АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 37 1991 Вып. 2

УДК 534.87; 551.463.26

© 1991 г.

А. Н. Богданов, В. В. Краснобородько, Ю. П. Лысанов

СИНХРОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДОННОГО РЕЛЬЕФА И РАССЕЯНИЯ ЗВУКА С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕНН

Представлены экспериментальные результаты синхронного определения характеристик донного рельефа и пространственного распределения интенсивности рассеянного поля при использовании одного и того же зондирующего сигнала и общей приемной системы. Установлена связь между характеристиками донного рельефа и диаграммой обратного рассеяния звука на участках с разным средним наклоном дна. Дана теоретическая интерпретация экспериментальным данным.

Применение многоэлементных плоских антенн позволило значительно повысить эффективность исследования рассеяния звука дном океана и получить ряд новых результатов, в частности «акустическое изображение» дна — пространственное распределение интенсивности рассеянного поля в горизонтальной плоскости [1, 2]. Однако при этом данные о рельефе дна и объемных неоднородностях подводного грунта обычно не были известны. Теоретическая интерпретация полученных результатов проводилась на основе той или иной геоакустической модели дна.

В настоящей работе представлены результаты исследования рассеивающих характеристик дна, полученные на основе синхронного измерения характеристик донного рельефа и пространственного распределения интенсивности рассеянного акустического поля при использовании одного и того же зондирующего сигнала и общей приемной антенны. Измерения проводились на частоте 15 кГц, когда основную роль в процессе рассеяния играют случайные неровности донного рельефа (из-за слабого проникновения звука в грунт, обусловленного сильным поглощением на высоких частотах).

Измерение характеристик донного рельефа основывалось на томографическом принципе. Для этих целей использовалось излучение коротких звуковых импульсов длительностью от 1 до 10 мс (пространственная протяженность 1,5—15 м). Импульс, достигнув дна, последовательно отражался от участков на все более низких уровнях. При этом рассеивающие свойства дна исследовались в вертикальной плоскости, перпендикулярной курсу судна. Излучающая антенна имела узкую (менее 2°) диаграмму направленности по направлению движения судна и широкую (до 70°) поперек движения. Приемная антенна представляла собой матрицу, состоящую из 57 отдельных элементов, установленных через 0,05 м поперек судна. Приемная и излучающая решетки были заделаны заподлицо в днище судна. Такие характеристики приемно-излучающей системы позволили получить объемное изображение рельефа дна с угловым разрешением по обеим горизонтальным координатам менее 2°, а благодаря движению судна появлялась возможность просмотра дна по дистанции.

На рис. 1 приведена батиметрическая карта одного участка дна океана, полученная описанным выше методом. Из большого числа полученных батиметрических карт для анализа была выбрана такая, которая содер-

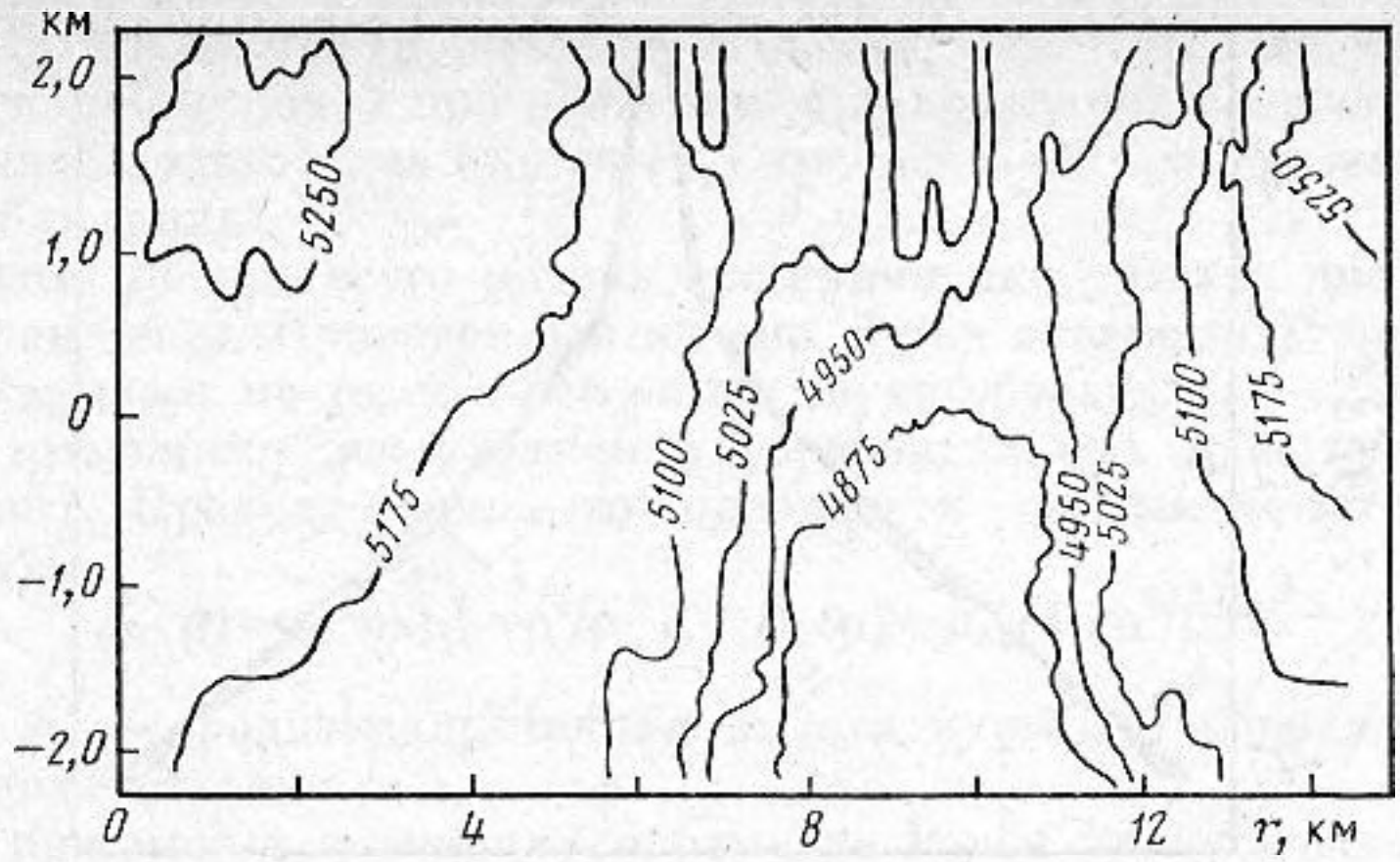

Рис. 1. Батиметрическая карта исследуемого участка дна. Цифры указывают глубину места в метрах; r — расстояние по курсу судна

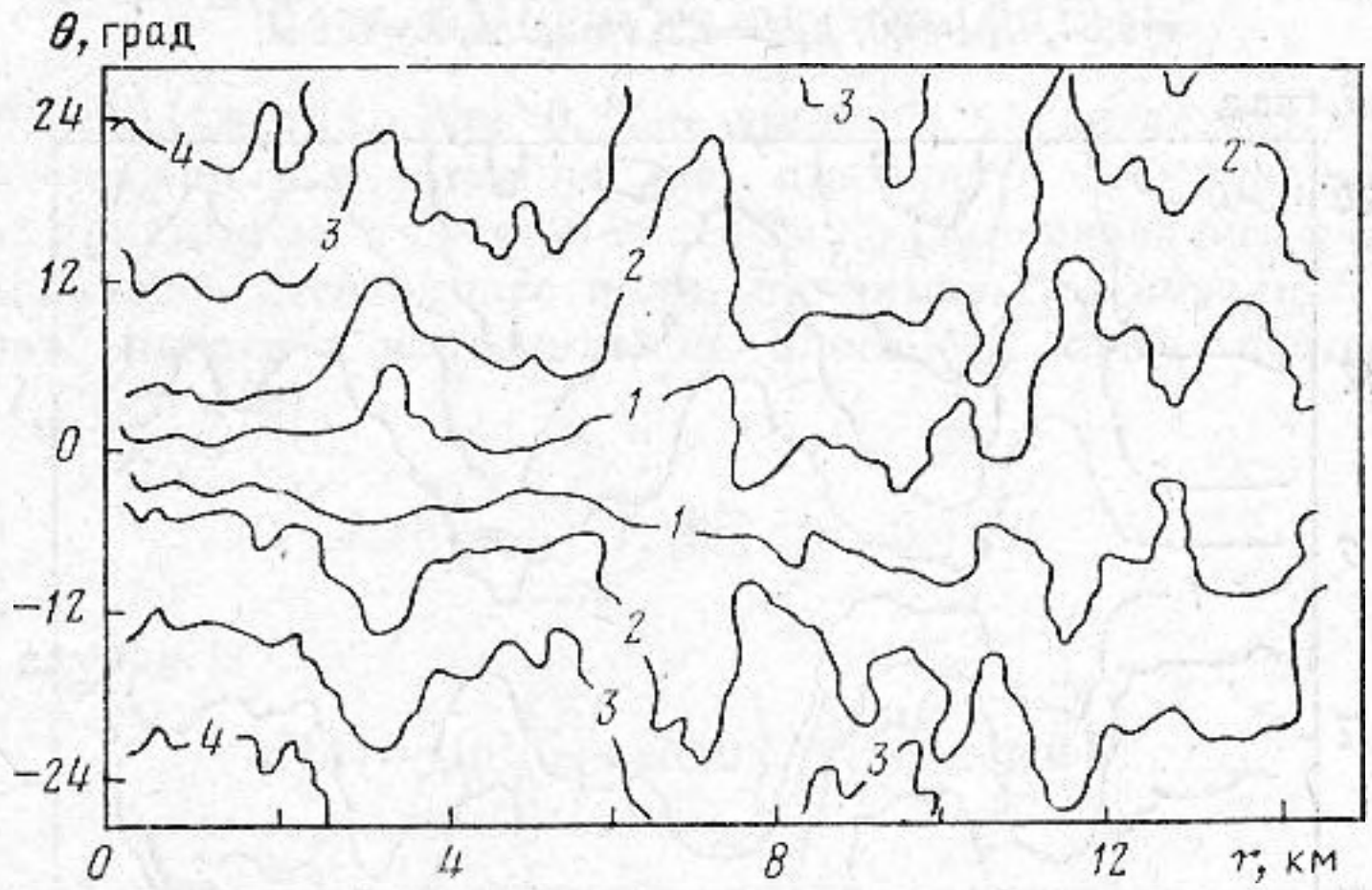

Рис. 2. Распределение интенсивности рассеянного в обратном направлении поля в горизонтальной плоскости. Цифры на изолиниях указывают уровень интенсивности в дБ относительно ее текущего максимального значения:
1 — −6 дБ, *2* — −12, *3* — −18, *4* — −24 дБ; r — расстояние по курсу судна

жит как ровный, так и изрезанный участки дна. Одновременно для этого же района было получено пространственное распределение интенсивности рассеянного в обратном направлении поля в горизонтальной плоскости (рис. 2). Измеренные значения интенсивности были нормированы на текущий максимум, который был разным для каждого значения дистанции.

Представленные на рис. 1 и 2 результаты показывают, что угловая зависимость интенсивности обратного рассеяния коррелирует с характером рельефа дна. Так, на ровном в среднем дне при дистанции r=0—2 км эффективная ширина диаграммы обратного рассеяния звука составляет менее 3°. Аналогичный результат имеет место и на дистанциях от 4 до 5 км. На других участках дна, где донный рельеф изрезан и имеет место значительный средний наклон (например при дистанции r~3, 6—8 и 10—14 км), диаграмма обратного рассеяния существенно расширяется и ее эффективная ширина достигает ~20° при r=11,5 км. Заметим, что диа-

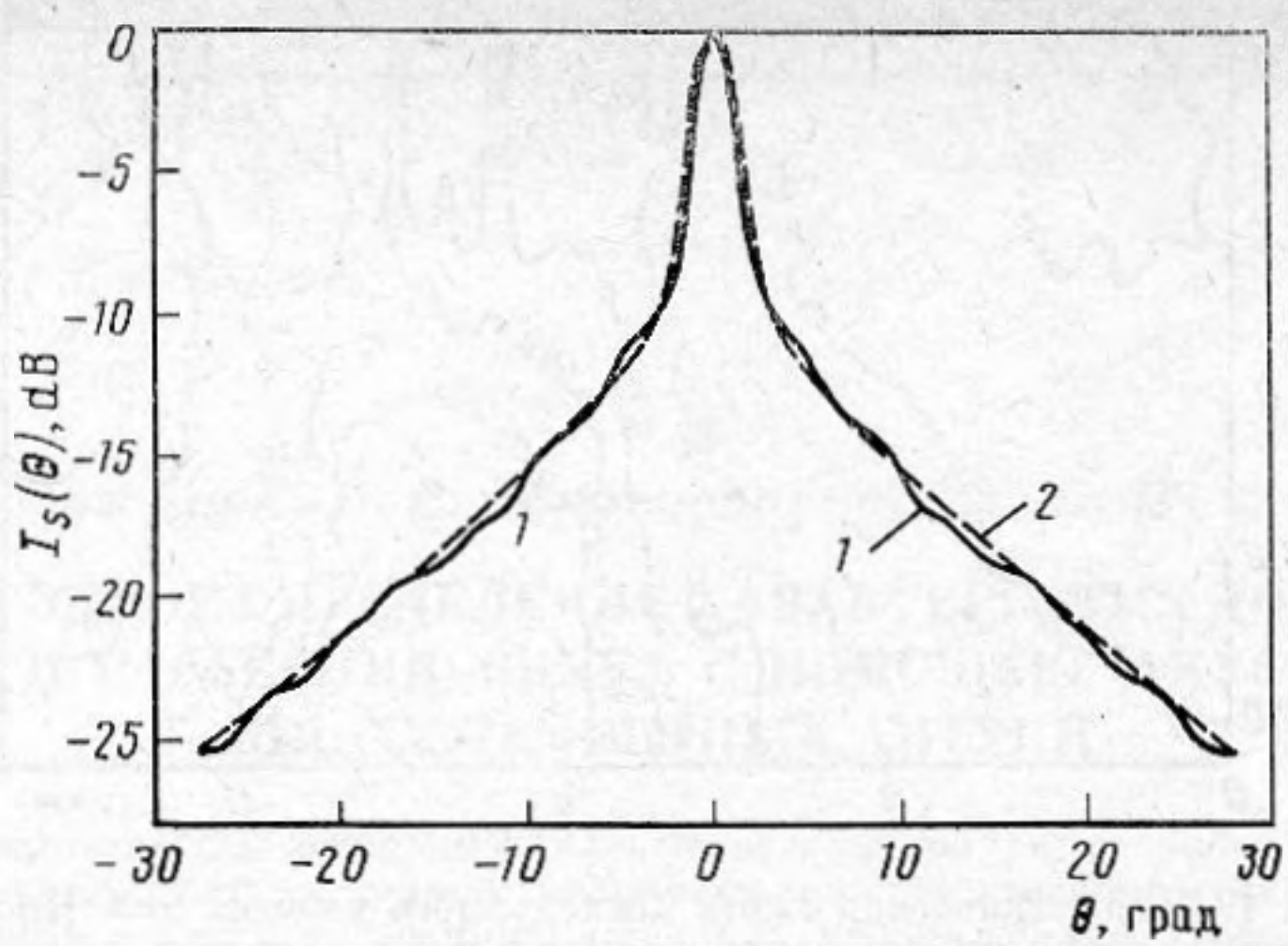

Рис. 3. Диаграмма обратного рассеяния звука при отсутствии среднего наклона дна: *1* – эксперимент, *2* – теория; $\sigma_2/\sigma_1=1{,}54$, $k\rho_1=60$, $k\rho_2=4{,}2$, $l=2{,}9$ м, $\lambda=0{,}1$ м

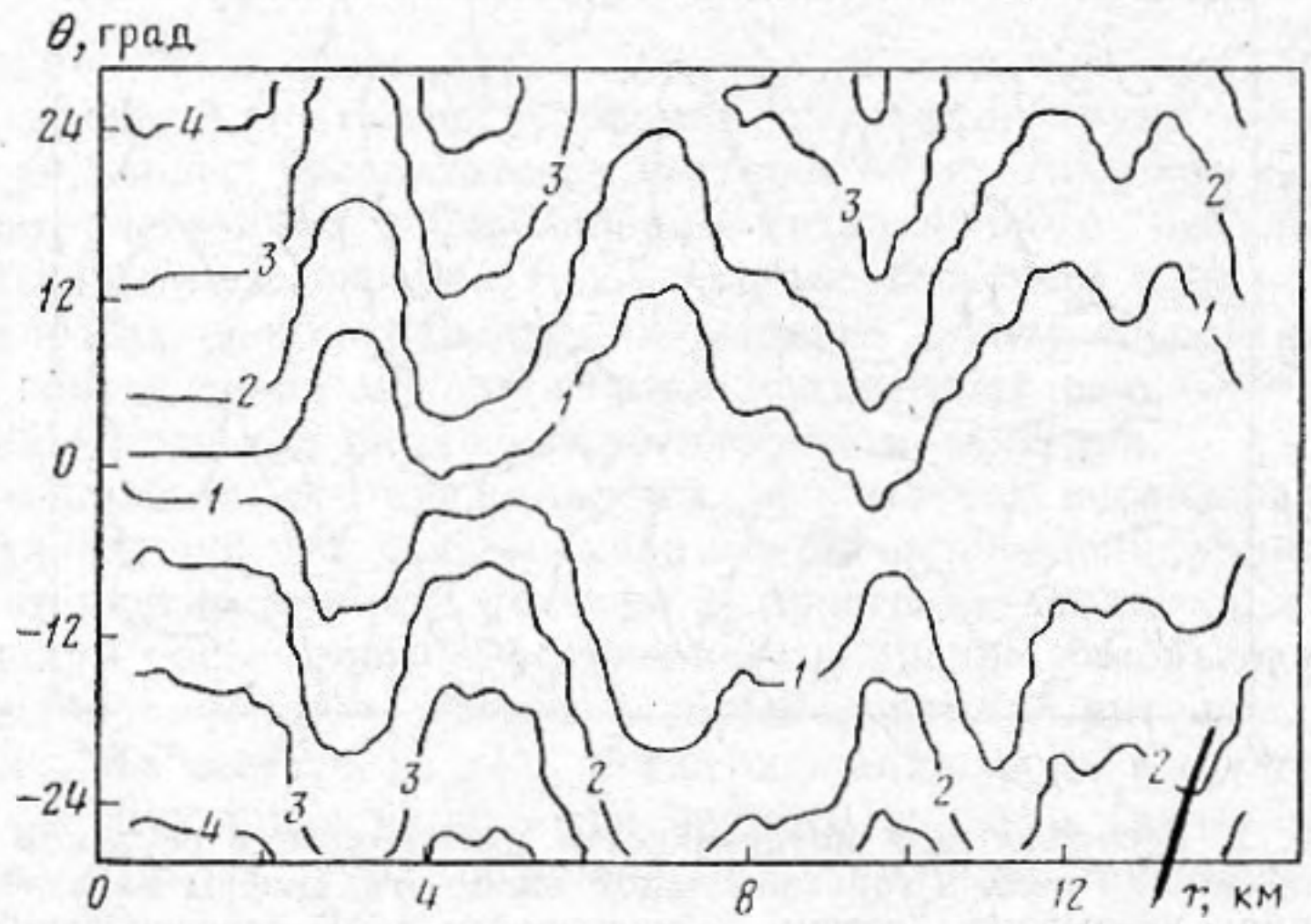

Рис. 4. Распределение интенсивности рассеянного в обратном направлении поля в горизонтальной плоскости. Расчет по формуле (3) с учетом (5). Цифры на изолиниях указывают те же значения, что на рис. 2; r – расстояние по курсу судна

грамма обратного рассеяния хорошо коррелирует не с высотами донного рельефа, а с его наклонами.

Перейдем теперь к теоретической интерпретации полученных результатов. На рис. 3 приведен характерный вид диаграммы обратного рассеяния звука в вертикальной плоскости, полученной по данным на рис. 2 для ровного (в среднем) участка дна вблизи $r=1$ км (кривая *1*). Отчетливо видны узкий максимум при нормальном падении звука на дно и «ореол» значительного более низкого уровня (~10 дБ), соответствующий рассеянию звука при больших углах падения. Угловая ширина максимума примерно равна раствору характеристики направленности приемной антенны. На других участках, где средний наклон дна отличен от нуля, диаграмма обратного рассеяния имеет иной вид. Если судно движется поперек среднего градиента наклона дна (участок дна при $r\approx9{,}5$ км), то

зеркальный максимум (нормальное падение) смещается на угол, равный среднему наклону дна, а при движении в направлении среднего градиента наклона дна (участок дна при $r \approx 11{,}5$ км) исчезает вообще, уходя из плоскости наблюдения.

Построим прежде всего модель рассеяния для участка дна с нулевым средним наклоном. Приведенный на рис. 3 вид диаграммы обратного рассеяния указывает на то, что рассеяние звука обусловлено малыми неровностями, имеющими два различных горизонтальных масштаба (радиуса корреляции). Предположим, что неровности описываются функциями корреляции

$$B_1(\rho)=\sigma_1^2 \exp(-\rho^2/\rho_1^2), \quad B_2(\rho)=\sigma_2^2(1+\rho^2/\rho_2^2)^{-3/2}, \tag{1}$$

где $\sigma_{1,2}$ и $\rho_{1,2}$ — среднеквадратичная высота и радиус корреляции неровностей, соответственно.

Тогда при малых значениях параметра Рэлея для углового распределения интенсивности рассеянного поля $I_s(\theta)$ в обратном направлении в вертикальной плоскости в дальней зоне имеем [3]

$$I_s(\theta)=I_1(\theta)+I_2(\theta)=I_0\{\exp[-(k\rho_1 \sin\theta)^2]+ \\ +2(\sigma_2/\sigma_1)^2(\rho_2/\rho_1)^2 \exp(-2k\rho_2|\sin\theta|)\}, \tag{2}$$

где $I_0=(S/\pi R^2)(k\sigma_1)^2(k\rho_1)\cos^4\theta$, k — волновое число звука, $S=4L^2$ — площадь рассеивающего участка на дне, имеющего вид квадрата, R — расстояние от приемно-излучающей системы до рассеивающего участка.

Интенсивность рассеянного поля, принимаемого антенной с диаграммой направленности в вертикальной плоскости $d(\theta)$, дается сверткой функций $I_s(\theta)$ и $d(\theta)$:

$$I_s(\theta)=\int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_s(\theta')d(\theta-\theta')d\theta'. \tag{3}$$

В данном случае

$$d(\theta)=\sin^2\left(\frac{\pi l}{\lambda}\sin\theta\right)\Big/\left(\frac{\pi l}{\lambda}\sin\theta\right)^2, \tag{4}$$

где l — линейный размер приемной антенны в направлении поперек судна (2,9 м), λ — длина волны звука (0,1 м).

Формула (3) была использована для численных расчетов на ЭВМ диаграммы обратного рассеяния. Наилучшее совпадение рассчитанной диаграммы обратного рассеяния с экспериментально измеренной достигалось при следующих значениях параметров: $k\rho_1=60$, $k\rho_2=4{,}2$ и $\sigma_2/\sigma_1=1{,}54$. Результаты расчета показаны на рис. 3 штриховой кривой. Имеет место практически полное совпадение экспериментальной и теоретической кривых.

Перейдем теперь к анализу диаграммы обратного рассеяния для случая, когда средний наклон дна отличен от нуля. Обозначим через δ_x и δ_y углы наклона дна по курсу и по траверсу судна соответственно. Тогда угол падения θ (угол между направлением рассеяния и нормалью к средней поверхности дна) определяется из соотношения $\cos\theta=\mathbf{n}(\mathbf{k}/k)$, где $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к средней поверхности дна, $\mathbf{k}$ — волновой вектор рассеянной волны. В вертикальной плоскости, перпендикулярной курсу судна (плоскость yz), это соотношение принимает простой вид

$$\cos\theta=(\cos\bar{\theta}+\sin\bar{\theta}\,\mathrm{tg}\,\delta_y)(1+\mathrm{tg}^2\delta_x+\mathrm{tg}^2\delta_y)^{-1/2}, \tag{5}$$

где $\bar{\theta}$ — угол между осью z и направлением рассеяния. Предполагается также, что статистические характеристики малых неровностей, располо-

женных на наклонных участках дна, такие же, как и на ровных. Изменяется только локальный угол облучения рассеивающего участка дна.

Были выполнены также численные расчеты диаграммы обратного рассеяния по формуле (3) с учетом (5) для двух участков дна при $r=9{,}5$ и $r=11{,}5$ км. Значения углов δ_x, δ_y определялись по батиметрической карте (рис. 1). После проверки того, что и в этих случаях предложенная модель дна хорошо описывает угловую зависимость диаграммы обратного рассеяния, было построено распределение интенсивности рассеянного в обратном направлении поля в горизонтальной плоскости для всего исследуемого района дна (рис. 4). Из сопоставления экспериментальных данных на рис. 2 и результатов численных расчетов на рис. 4 видно их неплохое качественное соответствие.

Таким образом, для построения пространственного распределения интенсивности рассеянного в обратном направлении поля достаточно знания модели рассеяния звука для выровненного участка дна и батиметрической карты исследуемого района дна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л. М., Краснобородько В. В., Кириаков В. Х., Селиванов В. Г.* Получение акустического изображения морского дна с помощью многоэлементных антенн // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 4. С. 1000–1002.
2. *Бреховских Л. М., Краснобородько В. В., Кириаков В. Х.* Акустические исследования дна океана с применением антенных решеток // Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 137–146.
3. *Лысанов Ю. П.* Рассеяние звука неровными поверхностями // Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 693.

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

Институт океанологии
им. П. П. Ширшова
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
23.04.90

A. N. Bogdanov, V. V. Krasnoborodko, Yu. P. Lysanov

SIMULTANEOUS DETERMINATION OF BOTTOM RELIEF CHARACTERISTICS AND SOUND SCATTERING BY MEANS OF ACOUSTIC MULTIELEMENT ANTENNAE

Experimental data of the simultaneous determination of bottom relief characteristics and a spatial distribution of scattered sound field intensity by means of one and the same sounding signal and common multielement receiving antenna are cited. The relation between characteristics of the bottom relief and the backscattering pattern for areas with different average slopes of the bottom is established. The theoretical interpretation of experimental data is given.