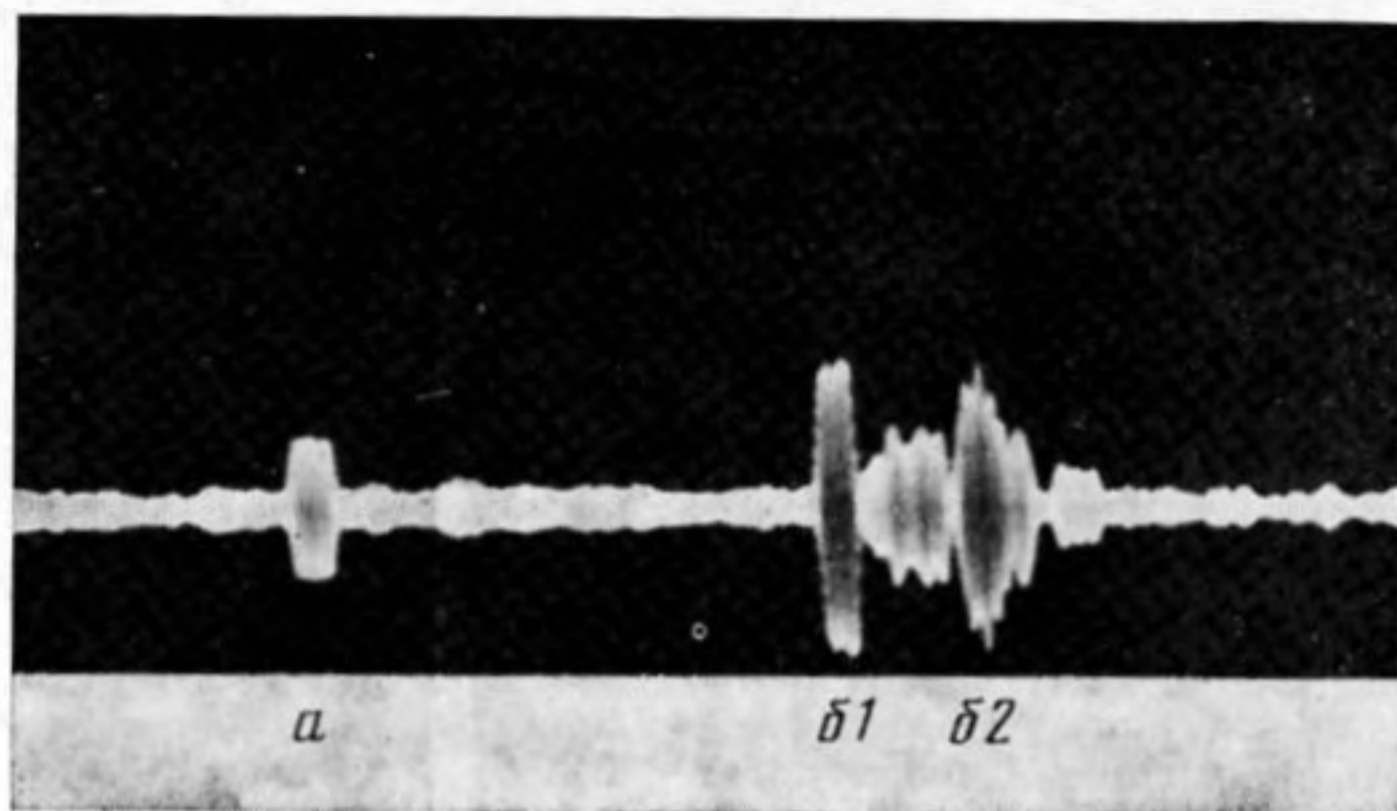


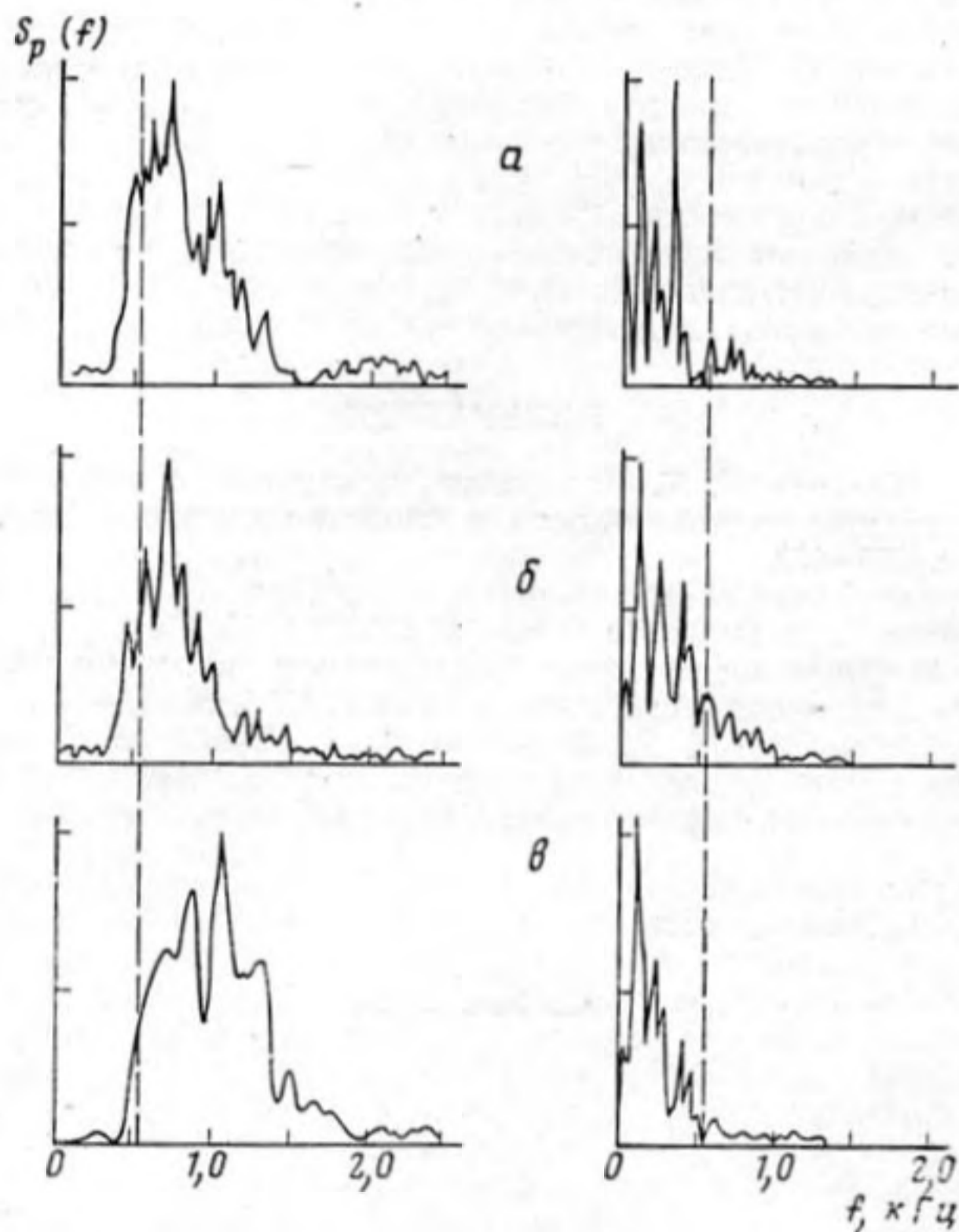
ЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В ЗОНЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕНИ В ОКЕАНЕ

Гостев В. С., Швачко Р. Ф.

В работах [1, 2] описаны экспериментальные исследования звуковых сигналов, проникающих в зону геометрической тени (ЗГТ) в океане по путям, противоречащим законам геометрической акустики. Анализ временной структуры приходящих в ЗГТ сигналов, показанных на фиг. 1, позволил идентифицировать их как сигналы, распространяющиеся по приповерхностному каналу (ликиджи) и сигналы, рас-



Фиг. 1. Пример звуковых импульсов, регистрируемых в зоне геометрической тени: *a* — ликидж, *б1-б2* — рассеянные сигналы. Частота — 3,15 кГц, длительность — 10 мс, глубина источника $z_0=200$ м, глубина приема $z=300$ м, расстояние от источника $R=10,2$ км.



Фиг. 2. Спектры мощности ликиджа (слева) и рассеянного сигнала (справа) в линейном масштабе. *a* — $R=9,8$ км, *б* — $R=10,8$, *в* — $R=15,1$ км

сеянные на слоистых структурах океанской толщи [2]. Представляет интерес подробнее остановиться на пространственно-временных и спектральных характеристиках исследуемых сигналов.

Проведенный спектральный анализ взрывных сигналов, соответствующих наблюдаемому в ЗГТ ликиджу и рассеянному, показал существенное различие в их спектральном составе. На фиг. 2 показаны спектры мощности ликиджа и рассеянного сигнала на различных удалениях от источника. Спектры нормированы на свои максимальные значения, частотная полоса анализа 10 Гц, нижняя частота среза 100 Гц. Если в спектрах ликиджа основная энергия сосредоточена в области частот более 500 Гц с максимумом, находящимся в диапазоне 900–1000 Гц, то в спектрах рассеянных сигналов преобладают низкочастотные компоненты и сами спектры подобны спектру оригинала, наблюдаемого в ближней зоне. Особенности в спектре ликиджей легко объяснить фильтрующими свойствами приповерхностного канала, критическая частота которого по оценкам оказалась около 1 кГц. Приведенные экспериментальные спектры ликиджей и рассеянных сигналов, являясь дополнительным доказательством правильности идентификации ликиджей, содержат интересную информацию о подобии спектров рассеянных сигналов спектру взрывного источника.

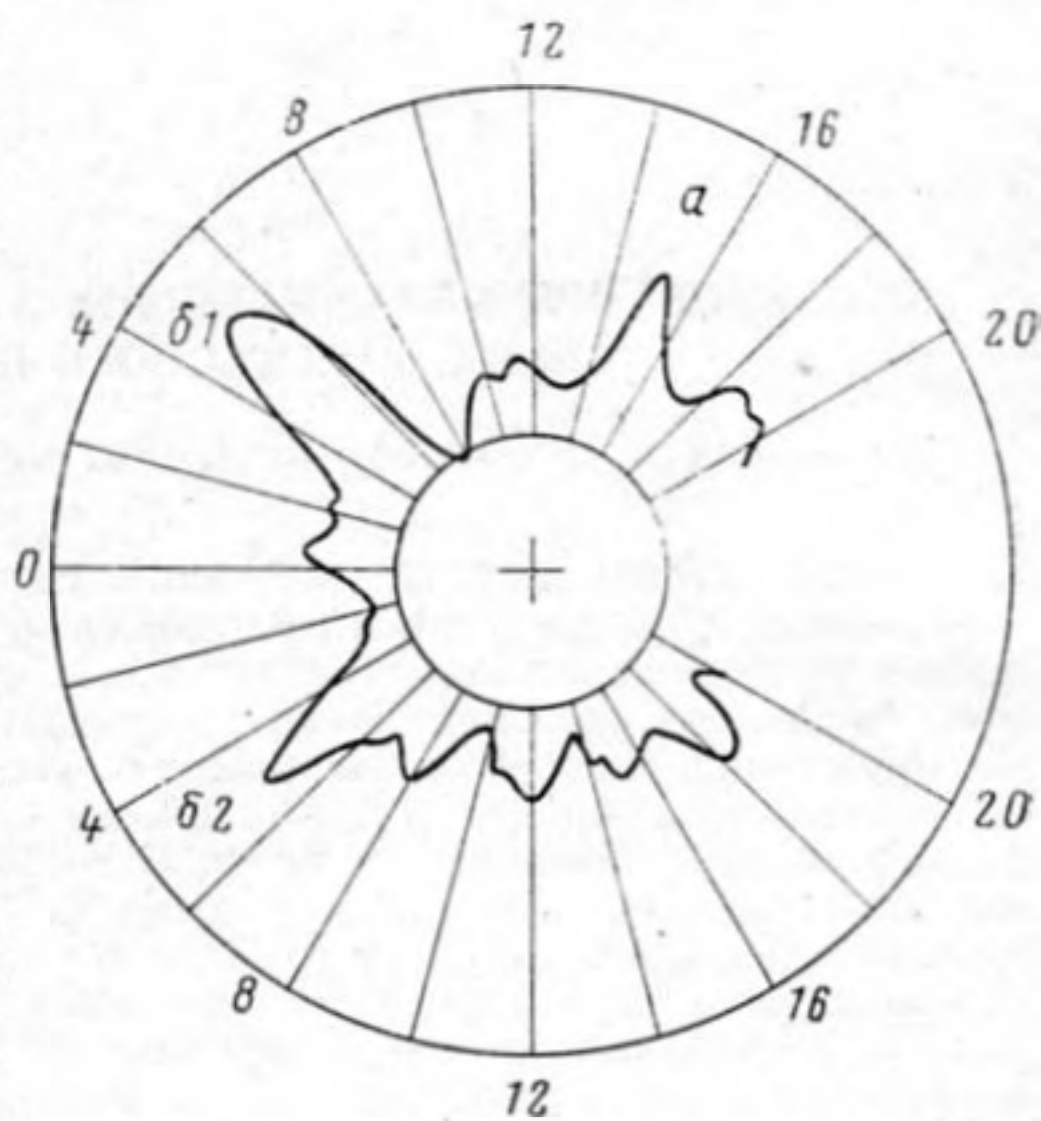
Для объяснения наблюдаемых в ЗГТ рассеянных звуковых сигналов в работе [2] была предложена следующая гипотеза: существенное рассеяние звука толщей океана происходит в области каустики, формирующейся в ближней озвученной зоне и являющейся границей зоны тени, а максимум интенсивности рассеянного звукового поля находится в направлении зеркального отражения от горизонтально ориентированных тонкоструктурных неоднородностей показателя преломления. Естественно также предположить, что рассеяние происходит в каждой точке каждого луча. При этом интенсивность рассеяния на слоистых структурах быстро спадает с увеличением угла скольжения падающего луча в точке рассеяния. В конкретных условиях проведения опыта лучи, формирующие каустику – границу ЗГТ, падают на слоистые структуры с наименьшим углом скольжения. Последнее является дополнительным фактором, ограничивающим область рассеяния каустикой. Предложенная гипотеза предполагает два прихода рассеянного сигнала в точку приема, находящуюся в ЗГТ: по лучу, испытывающему заворот на горизонте выше горизонта приема и по лучу, приходящему без заворота. Приведенные выше экспериментальные факты достаточно хорошо подтверждают отмеченную многолучевость в рассеянном звуковом сигнале. На фиг. 1 показано как расщепляется рассеянный сигнал при излучении коротких посылок длительностью 10 мс. В рассеянном сигнале, следующем за ликиджем, четко выделяются два импульса, которые можно интерпретировать как сигналы, распространяющиеся из области каустики – границы ЗГТ по лучу, испытывающему заворот (61), и по лучу без заворота (62). Расчет разности времен прихода таких сигналов дал величину 30 мс, сопоставимую с экспериментально наблюдаемой.

Анализ угловой структуры звукового поля в ЗГТ, проведенный с помощью вертикальной протяженной антенны с разрешением по углу около 1° , также обнаруживает наличие многолучевости в рассеянном сигнале. На фиг. 3 показано полученное в эксперименте угловое распределение звукового поля на расстоянии 10,2 км от источника. Наблюдаются два симметричных относительно горизонта максимума с углами $\pm 5^\circ$, которые соответствуют лучам с заворотом (61) и без заворота (62), и максимум с углом $+15^\circ$, который соответствует ликиджу (a). Попутно отметим, что более крутой угол прихода ликиджа по сравнению с расчетным, равным 13° , можно объяснить явлением отклонения максимума индикатриссы рассеяния звука поверхностью океана от зеркального направления [3].

Авторы благодарят А. В. Микрюкова за предоставленные записи взрывных сигналов и Л. В. Швачко за помощь при измерении угловых характеристик звукового поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гостев В. С., Швачко Р. Ф. Акустические характеристики тонкоструктурных образований в океане. – В кн.: Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984, с. 153–164.



Фиг. 3. Угловое распределение звукового поля в зоне геометрической тени. Частота – 3,15 кГц, $z_0=200$ м, $z=300$ м, $R=10,2$ км

2. Гостев В. С., Швачко Р. Ф. Экспериментальные исследования звуковых сигналов, наблюдаемых в зоне геометрической тени в океане.— Докл. АН СССР, 1985, т. 282, № 5.
3. Копыл Е. А. О рассеянии акустической волны, полого падающей на поверхность океана.— Изв. АН СССР, ФАО, 1975, № 6, с. 664–667.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
18.VI.1984

УДК 551.463

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО ЗВУКА, РАССЕЯННОГО ПОВЕРХНОСТЬЮ МОРЯ

Долин Л. С., Павленко А. М., Седунов Н. А., Шейнфельд И. В.

Существующие методы дистанционного определения параметров волнующейся поверхности моря достаточно разнообразны, но основными пока являются методы радио- и гидролокационного зондирования, основанные на резонансном (избирательном) механизме рассеяния волн на статистически неровной поверхности [1, 2]. Для интерпретации экспериментальных данных чаще всего используется двухмасштабная модель поверхности [3]. При рассеянии на такой поверхности волны, синусоидально модулированной по интенсивности, информация о статистике крупных масштабов может быть извлечена из флуктуационных характеристик рассеянной «волны модуляции» (ВМ) [4, 5]. При нормальном зондировании неровной поверхности измерение характеристик отраженной ВМ позволяет определить дисперсию и радиус корреляции крупных неровностей [6]; если зондирование осуществляется под малыми углами скольжения, то имеется возможность измерения сечений пространственного спектра крупномасштабной составляющей волнения в широком диапазоне пространственных частот. Экспериментальному исследованию этой возможности и посвящена данная работа.

Сначала дадим теоретическое обоснование описываемой ниже методики, следуя работам [4, 5]. Рассмотрим задачу об обратном рассеянии двухчастотного (ω_1, ω_2) поля на двухмасштабной статистически неровной поверхности: $z = \xi(\mathbf{r}) = \xi_0(\mathbf{r}) + \xi_1(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} — радиус-вектор в плоскости $z=0$, а крупномасштабная функция ξ_0 находится путем сглаживания «мелких» неровностей ξ_1 . Поскольку в спектре поля точечного источника имеются две частотные компоненты ω_1 и ω_2 , то интенсивность поля можно описать выражением

$$I_0 \sim \frac{1}{R^2} \{1 + m \operatorname{Re}[e^{i(\Omega t - KR)}]\}; \quad (1)$$

здесь m — глубина модуляции интенсивности, $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ — частота модуляции, $K = \Omega/c$ (c — скорость звука). При некоторых предположениях относительно характеристик рассеивающей поверхности и геометрии распространения (о которых будет сказано ниже) можно получить следующее выражение для интенсивности обратно рассеянного поля, усредненной по ансамблю «мелких» шероховатостей ξ_1 [5]:

$$I_{sc} = BS \{1 + \operatorname{Re}[M e^{i\Omega t}]\}, \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{S} \int_{S_0} |V(\mathbf{r})|^2 I_{\omega_0} d\mathbf{r}, \quad (3)$$

$$M = \frac{m}{B} \int_{S_0} |V(\mathbf{r})|^2 I_{\omega_0} e^{i(QR - Q_z \xi_0)} d\mathbf{r}. \quad (4)$$

Здесь введены следующие обозначения: S — площадь озвученного участка S_0 ; $V(\mathbf{r})$ — коэффициент отражения, неоднородный внутри участка S_0 ; I_{ω_0} — индикатриса рассеяния шероховатой поверхности (в среднем плоской) $z = \xi_1$, вычисленная на частоте $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$; Q и Q_z — соответственно модуль и z -компонента вектора рассеяния $Q = -2K$ «волны модуляции», амплитуда которой описывается выражением (4). Остальные обозначения ясны из фиг. 1. При выводе (2)÷(4) сделаны следующие предположения: характерные горизонтальные и вертикальные размеры мелких неровностей ξ_1 малы по сравнению с длиной ВМ — $\Lambda = 2\pi c/\Omega$; точка наблюдения находится в зоне разделения спектров, определенной для средней частотной компоненты зондирующего поля ω_0 [7]; коэффициент отражения $V(\mathbf{r})$ незначительно меняется на расстояниях порядка радиуса корреляции мелких неровностей и не зависит от частоты в полосе частот зондирующего поля (ω_1, ω_2); крупные неровности являются достаточно пологими [5].