карты. Кроме того, по интервальным оценкам силы слоя для каждой из таких зон построены соответствующие [частотные характеристики](#). Они показали, что средние уровни величин M , в разных зонах различаются значительно сильнее, чем вид их частотных характеристик.

Помимо величины силы слоя значительный интерес представляет и акустическая структура ЗРС по глубине. Глубины звукорассеивающих слоев, зависимости коэффициента рассеяния в них от глубины измерялись значительно реже, чем суммарная сила слоя M и такие измерения выполнялись, в основном, в натурных опытах Акустического института. С использованием этой части [банка данных](#) была определена [вертикальная структура](#) акустических характеристик звукорассеивающих слоев вдоль нескольких разрезов в Атлантическом океане [6].

В дальнейшем предполагается продолжить изучение пространственной и временной, в том числе многолетней изменчивости акустических характеристик звукорассеивающих слоев в районах Мирового океана, относящихся к различным природным зонам; изучить связи рассматриваемых характеристик с океанологическими особенностями акваторий; оценить возможности прогнозирования численных значений характеристик ЗРС в конкретных районах океана.

Литература

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

2. И.Б. Андреева, А.В. Белоусов. О допустимости использования приближения однократного рассеяния акустических волн в задачах о скоплениях гидробионтов. Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 4. С. 560-562.

3. И.Б. Андреева, Н.Н. Галыбин, Л.Л. Тарасов, В.Я. Толкачев. Акустическая интенсивность звукорассеивающих слоев центральной Атлантики. Акуст. журн. 2000. Т. 46, N 1, с. 21-27.

4. И.Б. Андреева. Звукорассеивающие слои - акустические неоднородности толщи вод океана. Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437-444.

5. И.Б. Андреева. О рассеянии звука газовыми пузырями рыб в глубоководных звукорассеивающих слоях океана. Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 1. С.20-24.

6. И.Б. Андреева, Н.Н. Галыбин, Л.Л. Тарасов. О вертикальной структуре акустических характеристик звукорассеивающих слоев океана. Акуст. журн. 2000. Т. 47. № 5.