АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2006, том 52, № 2, с. 195–200

УДК 534.222

СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ, РАССЕЯННЫХ В ЗОНУ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕНИ ТОНКОСТРУКТУРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ СКОРОСТИ ЗВУКА

© 2006 г. В. С. Гостев, А. В. Микрюков, О. Е. Попов, Р. Ф. Швачко

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

Поступила в редакцию 24.12.04 г.

При анализе результатов эксперимента в тропической зоне Индийского океана с использованием взрывных источников звука получено хорошее совпадение спектрально-энергетических характеристик сигналов, наблюдаемых в первой зоне геометрической тени, с компьютерными расчетами рассеяния звука на неоднородностях тонкой структуры фрактального типа. Сопоставление результатов расчетов частотных характеристик звуковых полей в зоне тени по волновой программе и методом сочетания лучевой акустики с волновыми актами рассеяния доказало адекватность обоих методов реальным процессам рассеяния и распространения звука в океане с тонкоструктурной стратификацией и возможность использования их для решения обратных задач.

PACS: 43.30.Ft

По мере накопления знаний о тонкой структуре поля скорости звука в реальной морской среде и экспериментальных данных по ее влиянию в различных частотных диапазонах на распространение звука, становится очевидной необходимость учета тонкой структуры при решении довольно широкого класса прикладных задач гидроакустики. К таким задачам можно отнести прогнозирование уровня звукового поля в зоне геометрической тени, оценку возможных флуктуаций параметров звуковых волн, дополнительного ослабления звука, учет уровней реверберации и т.п.

Неоднородности тонкой структуры представляют собой, как правило, сильно вытянутые в горизонтальном направлении резкоанизотропные образования. При этом характерное отношение горизонтальных размеров к вертикальным для слоистых образований с вертикальными масштабами порядка единиц–десятков метров составляет величину порядка 10^2–10^4.

Появление современных приборов непрерывного зондирования позволяет в настоящее время определять вертикальную структуру полей температуры и солености с неоднородностями метрового масштаба. Однако, как уже отмечалось, неоднородности тонкой структуры имеют анизотропную природу, в то время как существующие океанографические приборы предназначены для проведения измерений либо по вертикальным, либо по горизонтальным разрезам в течение довольно большого интервала времени, в котором среда претерпевает значительные изменения. Поэтому для получения мгновенной пространственной картины неоднородностей водной толщи необходимы альтернативные методы.

Одним из таких методов является интенсивно развиваемый в последнее время метод, основанный на анализе параметров акустических сигналов, наблюдаемых в зоне геометрической тени и проникших в нее в результате переизлучения звука неоднородностями тонкой структуры показателя преломления [1].

Механизм проникновения звука в зону тени основан на том, что имеет место режим резкоанизотропного рассеяния с максимумом переизлученного поля в направлении угла зеркального отражения от слоистых неоднородностей тонкой структуры. Максимальное переизлученние в зону тени происходит в области каустики, формирующейся в ближней озвученной зоне и являющейся границей зоны тени. Уровень звукового поля, регистрируемого в экспериментах на протяжении всей зоны тени, ниже уровня поля на каустике лишь на 20–40 дБ.

Наиболее надежно рассматриваемые сигналы регистрируются в экспериментах в тропических районах океана, где в диапазоне глубин 50–200 м существует резкий отрицательный градиент вертикального распределения скорости звука. При

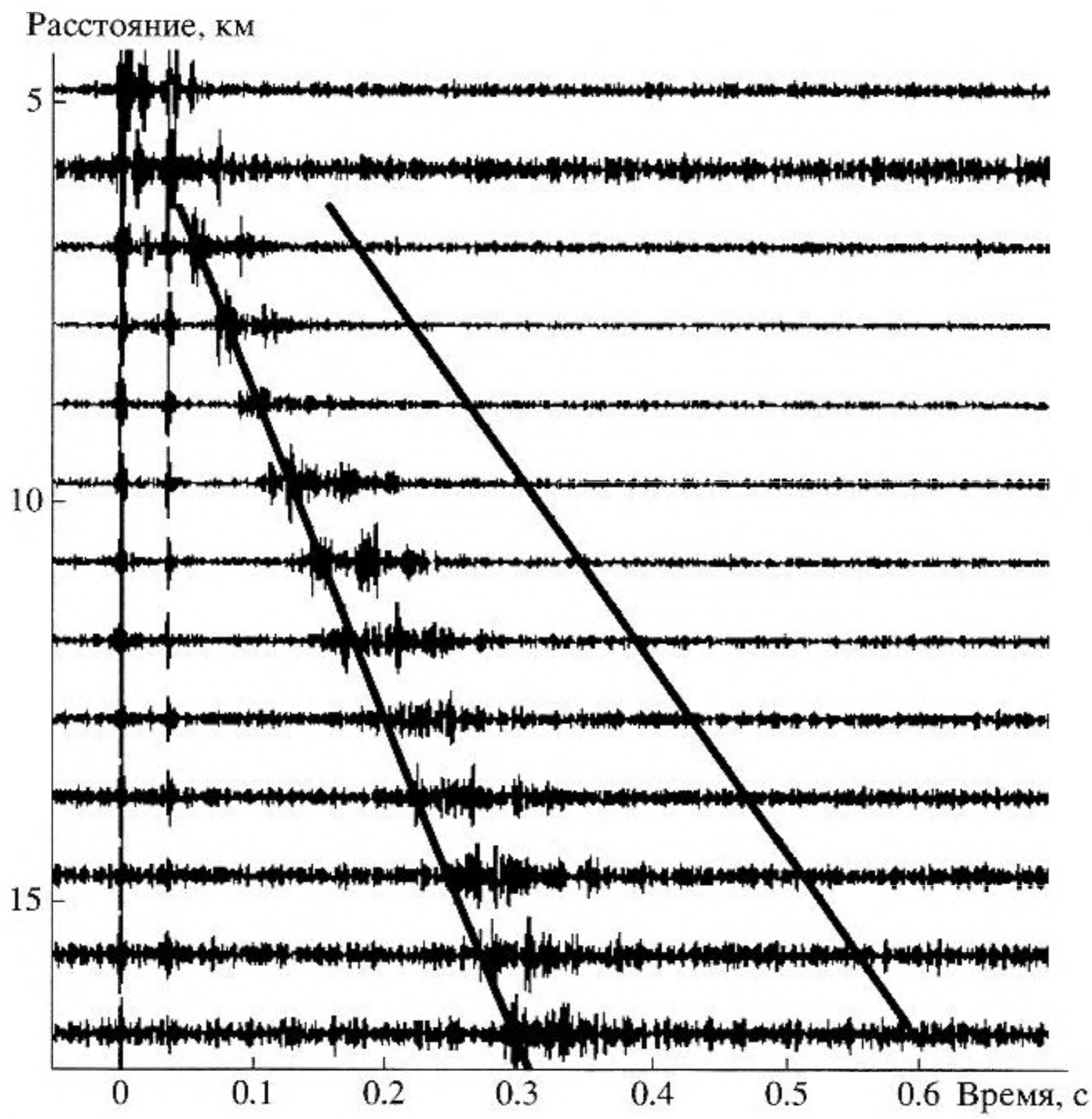

Рис. 1. Записи сигналов, зафиксированных в первой зоне тени при выполнении опыта в тропической зоне Индийского океана.

погружении источника ниже слоя скачка в ближнем звуковом поле в этом случае образуется каустика, являющаяся резкой границей зоны геометрической тени. В качестве примера на рис. 1 приведены записи сигналов в первой зоне тени при проведении опыта в тропической зоне Индийского океана с использованием взрывных источников звука. Горизонт излучения был равен 200 м, а приема – 350 м. Подрыв зарядов осуществлялся с интервалом по расстоянию около 1.0 км. За нулевой момент времени принято время прихода сигналов ликиджей из приповерхностного канала. Начало сигналов, переотраженных от тонкой структуры, соответствует левой наклонной прямой на рисунке. Сигналы донных отражений, приходящие со значительным отставанием, находятся за пределами рисунка.

До настоящего времени экспериментальные данные, получаемые в подобных экспериментах [2], интерпретировались, главным образом, с помощью лучевых представлений. Это давало возможность хорошо предсказывать наблюдаемые в эксперименте времена вступлений сигналов, их угловые характеристики и определять глубины, на которых произошло переизлучение на каустике звуковой волны в зеркальном направлении. Двумя наклонными линиями на рис. 1 отмечены рассчитанные интервалы времен, в течение которых на данном горизонте приема могли наблюдаться сигналы, переизлученные каустикой, формирующей границу зоны тени. Однако известно, что на глубинах океана ниже оси подводного звукового канала (1.5 км и более) тонкая структура, как правило, вырождается, и сигналы, переизлученные на этих глубинах, оказываются ниже уровня окружающего шума. Поэтому, если рассчитанное начало сигналов на записях рис. 1 достаточно хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемыми временами вступлений, то предсказанная продолжительность сигнала на данном расстоянии оказывается явно завышенной по сравнению с наблюдаемой. Для оценки амплитуд и длительности сигналов в зоне тени необходимо использовать информацию о вертикальной структуре неоднородностей поля скорости звука и ее влиянии на энергетические характеристики переотраженных сигналов. Наиболее полно учесть эту информацию при моделировании сигналов в зоне тени позволяют волновые методы расчета звуковых полей.

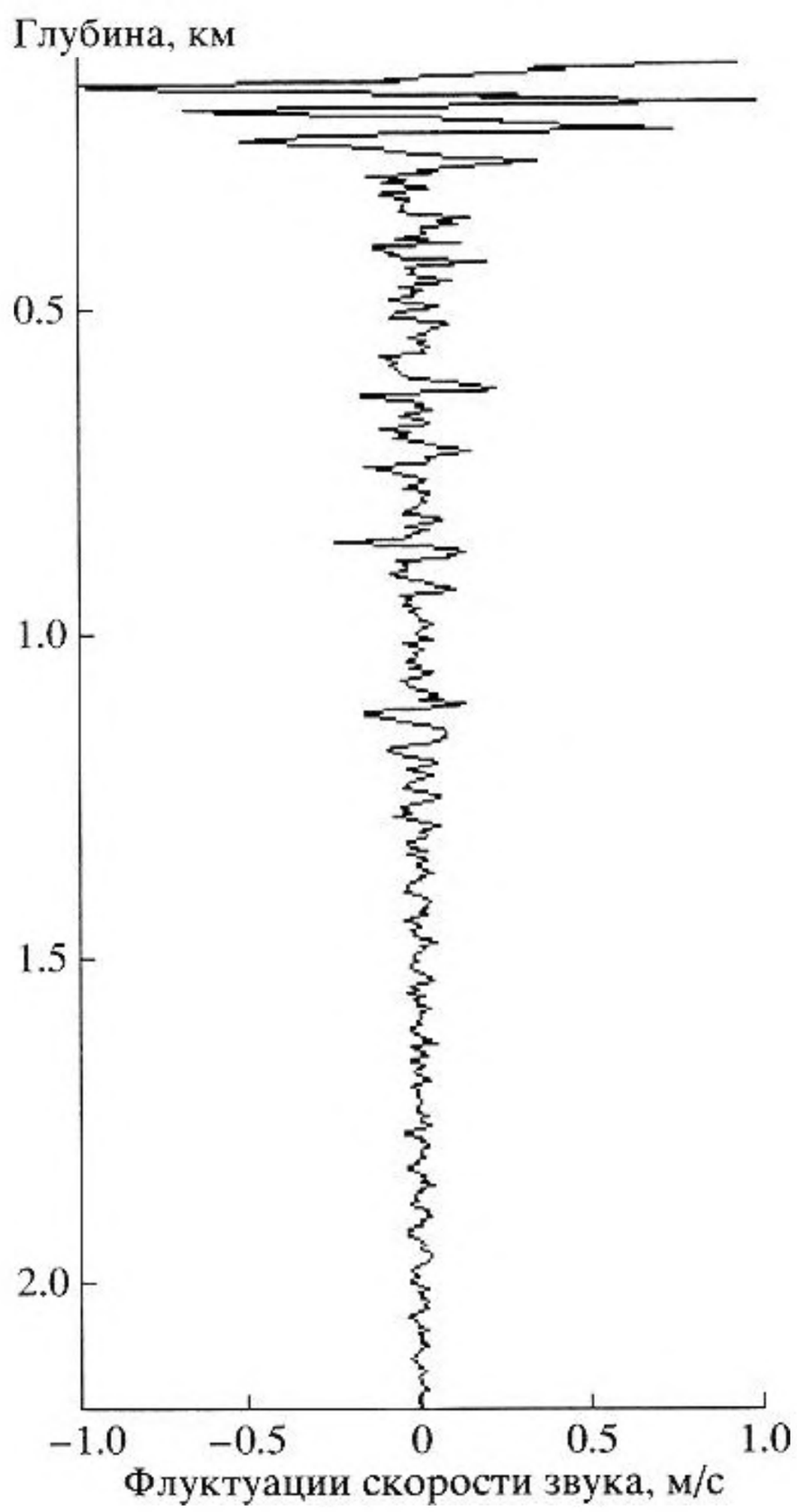

Рис. 2. Тонкоструктурная составляющая зависимости скорости звука от глубины.

При характерном вертикальном масштабе тонкой структуры порядка единиц–десятков метров, их горизонтальный размер будет лежать в пределах от единиц до десятков километров, что больше горизонтальной протяженности области формирования сигнала, переотраженного в зону тени. Этот факт позволяет рассчитывать сигналы в зоне тени в рамках модели плоскослоистого волновода.

При таком подходе измеренный в ходе эксперимента вертикальный профиль скорости звука, описывающий распределение тонкой структуры по глубине, достаточно точно определял бы основные параметры отраженных от тонкой структуры и проникших в зону тени сигналов. Для проверки эффективности такого подхода было проведено численное моделирование сигналов, приходящих в зону тени, и их сравнение с данными, полученными в ходе описанного выше эксперимента.

Для расчета сигналов, наблюдаемых в зоне тени, была использована волновая программа К.В. Авилова [3], реализующая широкоугольное параболическое приближение и позволяющая рассчитывать форму импульсных сигналов в двумерно неоднородном волноводе с практически любыми вертикальными профилями скорости звука в широком частотном и динамическом диапазонах. При расчете использовался профиль скорости звука, измеренный спустя несколько лет в районе работ с помощью зонда “Исток” с шагом по глубине 5 м в диапазоне глубин 0–4500 м. Такая дискретность измерения верти-

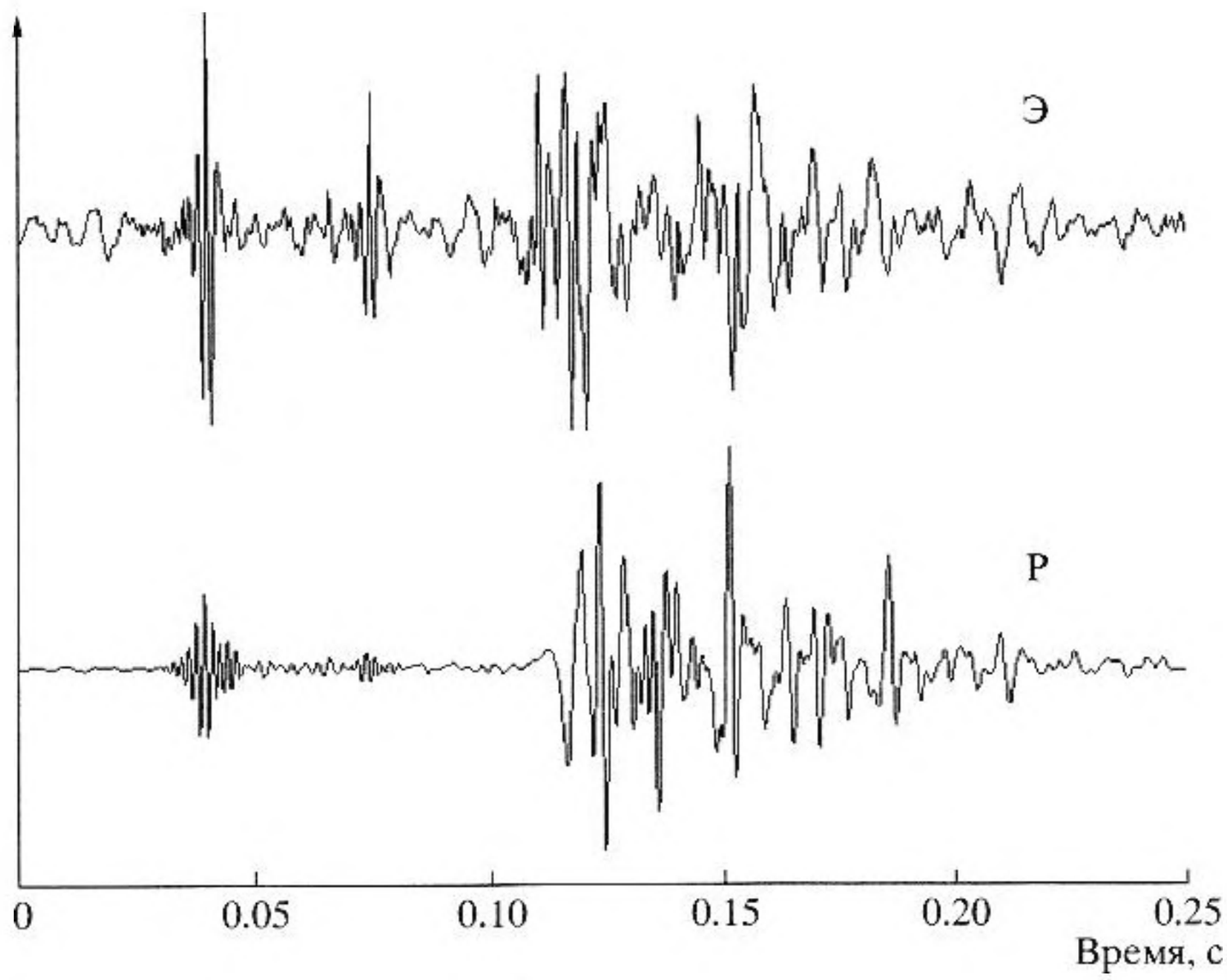

Рис. 3. Зарегистрированный (Э) и рассчитанный (Р) сигналы в зоне тени на расстоянии 7.9 км в полосе 60–700 Гц.

Рис. 4. Кривые спадания энергии импульсных сигналов с расстоянием в зоне тени. Сплошная кривая – расчет, кружки – эксперимент.

кального профиля скорости звука достаточна для расчетов рассеяния звука на частотах ниже 1000 Гц.

Тонкоструктурная составляющая зависимости скорости звука от глубины, полученная с помощью высокочастотного фильтра, пропускающего частоты с пространственным периодом не более 100 м, представлена на рис. 2.

На рис. 3 приведены зарегистрированный и рассчитанный сигналы в зоне тени на расстоянии 7.9 км в полосе 60–700 Гц. Первые два высокочастотных импульса – сигналы ударной волны и пульсации пузыря, приходящие из приповерхностного канала [4]. Далее приходят сигналы, отраженные от тонкой структуры. Наблюдается достаточно хорошее совпадение наблюдаемой и расчетной длительности сигналов, а также характерная временна́я структура с мощным начальным вступлением и последующим уменьшением амплитуды.

Достаточно хорошее совпадение наблюдается и для кривых спадания энергии рассчитанных и экспериментальных импульсных сигналов в зоне тени для диапазона расстояний 6.8–20 км (рис. 4). За 0 дБ в данном случае принят уровень интенсивности сигналов на расстоянии 6.8 км. Экспериментальные и рассчитанные разности спектров сигналов в освещенной зоне (на расстоянии 3.9 км) и сигналов, отраженных от тонкой структуры в зону тени (на расстоянии 7.9 км), осредненные в полосе частот 60–700 Гц, отличаются незначительно (на 1 дБ).

Таким образом, в частотном диапазоне от 60 до 700 Гц закон спадания звукового поля и форма сигналов в зоне тени хорошо описываются в рамках плоскослоистой модели волновода при учете наблюдаемой тонкоструктурной стратификации.

Полученные результаты позволяют провести численное моделирование влияния параметров тонкой структуры профиля скорости звука на спектрально-энергетические характеристики звукового поля в первой зоне геометрической тени. Согласно современным представлениям, тонкоструктурные неоднородности в океанском термоклине обладают фрактальными свойствами [5], что проявляется, в частности, в наличии степенного с дробным показателем автомодельного участка в их спектре $E_n(\kappa) \sim \kappa^{-\rho}$. Здесь κ – вертикальное волновое число неоднородностей. Показатель степени ρ может находиться в интервале $2 < \rho < 3$. Зависимость интенсивности I_s рассеянного звукового поля от частоты f также имеет степенной вид: $I_s \sim f^{-q}$, где $q = \rho - 5/3$. Указанная связь между q и ρ получена методом сочетания лучевой акустики с волновой теорией рассеяния с учетом частотных характеристик всех параметров и процессов, приводящих к формированию рассеянного поля в зоне геометрической тени [1]. Для описания частотной зависимости удобно пользоваться также сте-

Рис. 5. Уровни звукового поля в зоне тени: жирная линия – расчет по гладкому профилю, тонкая – по профилю с тонкой структурой.

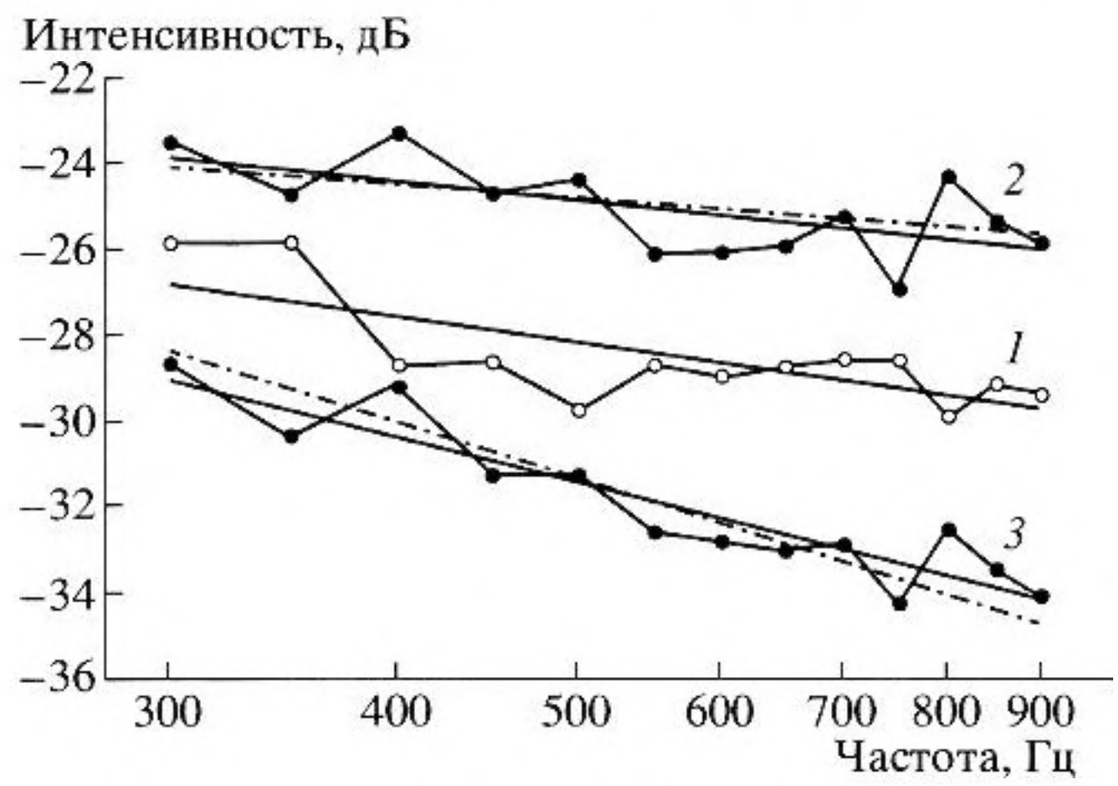

Рис. 6. Частотные зависимости интенсивности звукового поля в зоне тени:

1 – эксперимент, *2* – расчет для $\rho = 2$, *3* – расчет для $\rho = 3$; сплошные линии – аппроксимации по методу наименьших квадратов, штрихпунктирные – теоретические.

пенью спада γ интенсивности с ростом частоты в децибелах на октаву: $\gamma = 3q$.

В качестве гладкого вертикального профиля скорости звука использовался профиль, полученный из измеренного путем низкочастотной фильтрации с граничным вертикальным периодом 100 м. На этот профиль накладывались реализации флуктуаций тонкой структуры, которые моделировались так же, как и в работе [6]. С пространственной дискретностью 1 м генерировался гауссовый шум со среднеквадратичным значением флуктуаций скорости звука 0.2 м/с. Эта реализация белого шума с равномерным спектром подвергалась фильтрации, обеспечивающей спадание спектра в диапазоне масштабов 1–50 м по степенному закону $\rho = 2$ и $\rho = 3$. Полученные реализации умножались на экспоненциальный множитель, приводящий к уменьшению среднеквадратичного значения флуктуаций скорости звука в e раз на глубине 900 м.

Рассчитывалась частотная зависимость интенсивности рассеянного звукового поля на горизонте приема 350 м (горизонт излучения 200 м), осредненной на интервале расстояний от 8 до 17 км (рис. 5). Расчет проводился для диапазона частот 300–900 Гц с шагом 50 Гц. На рис. 6 представлены результаты расчетов: зависимость 2 соответствует $\rho = 2$, зависимость 3 – $\rho = 3$. Там же приведена экспериментальная частотная зависимость 1 средней энергии сигналов, отраженных от неоднородностей тонкой структуры скорости звука, для того же интервала расстояний 8–17 км. Энергия сигналов определялась в стогерцовых полосах с шагом 50 Гц от 300 до 900 Гц. Сплошными прямыми линиями проведены аппроксимации по методу наименьших квадратов, штрихпунктирными прямыми – теоретические зависимости с показателем степени $q = \rho - 5/3$. Для показателя степени $\rho = 2$ расчетное значение $q = 0.44$ (теоретическое 1/3), для $\rho = 3$–1.08 и 4/3 соответственно. Наблюдаемое на рис. 6 практически полное совпадение теоретических результатов, полученных аналитическим способом, с результатами компьютерного моделирования по волновой программе доказывает адекватность обоих методов реальным процессам рассеяния и распространения звука в океане с тонкоструктурной стратификацией.

Что касается экспериментальной зависимости, то ее показатель степени $q = 0.62$ лежит между расчетными значениями $q = 1/3$ и $q = 4/3$. Ей соответствует значение $\gamma = 1.86$ дБ на октаву. В работе [1] в диапазоне частот 0.63–3.15 кГц был получен спад интенсивности с ростом частоты на 5 дБ при пятикратном увеличении частоты, что соответствует $\gamma = 2.14$ дБ на октаву. В среднем можно считать, что $\gamma = 2$ дБ на октаву и, соответственно, $q = 2/3$ и $\rho = 7/3$.

Таким образом, решается обратная задача определения параметров тонкой структуры по результатам анализа спектрально-энергетических характеристик звуковых полей, наблюдаемых в зоне тени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 03-02-16565, 04-05-64557, 02-05-64265) и гранта НШ-1277.2003.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гостев В.С., Швачко Р.Ф.* Экспериментальные исследования звуковых сигналов, наблюдаемых в зо-

не геометрической тени в океане // ДАН СССР. 1985. Т. 282. № 5. С. 1082–1085.

2. *Гостев В.С., Носова Л.Н., Швачко Р.Ф.* Исследование звукового поля взрывного сигнала в зонах геометрической тени глубокого океана // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 2. С. 201–205.
3. *Авилов К.В.* Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали, и их численные решения // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 5–12.
4. *Авилов К.В., Микрюков А.В., Попов О.Е.* Влияние приповерхностного канала на степень засветки зоны тени в глубоком океане // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 6. С. 741–750.
5. *Любицкий А.А., Панчеха А.П.* Фрактальный анализ тонкой температурной структуры океанского термоклина // I Международная конференция "Термодинамика океана; микро- и мезомасштабы". Тезисы докладов. М. 2000. С. 23.
6. *Гостев В.С., Попов О.Е., Швачко Р.Ф.* Компьютерное моделирование звуковых полей в океане с тонкоструктурными неоднородностями // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 6. С. 778–784.

Spectral–Energy Characteristics of Sound Fields Scattered by Fine-Structured Inhomogeneities of Sound Velocity into the Geometrical Shadow Zone

V. S. Gostev, A. V. Mikryukov, O. E. Popov, and R. F. Shvachko

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia

e-mail: bvp@akin.ru

Abstract—In analyzing experimental results obtained with explosive sources in the tropical zone of the Indian Ocean, a good agreement was obtained for spectral-energy characteristics of signals observed in the first geometrical shadow zone with computer calculations of the sound field scattered by fine structure inhomogeneities of the fractal type. From the comparison of the results of calculating the frequency characteristics of sound fields in the shadow zone by the wave code and by the method combining ray acoustics with the wave theory of sound scattering, it was found that both methods are appropriate for describing the real processes of scattering and propagation of sound in the ocean with fine-structured stratification and that these methods can be used for solving inverse problems.