АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXIV 1988 Вып. 2

УДК 551.463.228

АНИЗОТРОПИЯ ШУМОВОГО ПОЛЯ В ОКЕАНЕ (ЭКСПЕРИМЕНТ И РАСЧЕТ)

Аредов А. А., Охрименко Н. Н., Фурдуев А. В.

Приводятся данные экспериментальных исследований вертикальной анизотропии шумового поля глубокого океана с типичным тропическим профилем скорости звука, полученные при помощи вертикальной линейной антенны с эквидистантным расположением 32 гидрофонов на длине 19 м, имеющей рабочий диапазон частот 0,3–1,2 кГц. Экспериментальные результаты сопоставляются с расчетами по лучевой модели динамических и судоходных шумов океана.

Известно немного работ, в которых приводятся экспериментальные данные о характеристиках анизотропии поля подводных акустических шумов в океане [1–8]. Именно эта характеристика наиболее информативна для развития акустических методов изучения океана. Она несет в себе возможность получения данных об источниках шума, их распределении по акватории, о профиле скорости звука, коэффициенте отражения звука дном, о параметрах поверхностных и внутренних волн, о поле скорости ветра над акваторией и о плотности судоходства в районе измерений [7].

Сложность проведения соответствующих измерений определила немногочисленность полученных к настоящему времени данных. Особенно это относится к исследованиям, в которых наряду с приемом шума одновременно осуществлялся контроль за процессами в океане, определяющими условия формирования поля.

Вообще говоря, поле шумов анизотропно как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Анизотропия в горизонтальной плоскости формируется для открытого океана неодинаковыми по азимутам гидрологией, ветром, неизотропностью внутренних поверхностных волн, рельефа дна и судоходством. Вблизи горных поднятий дна, берегов в зоне континентального шельфа азимутальная анизотропия шума определяется этими факторами.

При использовании вертикальной линейной антенны в открытом океане незначительная азимутальная анизотропия (при стабильных гидрометеорологических условиях на шумообразующей акватории) усредняется и в результате эксперимента может быть получена анизотропия поля в вертикальной плоскости, интегрированная по азимутам. Ее основные черты определяются профилем скорости звука, частотой и глубиной приема, акустическими свойствами дна и параметрами объемного рассеяния звука на биологических слоях или температурных неоднородностях.

Проиллюстрируем сказанное данными экспериментальных исследований характеристик анизотропии шумового поля в вертикальной плоскости в районе абиссальной равнины открытого глубокого океана с типичным тропическим профилем скорости звука, характеризующимся ярко выраженным подводным звуковым каналом и скоростью звука у дна большей, чем у поверхности.

Приведенные ниже результаты получены с помощью вертикальной линейной антенны с эквидистантным распределением 32 гидрофонов на длине 19 м (чувствительность 200 мкв/Па, имевших предварительные усилители со спектральным уровнем электрических шумов не выше 10 нв/Гц^{0,5} и рабочую полосу частот 0,3–1,2 кГц). Антенна в целом обеспечивала формирование главного лепестка диаграммы направленности с раскрывом 4° по уровню 0,7 по нормали к антенне на частоте 1 кГц и сканирование лепестком в пределах ±90° относительно горизонта; средний уровень

боковых лепестков не превышал 10% от чувствительности в главном. Прием (для приводимых здесь примеров измерений) осуществлялся на глубине 250 м, при этом антенна балансировалась с помощью поплавков и грузов, а судно, с которого она опускалась, выключало все шумящие механизмы и переходило на «режим тишины». Параллельно с акустическими измерениями осуществлялся контроль скорости ветра, спектров волн, профиля скорости звука, вертикальности антенны и других характеристик.

Интерпретация получаемых данных осуществлялась путем их сравнения с расчетами по лучевой модели динамических и судоходных шумов океана, реализованной в виде пакета прикладных программ на ЭВМ. Рассчитанные характеристики анизотропии посредством их свертки с диаграммой направленности антенны приводились к сопоставимому виду. Расчетная модель полагала однородность профиля скорости звука на шумообразующей акватории, по которой распределены заданием поля скорости ветра некоррелированные источники динамических шумов и эквивалентные точечные источники, имитирующие суда, располагаемые в соответствующих точках. Расчет характеристик анизотропии шума динамического происхождения проводился по следующим, приведенным здесь для иллюстрации физического содержания модели, формулам [4, 6]:

$$I_{+\alpha}=\frac{W_{\text{п}}e^{-2\beta R_1}}{c_{\text{г}}^2(1-e^{-2\beta R_0}V_{\text{п}}^2V_{\text{д}}^2)}\left[\frac{c_{\text{п}}^2G_{\text{п}}^2(\alpha_{\text{п}})}{\sin\alpha_{\text{п}}}+\frac{c_{\text{д}}^2KG_{\text{д}}^2(\alpha_{\text{д}})V_{\text{п}}^2e^{-\beta R_0}}{\sin\alpha_{\text{д}}}\right]. \quad (1)$$

для углов $\alpha>\alpha_0=\arccos c_{\text{г}}/c_{\text{п}}$, т. е. от угла α_0 ограничивающего зону рефракционного минимума и до направления на поверхность при $\alpha=+90°$

$$I_{-\alpha}=\frac{W_{\text{п}}e^{-2\beta R_2}}{c_{\text{г}}^2(1-e^{-2\beta R_0}V_{\text{п}}^2V_{\text{д}}^2)}\left[\frac{c_{\text{п}}^2G_{\text{п}}^2(\alpha_{\text{п}})V_{\text{д}}^2}{\sin\alpha_{\text{п}}}+\frac{c_{\text{д}}^2KG_{\text{д}}^2(\alpha_{\text{д}})e^{+\beta R_0}}{\sin\alpha_{\text{д}}}\right] \quad (2)$$

для углов $\alpha<\alpha_0$ вплоть до направления в дно при $\alpha=-90°$, где $I_{\pm\alpha}$ — интенсивность шума, принимаемого в единичном телесном угле под углом α относительно горизонта, $W_{\text{п}}$ — плотность мощности поверхностных источников, излучаемая в единичный телесный угол вниз по нормали к поверхности, $G_{\text{п}}^2(\alpha_{\text{п}})=\sin^{2m}\alpha_{\text{п}}$ — диаграмма направленности поверхностных источников ($0{,}5\leqslant m\leqslant 2$); $W_{\text{п}}$ и $G_{\text{п}}(\alpha_{\text{п}})$ определялись из эксперимента [8, 9], а потому фактически включали также и рассеяние звука поверхностью; $\alpha_{\text{п}}$ — угол скольжения у поверхности; $K=W_{\text{д}}/W_{\text{п}}$ — коэффициент, характеризующий долю рассеиваемой дном энергии поверхностных источников. Для упрощения оценок влияния рассеяния шума дном на характеристику анизотропии в модель были введены распределенные по дну некоррелированные источники, имитирующие рассеяние шума по аналогии с поверхностными источниками динамических шумов (строго говоря, такая замена не всегда точно описывает рассеяние). Отношение поверхностной плотности мощности донных имитационных источников $W_{\text{д}}$ к таковой поверхностных — K определяется геоморфологическими характеристиками дна, знания о которых весьма ограничены. Для оценок и качественных описаний (в данном случае интерпретации эксперимента) K полагалось равным 0,01, что близко к максимальным значениям, определенным из эксперимента по обратному рассеянию звука дном [7].

Диаграмма направленности донных рассеивателей $G_{\text{д}}(\alpha_{\text{д}})$ — некоторая суммарная индикатриса рассеяния дном в полупространство при падении на поверхность дна волн сверху от всех пространственных углов — принималась в соответствии с законом Ламберта $G_{\text{д}}^2(\alpha_{\text{д}})=\sin^2\alpha_{\text{д}}$ [6, 7], где $\alpha_{\text{д}}$ — угол скольжения у дна; $V_{\text{п}}$, $V_{\text{д}}$ — коэффициенты отражения звука поверхностью и дном, зависящие от угла и частоты соответственно; R_1 и R_2 — расстояние от антенны по лучу до его первого выхода к поверхности, R_0 — длина цикла луча, $c_{\text{п}}$, $c_{\text{г}}$, $c_{\text{д}}$ — скорость звука у поверхности, на горизонте приема и у дна соответственно; β — коэффициент поглощения в воде.

Уровень шума в зоне рефракционного минимума в области углов приема вблизи горизонта $|\alpha|<\alpha_0$ определяется для условий эксперимента шумом, рассеянным в толще воды. Полагая, что рассеяние ненаправлен-

ное и происходит на изотропных неоднородностях или звукорассеивающих слоях, можно оценить уровень засветки зоны $I_р$ по отношению к уровню, эквивалентного анизотропному изотропного шумового поля $I_{экв}$ по следующей формуле [10]:

$$I_р/I_{экв}=4\pi m_v/\beta+4\pi m_v, \qquad (3)$$

где m_v — коэффициент объемного рассеяния, $I_{экв}=P^2/\rho c4\pi$, где P — звуковое давление шума, принятого ненаправленным гидрофоном. Оценки показывают, что если определить поглощение $\beta=4{,}1\times10^{-6}f^{3/2}$ [неп/м] и положить m_v равным на 1 кГц — 5×10^{-9} [1/м], на 3 кГц — 2×10^{-8} [1/м] (что [7] близко к максимальным экспериментально наблюдаемым величинам) и учесть, что при $\beta\ll1\beta$ [неп/м] $\simeq\beta$ [1/м], то получим уровень шума в зоне рефракционного минимума на 20 дБ ниже уровня эквивалентного изотропного поля. В практически невероятной ситуации (например, при прохождении плотного косяка рыбы, занимающего всю акваторию), когда $m_v=10^{-7}$ [1/м], на частоте 1 кГц уровень засветки будет порядка — 7 дБ по отношению к эквивалентному изотропному полю; следовательно, для измерения этих уровней антенна должна иметь трудно достижимый очень низкий уровень чувствительности в зоне боковых лепестков. Оценки требований к такой измерительной антенне показывают, что уровень боковых лепестков не должен для 1 кГц превышать величины порядка 1% от чувствительности в главном лепестке для условий описываемого эксперимента; поэтому уровни шума в зоне рефракционного минимума для нижеприведенных данных целиком определялись приемом в области боковых лепестков диаграммы направленности антенны, а не рассеянием звука на неоднородностях среды.

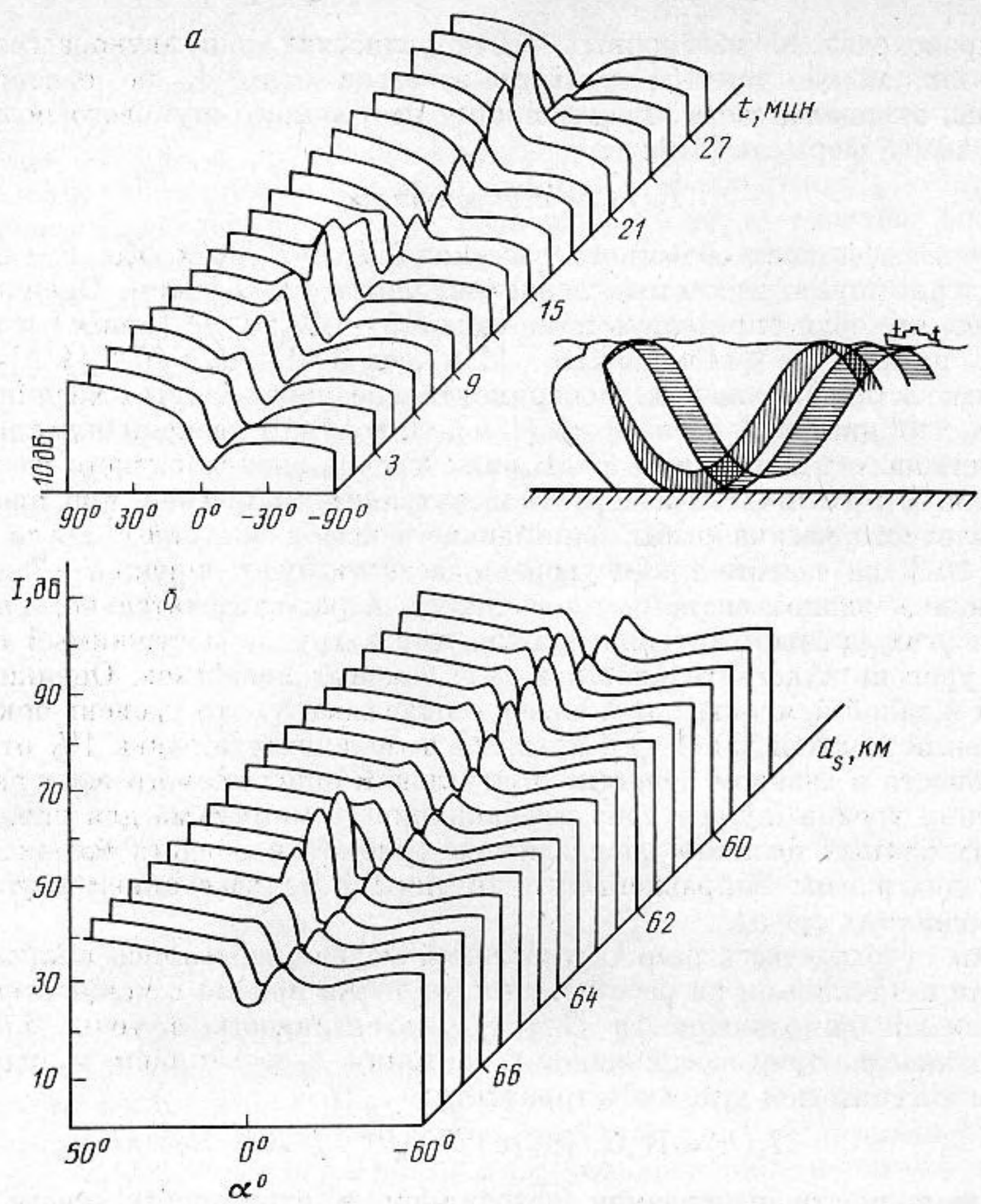
Шумы судоходства в рамках указанной модели задавались приповерхностными источниками на расстоянии d_s от точки приема с мощностью W_s и диаграммой направленности $G_s^2(\alpha_п)$; интенсивность в точке приема определялась по лучу, соединяющему антенну с источником и выходящему из антенны под углом α к горизонту:

$$I_s(\alpha)=W_sG_s^2(\alpha_п)e^{-2\beta R_s}V_д^{2(n-l)}f_s/R_s^2, \qquad (4)$$

где W_s — мощность, излучаемая источником в единицу телесного угла вниз по нормали к поверхности; R_s — длина луча, соединяющего источник и приемник, $f_s=R_s^2\cos\alpha_п/[d_s|\partial d_s/\partial\alpha_п|\sin\alpha]$ — фактор фокусировки, рассчитанный по лучу, n — число выходов луча к поверхности; $l=1$, если луч приходит к антенне сверху при $+\alpha$, и $l=0$, если луч приходит снизу при $-\alpha$.

Результирующая характеристика анизотропии шумового поля динамических и судоходных шумов свертывалась с диаграммой направленности измерительной антенны и сопоставлялась с экспериментально полученной зависимостью.

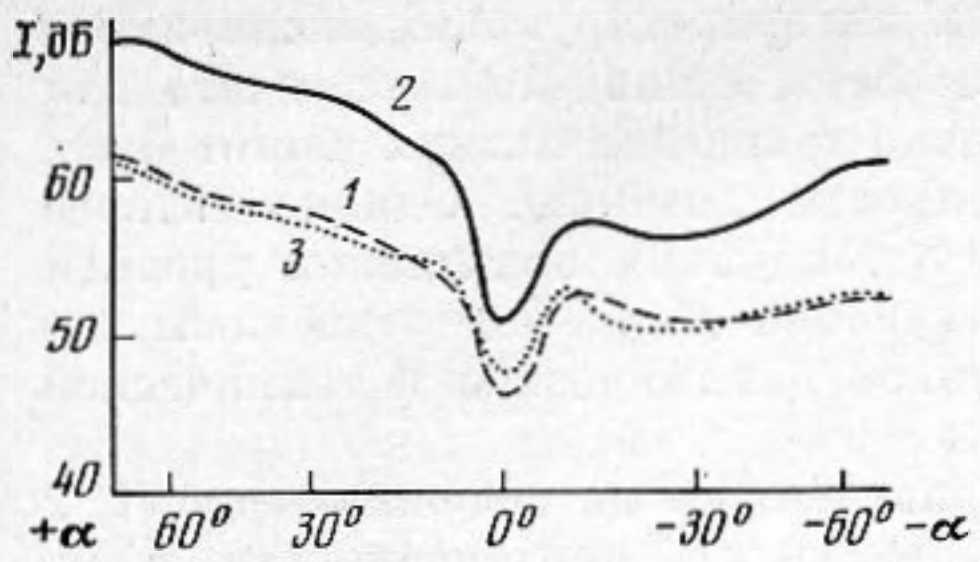
На фиг. 1 приведен пример измерения угловой направленности шумового поля на частоте 1 кГц. Профиль скорости звука в районе и особенности лучевой картины, соответствующей условиям эксперимента, схематично представлены на графике. Прием осуществлялся в подводном звуковом канале, поэтому в диапазоне углов, близких к горизонту $\alpha=0°$, наблюдался рефракционный минимум (см. фиг. 1, *а*). В ходе эксперимента главный лепесток антенны с периодом 1,5 мин плавно сканировал в диапазоне углов от +90° (направление на поверхность) до −90° (направление на дно). При этом первые 3 мин (фиг. 1, *а* ось аппликат) шум проходящего вдали судна не вносил заметных искажений в характеристику анизотропии динамических шумов района. Условия были стабильными на шумообразующей акватории; скорость ветра соответствовала в среднем 2 баллам. В дальнейшем (после 3-й минуты наблюдений) к динамическим шумам добавились шумы судоходства. Максимум в области углов, соответствующих водно-поверхностным лучам (не испытывающим потерь на отражение от дна), свидетельствовал об этом; следует отметить, что подобный этому максимум наблюдается и при прохождении локального сильного шквала. Наблюдавшийся максимум с течением времени переме-



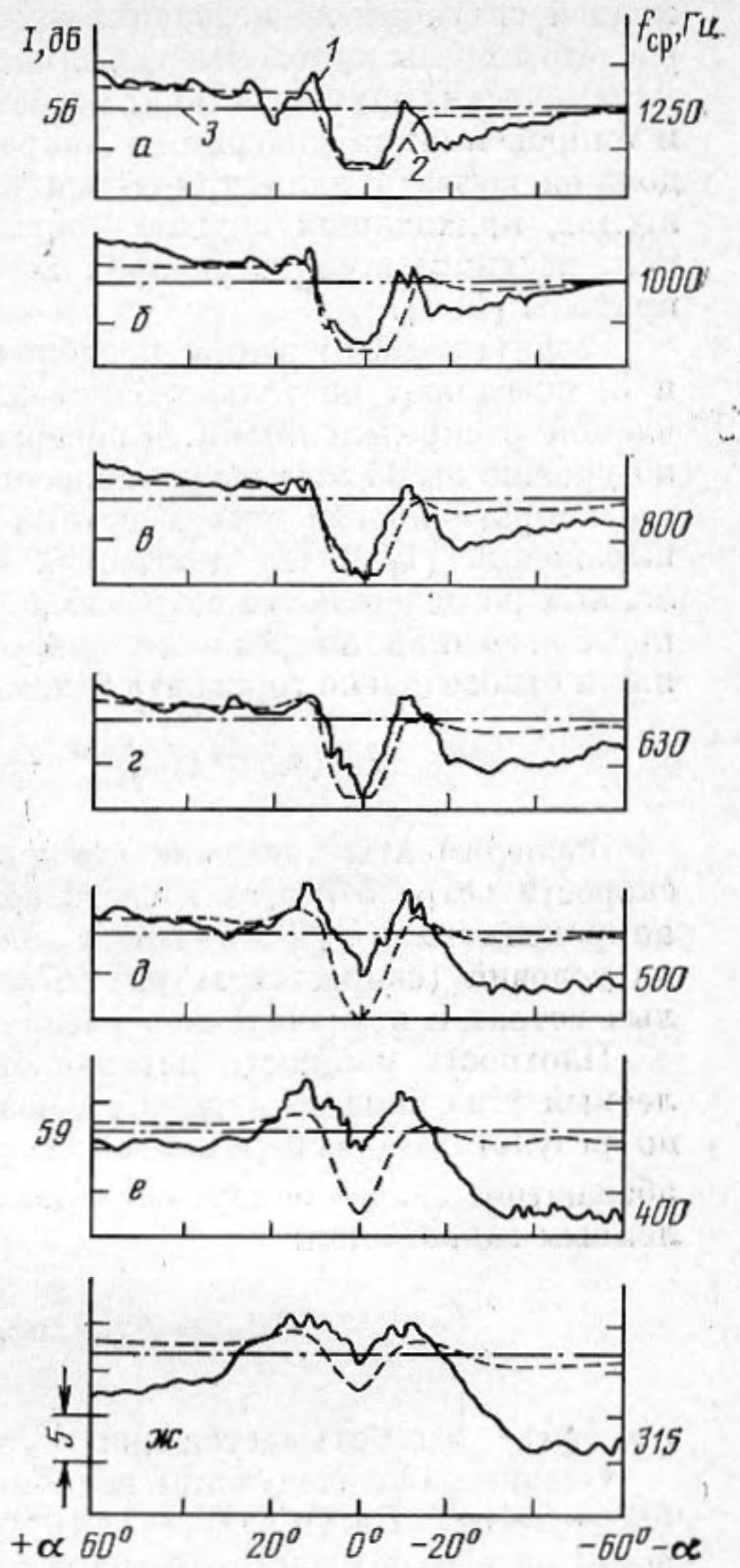
Фис. 1. Динамика характеристики анизотропии шумового поля: *а* – эксперимент, *б* – расчет, $f_{ср}$=1 кГц, ветер – 2 балла

стился из области положительных углов в зону отрицательных углов. При этом характер изменения углов и уровней в максимуме позволил судить о направлении перемещения судна (см. лучевую картину на фиг. 1). Для проверки предположения был проведен расчет характеристик анизотропии по модели шумового поля для различных дистанций до судна; при этом перебор результатов расчета позволил получить интерпретирующую эксперимент иллюстрацию (фиг. 1, *б*). Рассматривалось прохождение судном первой зоны освещенности (60-65 км для данного профиля скорости звука). При этом оказалось, что для используемой антенны и частотной области при нахождении судна в зоне геометрической тени шум судна после отражения от дна мало искажал характеристику анизотропии динамических шумов. Перемещение судна в освещенной зоне от ее дальней границы к ближней индицировалось не только по углам приема, но и по интенсивности; наибольшей помехой измерению динамических шумов судно стало во время пересечения зоны каустики, формирующей ближнюю границу освещенной зоны (см. фиг., 1, *а*, 21–24 мин измерений.)

Качественное сопоставление графиков на фиг. 1, *а*, *б* позволяет судить об удовлетворительном совпадении эксперимента и расчета для условий устойчивой и однородной гидрометеорологической обстановки. Переменные условия в районе при недостаточном знании о распределении скорости ветра над акваторией не позволяют, применяя модель, получить столь хорошее совпадение расчета с экспериментом.



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Анизотропия шумового поля при локальном изменении скорости ветра: *1* – скорость ветра 3,5 м/с, *2* – местный ветер 8÷9 м/с, *3* – расчет анизотропии для скорости ветра 4 м/с, $f_{ср}$=1 кГц. По оси абсцисс отложена угловая интенсивность шумов относительно интенсивности, создаваемой звуковым давлением 1 мкПа

Фиг. 3. Частотная зависимость характеристики анизотропии; полоса 1/3 октавы, скорость ветра 7–8 м/с; глубина погружения антенны 250 м: *1* – эксперимент, *2* – расчет, *3* – уровень эквивалентного изотропного шумового поля дБ относительно 1 мк Па; *а* – 56, *б* – 55,5, *в* – 56, *г* – 56, *д* – 56,5, *е* – 59, *ж* – 60

На фиг. 2 приведен пример такой ситуации, когда в аналогичных фиг. 1 гидрологических условиях, но при изменяющейся местной погоде (скорости ветра) характеристика анизотропии искажается и уже не соответствует расчетной. Однако знание о распределении скоростей ветра над всей шумообразующей акваторией позволяет повысить точность интерпретации эксперимента. На фиг. 2 для частоты 1 кГц приведены характеристики анизотропии при двух скоростях ветра в точке наблюдения, местное усиление ветра до 8-9 м/с не было характерно для всего определяющего шум района. Расчет (пунктир) был сделан для некоторой усредненной скорости ветра над акваторией, при этом распределение скоростей ветра в районе не задавалось. Местное возрастание скорости ветра, заметное при сопоставлении характеристик *1* и *2* на фиг. 2, приводит к искажению вертикальной направленности шумового поля, к преобладанию местных источников шума над дальними и повышению уровней в диапазоне вертикальных углов. При этом растет и уровень в области рефракционного минимума, что указывает на недостаточно низкий уровень чувствительности антенны в зоне ее боковых лепестков.

На фиг. 3 приведен еще один пример измерения характеристик анизотропии в сходных с предыдущими условиях, но в зоне сильного влияния шумов удаленного судоходства. Здесь представлены данные, полученные в третьоктавных фильтрах на разных частотах. Неопределенность судо-

ходной ситуации не позволила учесть в интерпретирующих эксперимент расчетах шумы судов. На графиках нанесены лишь данные расчета для динамических шумов океана; недостаточно точна для низких частот была и аппроксимация диаграммы направленности антенны. Однако интерес должна вызвать иллюстрируемая фиг. 3 тенденция повышения уровней шумов, приходящих в углах соответствующих водно-поверхностным лучам, несущим шум от дальних источников динамической и технической природы [5, 6].

Результаты измерений, подобные приведенным на графиках фиг. 1, 2 и 3, позволяют не только оценивать зависимость иинтенсивности, излучаемой распределенными у поверхности источниками шума, определять по уровню шума локальную скорость ветра, но и определять вид диаграммы направленности поверхностных источников динамических шумов. Из выражений (1) и (2) диаграмма направленности источников, распределенных по поверхности ветровых шумов, может быть получена после ряда преобразований по разности значений шума принятого под симметричными относительно горизонта углами [8]:

$$G_{\text{п}}^2(\alpha_{\text{п}}) = (I_{+\alpha}e^{2\beta R_1} - I_{-\alpha}V_{\text{п}}^2 e^{-2\beta R_1})\frac{\sin\alpha_{\text{п}} c_{\text{г}}^2}{W_{\text{п}} c_{\text{п}}^2}. \quad (5)$$

Эксперименты показали, что для средних условий на акватории (при скорости ветра 5-7 м/с) в частотной области около 1 кГц, если принять аппроксимацию $G_{\text{п}}^2(\alpha_{\text{п}}) = \sin^{2m}\alpha_{\text{п}}$, m близко к 1, а для широкого диапазона условий (скоростей ветра) $0{,}75 \leqslant m \leqslant 1{,}5$, при этом m меньше при малых ветрах и незначительно увеличивается с ростом скорости ветра.

Плотность мощности источников шума, излучаемую в единичный телесный угол вниз по нормали к поверхности $W_{\text{п}}$, также можно оценивать по результатам эксперимента, используя характеристики анизотропии и абсолютное значение звукового давления $P^2_{\text{экв}}$, принимаемого ненаправленным гидрофоном:

$$W_{\text{п}} = P^2_{\text{экв}}/2\pi\rho c \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} I(\alpha)\cos\alpha\, d\alpha, \quad (6)$$

где $I(\alpha)$ – рассчитывается при $W_{\text{п}}=1$ по формулам (1) и (2).

Оценки дают следующие величины для частоты 1 кГц при трех баллах ($P_{\text{экв}}=5\times10^{-4}$ Па/Гц^{0,5}) $W_{\text{п}}=7\times10^{-14}$ Вт/м^2 Гц·ср. При этом спектр мощности на верхних частотах диапазона спадает примерно на 0,5 дБ/октаву медленнее по сравнению с энергетическим спектром шума, измеренного ненаправленным гидрофоном. Вообще говоря, использование пространственных характеристик шумового поля для диагностики акватории океана, изучения ее динамики представляется перспективным направлением [4, 7].

Исследование характеристик анизотропии шумов океана позволяет при определенных условиях использовать их для измерения коэффициента отражения звука дном в зависимости от угла скольжения и частоты. Действительно, из формул (1) и (2) следует, что отношение уровней шума, принятого под симметричными к горизонту углами, дает коэффициент отражения звука дном: $V_{\text{д}}^2 = I_{-\alpha}e^{2\beta(R_0-2R_1)}/I_{+\alpha}$. Прием шума антенной, имеющей главный лепесток, соответствующий по углу раскрыва зоне рефракционного минимума характеристики анизотропии, позволяет по модуляции уровня принимаемого шума наблюдать прохождение внутренних волн; действительно, изменение c_L на горизонте антенны, особенно в зоне термоклина, приведет к изменению угла зоны рефракционного минимума $\alpha_0 = \arccos(c_{\text{г}}/c_{\text{п}})$. Исследование флуктуаций разности уровней шума, принимаемых сверху и снизу при неглубоком погружении антенны, позволяет определять параметры энергонесущей компоненты в спектре поверхностного волнения. Перечень акустических методов изучения акватории по ее шумам можно было бы продолжить. Однако в заключение следует отметить, что реальными эти методы станут только после детальных экспериментальных и теоретических исследований, осуществление которых тре-

бует повышения точности и метрологического обеспечения эксперимента и дальнейшего развития и приближения к реальной природе модели шумового поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fox G. R.* Ambien noise directivity measurements // J. Acoust. Soc. Amer. 1964. V. 36. № 8. P. 1537–1540.
2. *Axelrod E. H., Schoomer B. A., Von Winkle W. A.* Vertical directionality of ambient noise in the deep ocean at site near Bermuda // J. Acoust. Soc. Amer. 1965. V. 37. № 1. P. 77–83.
3. *Wales S. C. Diachok I. J.* Ambient noise vertical directionality in the northwest Atlantic // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 70. № 2. P. 577–582.
4. *Охрименко Н. Н., Фурдуев А. В.* О некоторых особенностях анизотропии поля шумов океана // Тр. АКИНа. 1970. Вып. 13. С. 125–135.
5. *Carey W. M., Wagstaff R. A.* Low-frequency noise fields // J. Acoust. Soc. Amer. 1986. V. 86. № 5. P. 1523–1526.
6. *Аредов А. А., Фурдуев А. В.* О связи уровня шума со скоростью ветра и размерами акватории, определяющей шумовое поле // Изв. АН СССР. ФАО. 1979. Т. 15. № 1. С. 92–98.
7. Акустика океана/Под ред. Бреховских Л. М. М.: Наука, 1974.
8. *Аредов А. А., Охрименко Н. Н., Фурдуев А. В.* Исследование вертикальной направленности поля динамических шумов в океане // Тр. X Всесоюз. акуст. конф. М.: АКИН, 1983. С. 40–44.
9. *Фурдуев А. В., Чупров С. Д.* Некоторые характеристики источников шумового поля в океане // Тр. V шк.-семин. по стат. гидроакуст. Новосибирск. Ин-т матем. СО АН СССР. 1974. С. 195–202.
10. *Белоусов А. В., Фурдуев А. В.* К оценке уровня шума в диапазоне углов рефракционного минимума поля шумов океана // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 1.

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

Поступила в редакцию
13.V.1987