АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXV 1989 Вып. 2

УДК 551.463.26

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ОКЕАНЕ ВБЛИЗИ МАТЕРИКОВОГО СКЛОНА

Андреева И. Б., Галыбин Н. Н., Петрова А. Ш., Фаизов В. Я.

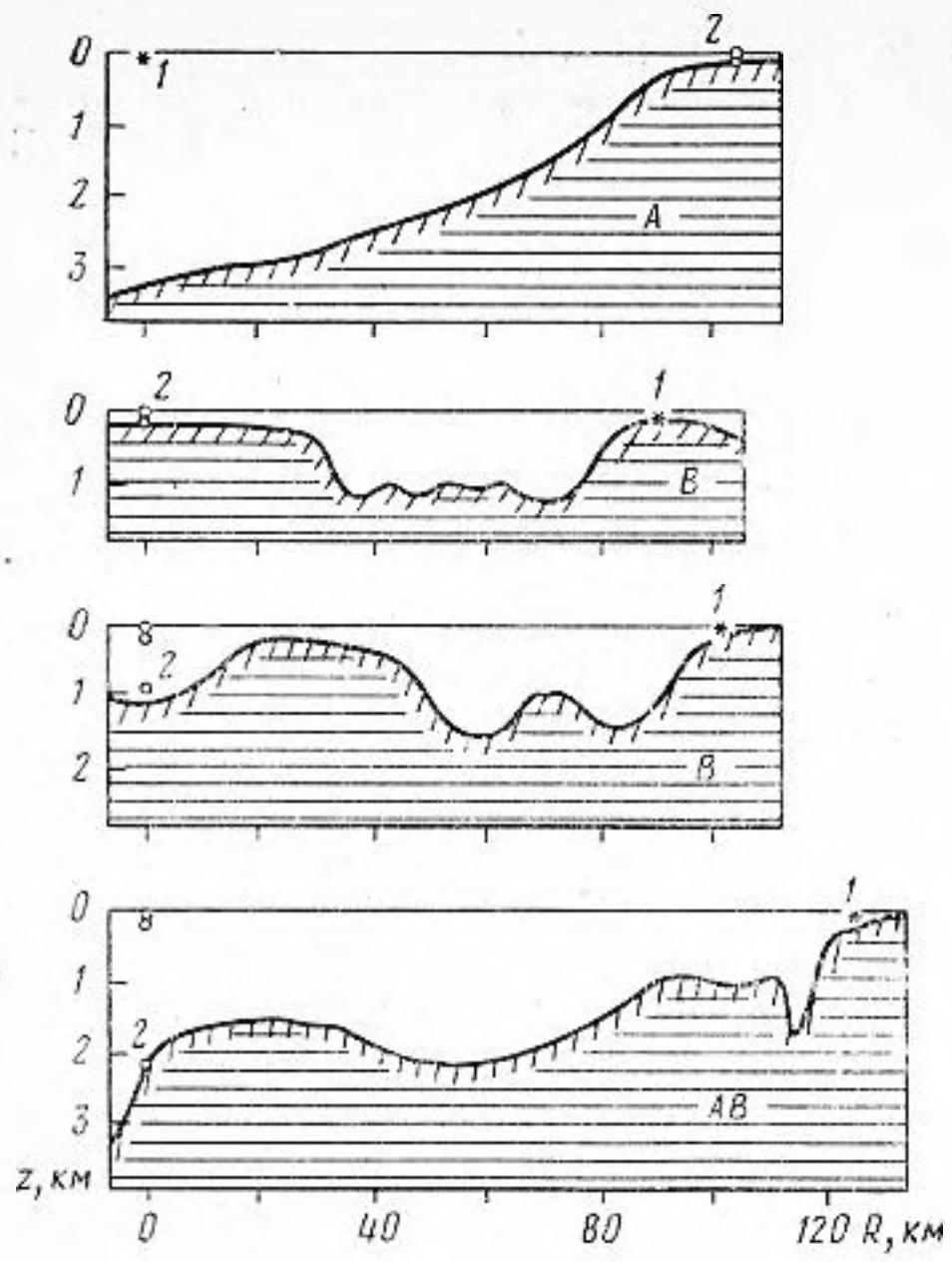
Приведены результаты натурных экспериментов по распространению звука с частотами в диапазоне сотен Гц на трассах, пересекающих материковый склон по разным направлениям. Показано, что потери на распространение и параметр когерентности минимальны на трассах, примерно перпендикулярных изобатам, и сильно возрастают на трассах, идущих вдоль изобат.

Вопросы трансформации акустических сигналов, распространяющихся из берегового клина в открытый океан или наоборот, давно привлекают внимание теоретиков и экспериментаторов. Обзор методов решения такой расчетной задачи сделан в работе [1]. Рассмотренные в ней исследования относятся к случаю, когда рельеф дна и вертикальный профиль скорости звука $c(z)$ изменяются только по направлению распространения звуковых сигналов в условиях двумерного подводного звукового канала. В работе [2] дан метод расчета звукового поля при произвольной ориентации трассы распространения в двумерном канале при $c(z)=\text{const}$. Установившихся методов расчета, более близких к реальным условиям в океане (трехмерность рельефа дна, влияние морского волнения при неровном дне и пр.), пока не существует.

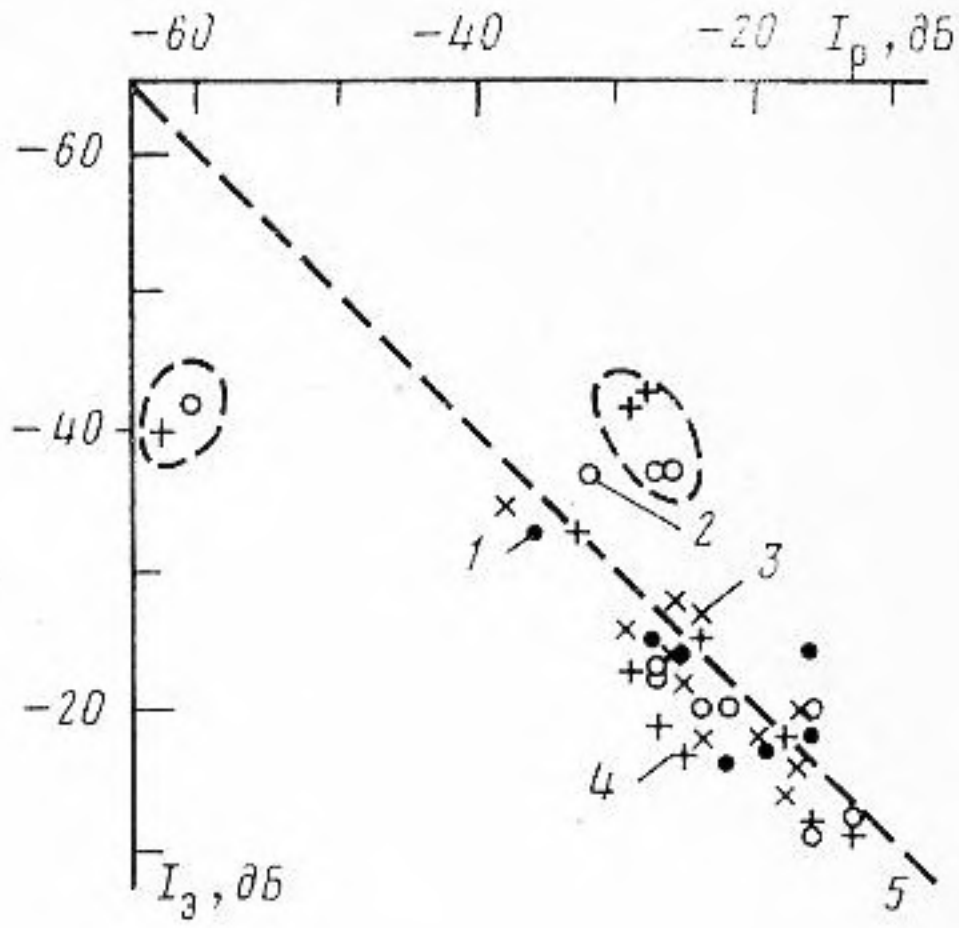
В большинстве натурных экспериментов в океане исследования также ограничивались трассами, идущими от берегового шельфа в глубокий океан примерно перпендикулярно генеральному направлению изобат (см., например, [3, 4]). Цель настоящей работы — исследование влияния на акустические сигналы ориентации трасс и особенностей рельефа дна в области перехода от берегового клина к глубокой воде. Измерения были выполнены на 15 трассах, пересекавших материковый склон в разных направлениях. Длина трасс, как правило, была близка к 100 км. В районе работ был слабый подповерхностный канал с осью на глубине в десятки метров, а глубже — устойчивый положительный градиент скорости звука. Скорость ветра чаще всего находилась в пределах 3—8 м/с, но в единичных случаях достигала 12—16 м/с.

Типичные профили дна на трассах распространения звука приведены на фиг. 1. Верхний профиль (тип А) характерен для трасс, примерно перпендикулярных генеральному направлению изобат. Для него типично монотонное увеличение глубины от 100—200 м до 3—4 км и малость длины мелководного участка. Два следующих профиля на фигуре (тип В) типичны для трасс, идущих почти вдоль материкового склона. На трассах такой ориентации рельеф дна сильно изрезан и на пути распространения звука могут встречаться протяженные мелководные участки. Рельеф дна на трассах типа В весьма разнообразен, но для него характерен наклон дна относительно горизонтальной плоскости, ортогональной плоскости чертежа; это является следствием «трехмерности» реального рельефа дна.

На трассах типа А было выполнено 5 экспериментов, на трассах типа В — 6. Четыре экспериментальных трассы (тип АВ, нижний профиль на фиг. 1) занимали промежуточное положение и были ориентированы по отношению к изобатам под углом в несколько десятков градусов (15—25°).



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Типичные профили дна на трассах распространения звука: А – трасса примерно ортогональна изобатам, В – почти параллельна, АВ – имеет промежуточное направление; *1* – излучатель, *2* – приемники

Фиг. 2. Соотношение экспериментальных и расчетных значений интенсивности звука: *1*, *2* – частота f, *3*, *4* – частота $1{,}5f$; *1*, *3* – трассы типа А; *2*, *4* – типа АВ; *5* – $(I_э - I_р)$

Акустические системы, использованные в опыте, были ненаправленны и опускались с дрейфующих судов. Излучались тональные стабилизированные по частоте сигналы на двух частотах, различавшихся в 1,5 раза в диапазоне сотен Гц. Излучатель находился в глубоководной части акватории на глубине 130 м, что обеспечивало распространение звука с многократными отражениями от поверхности океана, а на мелководных участках – и от дна. На приемном конце трассы опускалось два или три звукоприемника на разные глубины (вблизи поверхности, вблизи дна и в толщу воды на глубину ~200–400 м). Каждое измерение длилось 10–20 мин, что позволяло за счет дрейфа судов сгладить пространственную интерференционную картину поля и выделить в принятых сигналах средние уровни и средние частотные спектры. Проведенные в ходе эксперимента калибровки позволили получить абсолютные уровни сигналов и оценить потери при распространении.

Обработка экспериментальных данных выполнялась на ЭВМ. Средние уровни сигнала находились в полосе частот 2 Гц, включавшей в себя как регулярную, так и случайную компоненты. Спектральный анализ был сделан с разрешением по частоте 0,017 Гц.

Параллельно был выполнен ЭВМ-расчет потерь при распространении по одной из модификаций программы А. В. Вагина, предложенной им в 1974 г. Эта программа позволяет в лучевом приближении рассчитывать структуру звукового поля в двумерно-неоднородной среде. В расчетах переменными по трассе считались глубина дна и профиль скорости звука. В ходе расчета производилось пространственное усреднение уровней, аналогичное проведенному при обработке экспериментальных данных. Дно считалось кусочно-плоским и описывалось реалистичными параметрами, включая потери [1]. Коэффициент отражения от поверхности был

[1] Принятые значения параметров: $\mathrm{Re}[c_l/c]=1{,}052$; $\mathrm{Im}[c_l/c]=-0{,}105$; $\mathrm{Re}[c_s/c]=\mathrm{Im}[c_s/c]=0$; $\rho_г/\rho=1{,}6$, где c_l и c_s – скорости соответственно продольных и поперечных волн в грунте, c – то же в воде, $\rho_г/\rho$ – отношение плотностей грунта и воды.

принят равным единице, что обеспечивало наилучшее приближение к уровню суммарного сигнала, включающего в себя как регулярную, так и случайную компоненты.

Анализ обработанных экспериментальных материалов показал, что степень ортогональности трассы и изобат оказывает очень сильное влияние на акустические сигналы в точке приема. При ортогональности трассы и изобат аномалия распространения звука (отклонение от условий сферического расхождения) при глубинах приема менее 300 м максимальна и составляет 10—20 дБ; на бо́льших глубинах на трассах типа А она падает на 7—10 дБ, но сигнал по-прежнему остается существенно выше уровня шума. При близости направлений трассы и изобат (тип В рельефа) величина аномалии на малых глубинах близка к нулю, а на больших становится отрицательной.

Не менее существенно от типа рельефа дна зависит и степень согласованности расчетных ($I_р$) и экспериментальных ($I_э$) уровней интенсивности сигнала. При трассах, идущих от мелководья в открытое море (тип А), согласие расчета и эксперимента вполне удовлетворительно (фиг. 2) [2]. Когда ориентация трассы была промежуточной (тип АВ), в большинстве случаев согласие также было удовлетворительным, но в некоторых случаях, в частности на трассе, изображенной на фиг. 1 внизу, это согласие резко нарушалось (см. точки, окруженные пунктиром на фиг. 2). При рельефе типа В различие величин $I_э$ и $I_р$ было настолько велико, что эти данные трудно представить графически и они приведены в таблице. Разность $I_р - I_э \gg 30$ дБ означает, что экспериментальный уровень сигнала в точке приема был заметно выше уровня шума, а расчет дал полное отсутствие сигнала, так как ни один луч вообще не проникал в эту зону.

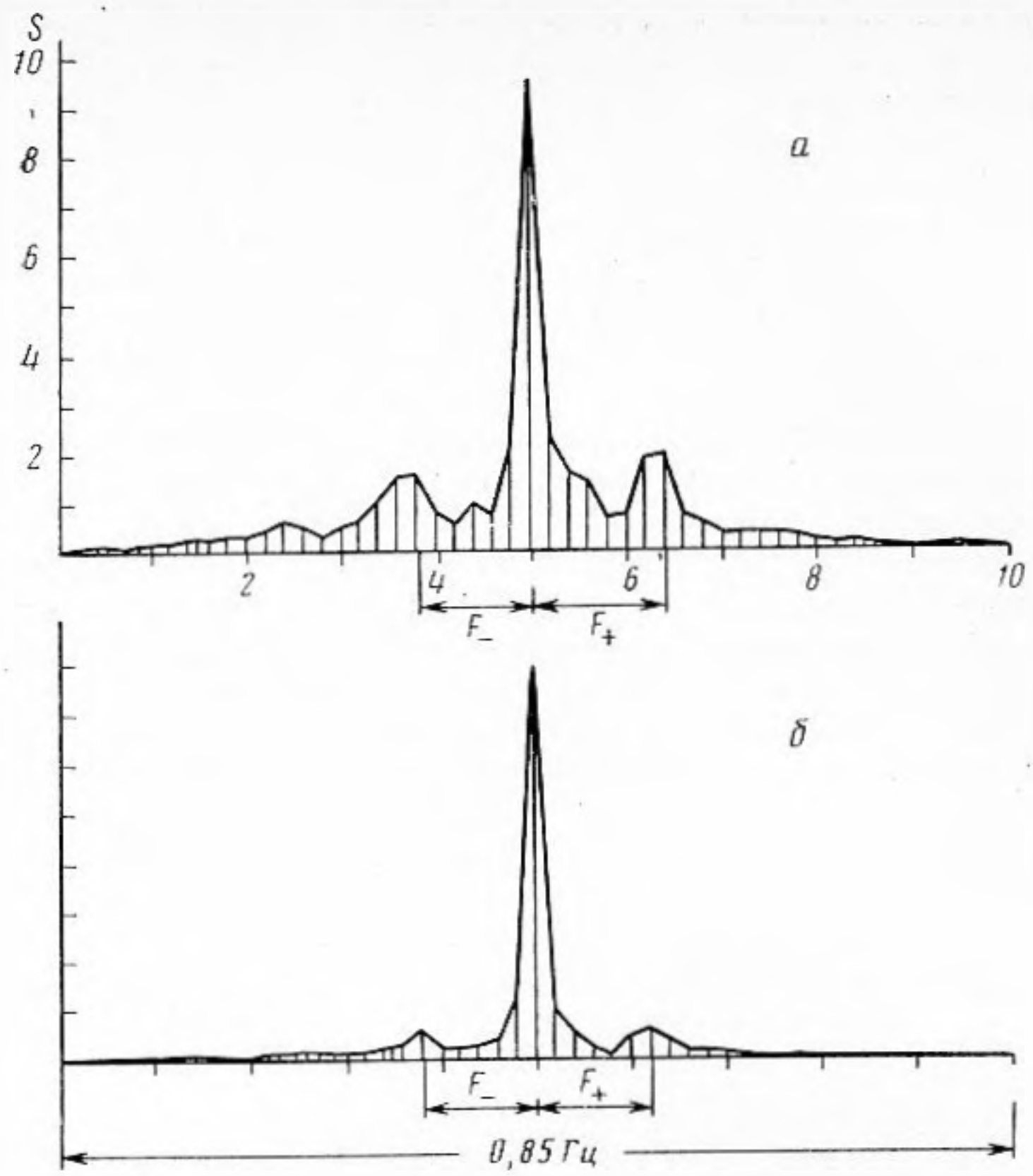
Таким образом, ЭВМ-расчеты при двумерной модели звукового канала в океане дают, как и следовало ожидать, надежное согласие с экспериментом только при примерной ортогональности трассы распространения звука и генерального направления изобат. В остальных случаях расчетный прогноз нельзя считать достоверным, а при близости трассы к направлению материкового склона модель двумерного океанического канала просто непригодна. Наиболее вероятными причинами этого несоответствия являются: угловое перераспределение энергии реального сигнала в азимутальном направлении из-за трехмерности рельефа дна, а в вертикальной плоскости — из-за морского волнения; отличие параметров грунта, принятых в расчете, от реальных, которые к тому же могут быть различны вдоль разных трасс.

На фиг. 3 приведены типичные частотные спектры сигналов, полученные в экспериментах в тех же точках, где регистрировались и их сред-

Разность расчетных и экспериментальных уровней сигнала на трассах типа В

Характеристики трассы		Глубина приема, м	$I_р - I_э$, дБ	Характеристики трассы		Глубина приема, м	$I_р - I_э$, дБ
длина, км	глубина места точки приема, м			длина, км	глубина места точки приема, м		
54	110	20	1	95	750	10	−11
		90	−5			150	−3
						700	30
90	150	10	−29				
		135	−22	104	1000	10	−11
						250	≫30
62	500	20	−8			900	≫30
		150	7				
		370	≫30	128	3000	10	≫30
						120	≫30
						2500	≫30

[2] Наблюдаемое слабое превышение экспериментальных величин над расчетными можно объяснить дефектом использованного варианта программы ЭВМ-расчета; лучи, вдоль которых сигнал сильно ослаблялся, отбрасывались.



Фиг. 3. Частотные спектры сигналов в полосе 0,85 Гц: *а* – трасса типа А, *б* – трасса типа В; *S* – относительное значение энергии в полосе 0,017 Гц (линейный масштаб)

ние уровни. Общая структура спектров была одинаковой при всех условиях эксперимента. На несущей частоте f был виден узкий максимум, соответствующий частоте излучения. Сдвиг этой частоты, вызванный дрейфом судов, не регистрировался и исключался из рассмотрения. Ширина максимума по уровню 0,5 всегда была меньше разрешающей способности анализа, равной 0,017 Гц.

Вокруг центрального пика видны два боковых крыла, уровень которых превышает шумовой фон в симметричных полосах, примерно равных ±(0,3–0,4) Гц. Каждая боковая полоса, как правило, имеет свой максимум, сдвинутый на величину $F_{\pm}=\pm(0{,}09-0{,}12)$ Гц от центрального пика.

Такой вид спектров несомненно свидетельствует о большой роли взволнованной поверхности океана в формировании сигналов на трассе распространения. К сожалению, пока не удалось построить теорию, описывающую этот процесс. Основная трудность связана с необходимостью учитывать воздействие сложного рельефа дна, так как экспериментальные данные свидетельствуют о его существенном влиянии на соотношение энергии в центральном пике и в боковых крыльях. Существующие же методы расчета спектров акустических сигналов, распространяющихся в приповерхностном канале, базируются на плоскослоистой модели океана. Поэтому мы вынуждены ограничиться простым изложением экспериментальных данных и некоторыми качественными соображениями о полученных зависимостях.

Спектральной обработке была подвергнута 41 запись акустических сигналов, принятых на различных трассах (по пяти трасс типов А и В и одна трасса типа АВ). Записи были сделаны на двух частотах (f и $1{,}5f$) при разных состояниях поверхности и при разных глубинах приема (от 10 м до 1 км). В качестве количественных характеристик спектров были выбраны параметры когерентности γ и частота F сдвига максимума боковых крыльев. В качестве параметра когерентности, равного, по опреде-

лению, отношению энергии когерентной компоненты к суммарной энергии сигнала, было принято отношение энергии в центральном максимуме спектра к его общей энергии. На ряде записей наблюдалось некоторое расширение центрального пика; возможно, оно связано с нестабильностью дрейфа судов за время усреднения (10—20 мин).

Многочисленные факторы, влияющие на величины γ и F, изменялись от опыта к опыту случайным образом, и это привело к большому разбросу измеряемых параметров спектров и не позволило достоверно выделить все закономерности их изменения. Наиболее четко прослеживается влияние частоты излучения и характера рельефа дна на величину параметра когерентности.

Величина параметра когерентности от опыта к опыту изменялась в широких пределах — от 0,2 до 0,9. Средние значения γ при более низкой частоте излучения были примерно на 25% выше, чем при более высокой. Качественно это соответствует имеющимся теоретическим представлениям о понижении с ростом параметра Рэлея когерентности сигналов, распространяющихся в приповерхностном канале.

Наибольшее число (23) значений γ получено на частоте f; они соответствуют записям, где полезный сигнал существенно превышал шум в относительно широкой полосе частот. Их анализ показал, что величина параметра когерентности растет по мере усложнения рельефа дна на трассе и при появлении на ней мелководных участков. Так, на трассах типа А средняя величина $\bar{\gamma}=0{,}30$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma=0{,}05$, а на трассах типа В $\bar{\gamma}=0{,}63$ при $\sigma=0{,}17$. Рост параметра когерентности при усложнении рельефа связан, видимо, с повышенными, сравнительно с регулярной частью, потерями на трассе распространения рассеянной компоненты. Рассеянные поверхностью океана звуковые волны распространяются, как показывают расчеты [5], преимущественно по более крутым лучам: они быстрее уходят из канала, в частности поглощаются дном на мелководных участках. Так, на двух трассах типа В, приведенных на фиг. 1, величина γ была близка к 0,5 и 0,8. Большим значениям γ, как правило, соответствуют пониженные уровни аномалии распространения, вычисленные по интенсивности суммарного сигнала. Влияние рельефа дна на соотношение потерь регулярной и случайной компонент исключает возможность расчетных оценок величин γ, сделанных только для плоскослоистых сред.

Частотный сдвиг F максимумов в боковых полосах спектра регулярным образом не зависел от условий опытов (частота излучения, состояние поверхности и пр.); средняя величина этого сдвига была равна $\bar{F}\simeq$ $\simeq 0{,}11$ Гц при очень малом, около 0,01 Гц, среднеквадратичном разбросе. Существующие теоретические представления, подтвержденные экспериментом, предсказывают, что частота F должна быть близка к частоте энергонесущего максимума волнения [6, 7]. К сожалению, в ходе экспериментов реальные спектры морской поверхности инструментально не измерялись. Однако в светлое время суток штурманы обоих судов вели регулярные (каждые 2 ч) визуальные наблюдения за состоянием поверхности моря. По этим данным ветровое волнение практически всегда было смешано с зыбью, период которой варьировался во время акустических работ от ~7 до 11 с (соответствующие частоты 0,14—0,09 Гц). Эти цифры в целом неплохо согласуются с зарегистрированными значениями частотного сдвига F.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют об очень сильном влиянии на уровень и спектральную структуру акустических сигналов рельефа дна океана в тех случаях, когда трасса распространения пересекает материковый склон. Методы расчета, развитые для двумерных океанических каналов, не обеспечивают надежного согласия с экспериментом в случае сложного рельефа в этой области дна, характерного для трасс, существенно не ортогональных генеральному направлению изобат. В этом последнем случае рассеянная взволнованной поверхностью океана компонента затухает значительно быстрее, чем сигнал в целом, что не позволяет применять для оценок энергетических и частот-

ных характеристик сигналов теорию рассеяния звука в приповерхностном канале при плоскослоистой среде.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность О. П. Галкину, Е. А. Копылу и остальным коллегам, принимавшим участие в организации и проведении записей на приемном судне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Комиссарова Н. Н.* Распространение звука в нерегулярных волноводах. Л.: Румб, 1982. С. 67.
2. *Комиссарова Н. Н.* Шумовое поле, создаваемое поверхностными источниками в береговом клине // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 1. С. 43–48.
3. *Carey W. M., Gereben I. B., Brunson B. A.* Measurement of sound propagation downslope to a bottom-limited sound channel // J. Acoust. Soc. Amer. 1987. V. 81. (2). P. 244–257.
4. *Dosso S. E., Chapman N. R.* Measurement and modeling of downslope acoustic propagation loss over a continental slope // J. Acoust. Soc. Amer. 1987. V. 81(2), P. 258–268.
5. *Копыл Е. А.* Об угловом распределении интенсивности звука, переизлученного поверхностью океана при малых углах скольжения // Изв. АН СССР. Сер. физ. атм. и океана. 1985. Т. 21. № 1. С. 98–104.
6. *Неклюдов В. И., Чупров С. Д.* Экспериментальное исследование спектра флуктуаций амплитуды тонально-импульсных сигналов, отраженных от поверхности океана при больших значениях параметров Рэлея // Акуст. журн. 1976. Т. 22. № 1. С. 81–85.
7. *Чупров С. Д.* О связи спектра сигнала, отраженного от взволнованной поверхности океана и спектра волнения в случае малых неровностей // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 1. С. 116–124.

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

Поступила в редакцию
13.V.1988