

УДК 534.322 : 551.463.228

© 1993 г. В. А. Гордиенко, Б. И. Гончаренко,  
Я. А. Илюшин

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРНО-ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

В работе рассмотрены некоторые закономерности формирования шумовых полей океана применительно к условиям их регистрации комбинированной приемной системой, состоящей из разнесенных на расстояние существенно меньшее длины волны, приемника звукового давления и векторного приемника, один канал которого (условно  $Z$ ) ориентирован вертикально, два других ( $X$  и  $Y$ ) горизонтально.

Одним из основных источников помех при проведении акустических измерений в океане являются его собственные шумовые поля. Шумы естественного происхождения порождаются различными динамическими процессами, протекающими в водной среде, земной коре и атмосфере. Технические шумы в основном создаются судами. В прибрежных зонах они могут также вызываться работой различных промышленных объектов. Усилившийся в последнее время интерес к низким звуковым частотам и регистрации сигналов малых уровней стимулировал работы по изысканию новых акустических средств и методов измерений. Одним из таких технических решений явилось введение в приемные системы приемников градиента давления, трехкомпонентный вариант которого получил название «векторный приемник» [1]. Однако использование их для целей исследования полей сигналов и шумов в океане привело к необходимости постановки вопроса об адекватности измерений, выполненных векторным приемником и приемными системами на базе ненаправленных гидрофонов. Хотя формально в потенциальных акустических полях имеет место однозначная связь между звуковым давлением, его градиентом и колебательной скоростью частиц среды в волне [2], конкретные соотношения между ними существенным образом зависят от механизмов и условий формирования поля.

Из общих гидродинамических соображений для описания акустических полей удобно выбрать звуковое давление и колебательную скорость. С практической точки зрения, ввиду отсутствия в настоящее время удобных приемников колебательной скорости [1], проекцию колебательной скорости  $V_r$  на произвольное направление  $r$  можно получить, измерив векторным приемником градиент звукового давления  $\partial P / \partial r$  и воспользовавшись известным соотношением [2]

$$\rho \frac{dV}{dt} = - \text{grad } P.$$

Проинтегрировав его по времени, имеем

$$V_r = - \frac{1}{\rho} \int \partial P / \partial r dt.$$

Для удобства сравнения будем выражать полученные с помощью векторного приемника численные значения проекций колебательной скорости  $V_i$  на оси декартовой системы координат  $X, Y, Z$  или произвольное направление  $r$ , задаваемое азимутальным  $\Phi$  и полярным  $\theta$  углами, отсчитываемыми соответственно от оси  $X$  в плоскости  $XY$  и оси  $Z$  в вертикальной плоскости ( $i = x, y, z, r$ ) в эквивалентных

единицах звукового давления  $P$ , путем формального их домножения на волновое сопротивление среды. Таким образом, любой проекции колебательной скорости  $V_i$  будет соответствовать значение  $P_{pi} = \rho c V_i$ .

Рассмотрим основные соотношения между перечисленными компонентами поля в рамках модельных представлений. В настоящее время предложены и используются три акустические модели шумового поля. Обычно это совокупность точечных взаимно некоррелированных источников, расположенных с равномерной плотностью в горизонтальной плоскости (модель поверхностного шума [3, 4]), в объеме или на поверхности сферы радиуса  $a$ , в центре которой находится приемная система (модель объемного шума [3]), или вдоль горизонтальной линии (модель береговой линии [5]). В последних двух случаях каждый источник обладает характеристикой направленности вида  $g_i(\alpha) = \cos^n \alpha$  в вертикальной (поверхностный шум) или горизонтальной (береговой прибой) плоскостях.

Введение в приемные системы векторных приемников позволило существенно расширить число подлежащих измерению параметров поля. В рамках данной работы выделим следующие из них:

— спектральные уровни колебательной скорости частиц среды в волне  $V_i (i = x, y, z)$  и ее составляющей  $V_r$  вдоль произвольного направления  $r$ ;

— разностно-фазовые характеристики между взаимно ортогональными компонентами колебательной скорости, измеренными в одной точке пространства, которые в полосе частот  $\Delta f$  удобно характеризовать функцией взаимной корреляции

$$\rho_{ij} = \langle V_i(t) V_j(t) \rangle_T / \sqrt{\langle V_i^2(t) \rangle_T \langle V_j^2(t) \rangle_T} \quad (i, j = x, y, z; i \neq j). \quad (1)$$

Здесь и далее для двух произвольных функций  $F_i(t)$  и  $F_j(t)$

$$\langle F_i(t) F_j(t) \rangle_T = 1/T \int_0^T F_i(t) F_j(t) dt; \quad (2)$$

$$\langle F_i^2(t) \rangle_T = 1/T \int_0^T F_i^2(t) dt, \equiv F_i^2, \quad (3)$$

где  $T$  — время усреднения;

— плотность потока акустической мощности, характеризующая часть энергии волны, которая переносится при ее распространении в пространстве  $W_{Ri} = \langle P(t) V_i(t) \rangle_T$ ;

— реактивная плотность энергии, характеризующая энергию стоячих волн в точке измерений  $W_{Ri} = \langle P(t) V_i(t) e^{j\omega t} \rangle_T$ ;

— взаимная корреляция между звуковым давлением и колебательной скоростью, представляющая усредненное нормированное значение соответствующей составляющей плотности потока  $W_{Ri}$

$$\rho_{pi} = \langle P(t) V_i(t) \rangle_T / \sqrt{\langle P^2(t) \rangle_T \langle V_i^2(t) \rangle_T}. \quad (4)$$

Для разнесенных на расстояние  $d$  в пространстве под углом  $\theta$  к плоскости  $XU$  и  $\Phi$  относительно плоскости  $XZ$  звукоприемников целесообразно ввести функции пространственной взаимной корреляции

$$\rho_{ij}(d, \theta, \Phi, \tau) = \langle V_{i1}(t) V_{j2}(t + \tau) \rangle_T / \sqrt{\langle V_{i1}^2(t) \rangle_T \langle V_{j2}^2(t) \rangle_T}. \quad (5)$$

Пусть  $g_i(\Phi, \theta)$  — характеристика направленности звукоприемника, заглубленного на расстояние  $h \gg \lambda$  от горизонтальной шумящей плоскости. Тогда, производя энергетическое суммирование вкладов отдельных источников, для поверхностного шума, однородной безграничной среды и приемной системы с харак-

теристикой направленности приемника давления и каналов  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  векторного приемника соответственно  $g_p = 1$ ,  $g_x = \cos \Phi \sin \theta$ ,  $g_y = \sin \Phi \sin \theta$ ,  $g_z = \cos \theta$  имеем

$$P^2/V_x^2 = P^2/V_y^2 = 2(n+1), \quad (6)$$

$$P^2/V_z^2 = (n+1)/n.$$

В выражениях (6)  $P^2$ ,  $V_x^2$ ,  $V_y^2$  и  $V_z^2$  представляют усредненные по алгоритму (3) за время  $T$ , существенно большее периода колебаний, значения квадратов соответствующих компонент поля. Отметим, что для  $n$ , близкого к нулю, результат в сильной мере зависит от затухания звука в воде, так что вопрос об истинном значении  $n$  становится принципиальным.

Аналогично для модели изотропного шума

$$P^2/V_x^2 = 3.$$

Для модели шума берегового прибора при  $g(\Phi, \theta) = 1$

$$P^2/V_x^2 \approx P^2/V_y^2 = 2 - 0(h/r),$$

где  $0(h/r)$  — небольшая поправка, определяемая величиной отношения глубины  $h$  погружения приемной системы к расстоянию  $r$  до шумящей линии.

Ранее нами было показано [1], что для удаленных источников шума, энергия которых преимущественно приходит с горизонтальных направлений (например, шумы дальнего судоходства), характерны соотношения

$$P^2/(V_x^2 + V_y^2) \approx 1, \quad P^2/V_z^2 > 15 \dots 30 \text{ дБ}. \quad (7)$$

При наличии на акватории удаленных в направлении  $r$  сосредоточенных источников

$$P^2/V_x^2 = 1,0 \dots 1,05, \quad \text{или} \quad 0 \dots 0,5 \text{ дБ},$$

$$\Delta\Phi_{pr} \leq 4 \dots 5^\circ.$$

(здесь  $\Delta\Phi_{pr}$  — разность фаз между компонентами поля  $P$  и  $V$ ).

Отметим, что во всех перечисленных случаях выполняется условие

$$P^2/(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2) = 1. \quad (8)$$

Невыполнение условия (8) свидетельствует либо о наличии полей неволнового происхождения (шумы обтекания, турбулентные пульсации и пр.), либо о работе в ближнем поле источников.

Соотношения (6) были неоднократно проверены в условиях закрытых водоемов и открытого океана вдали от судоходных трасс, причем наблюдаемые значения отношений  $P^2/V_x^2 \approx 2 \dots 3$  дБ и  $P^2/V_x^2 \approx P^2/V_y^2 = 5 \dots 6$  дБ соответствовали значениям  $n \approx 0,9 \dots 1,1$ . Это дало основания в дальнейшем при анализе влияния дна и стратификации на поле поверхностных шумов представлять их модель в виде точечных взаимно некогерентных монополей, равномерно распределенных на плоскости, параллельной свободной поверхности воды и отстоящей от нее на малое по сравнению с длиной волны расстояние  $d_x$ . Дальнейшие расчеты проводились на ЭВМ.

К наиболее важным результатам расчетов шумового поля, генерируемого взволнованной поверхностью, в описанных выше модельных представлениях относятся следующие.

1. При отсутствии стратификации основной вклад в шумовое поле вносит площадь радиусом  $r$  не более  $3 \dots 5$  глубин места  $H$  для случая мелкого моря или около  $5 \dots 10$  глубин  $h$  погружения приемной системы в глубоком море. Для однородного полупространства этот результат легко получить аналитически, сравнивая результаты энергетического суммирования вкладов отдельных источ-

ников (интеграла по поверхности), расположенных внутри окружности радиуса  $r$  при различных его значениях. Для плоского слоя глубиной  $H$  с импедансным дном, характеризуемым коэффициентом отражения  $V(f, \theta)$ , интегрирование проводилось с помощью ЭВМ.

2. В широких пределах изменения коэффициента отражения от дна  $V(f, \theta)$  и глубины места  $H$  при выполнении условия  $kh > 3$  ( $k$  — волновое число) зависимость отношений  $P^2/V_x^2$  от частоты не наблюдается. Для мелкого слоя имеет место слабо выраженная осциляция этих отношений, однако во всех случаях, когда  $d_z < \lambda/4$ ,  $P^2/V_x^2 \approx P^2/V_y^2 = 5 \dots 7$  дБ,  $P^2/V_z^2 = 2 \dots 3$  дБ.

Оба результата слабо зависят от фактора фокусировки и отражающих свойств грунта, поэтому сохраняют свои численные значения и в вертикально стратифицированном океане.

3. Для измерений, выполненных в одной точке акустического поля, коэффициент взаимной корреляции  $\rho_{xy}$  взаимно ортогональных каналов  $V_x$  и  $V_y$  при времени задержки  $\tau = 0$  в среднем равен нулю (более точно, при конечном времени усреднения  $T$  определяется комбинацией дисперсий компонентов  $V_x$  и  $V_y$ ).

4. Коэффициент взаимной корреляции  $\rho_{pz}$  в общем случае отличен от нуля, а величина его зависит от глубины погружения приемной системы и акустических параметров дна.

Для глубокой воды  $\rho_{pz} \approx 0,96$ . При увеличении коэффициента отражения от дна величина  $\rho_{pz}$  в среднем уменьшается, но носит осциллирующий характер. Аналогичное уменьшение  $\rho_{pz}$  наблюдается в случае стратифицированного по вертикали океана с выраженным звуковым каналом в области измерений.

5. Так же как и в случае регистрации сигналов разнесенными в пространстве приемниками звукового давления, имеет место зависимость взаимной корреляции между отдельными каналами векторных приемников от отношения  $d/\lambda$  ( $\lambda$  длина волны), угла наклона  $\theta$  прямой, соединяющей центры векторных приемников, к горизонтальной плоскости и комбинации пар каналов  $i, j$ . Общее выражение приведено в работе [6].

Существенно, что около 90% энергии поля, генерируемой взволнованной поверхностью, определяется ограниченным участком близлежащей поверхности. Шумы дальнего судоходства приходят преимущественно с горизонтальных направлений [7]. В соответствии с (8) вертикальный канал ВП оказывается защищенным от шумов дальнего судоходства, так что в случае отсутствия судов и других источников в непосредственной близости от приемной системы канал  $V_z$  дает информацию об истинном значении уровня поверхностных шумов. Если обозначить  $P_n^2$  — уровни звукового давления, генерируемого взволнованной поверхностью,  $P_r^2$  — аналогичные уровни шумов, приходящие из дальней зоны, тогда их относительный вклад можно оценить, исходя из измеренных значений  $P^2/V_z^2$ :

$$P_r^2/P_n^2 \approx (P^2/V_z^2) n/(n+1) - 1. \quad (9)$$

На рис. 1 приведены экспериментально определенные отношения  $P^2/V_x^2$ ,  $P^2/V_y^2$  и  $P^2/V_z^2$  для трех глубоководных, удаленных от судоходных трасс районов океана. Первый район (рис. 1, а) характеризуется гидрологией с выраженным звуковым каналом на глубине 100...300 м (рис. 1, г). Во втором районе (рис. 1, б) звуковой канал располагался не выше 1100...1200 м (рис. 1, д). Третий район (рис. 1, в) вблизи фронтальной зоны представлял двумерно стратифицированный океан с устойчивым в пространстве и времени каналом, фрагменты вертикального сечения которого изображены на рис. 1, е.

Для первых двух районов в области частот выше 200...300 Гц наблюдаемые на глубине порядка 100 м значения отношений  $P^2/V_x^2 \approx P^2/V_y^2 = 5 \dots 7$  дБ и

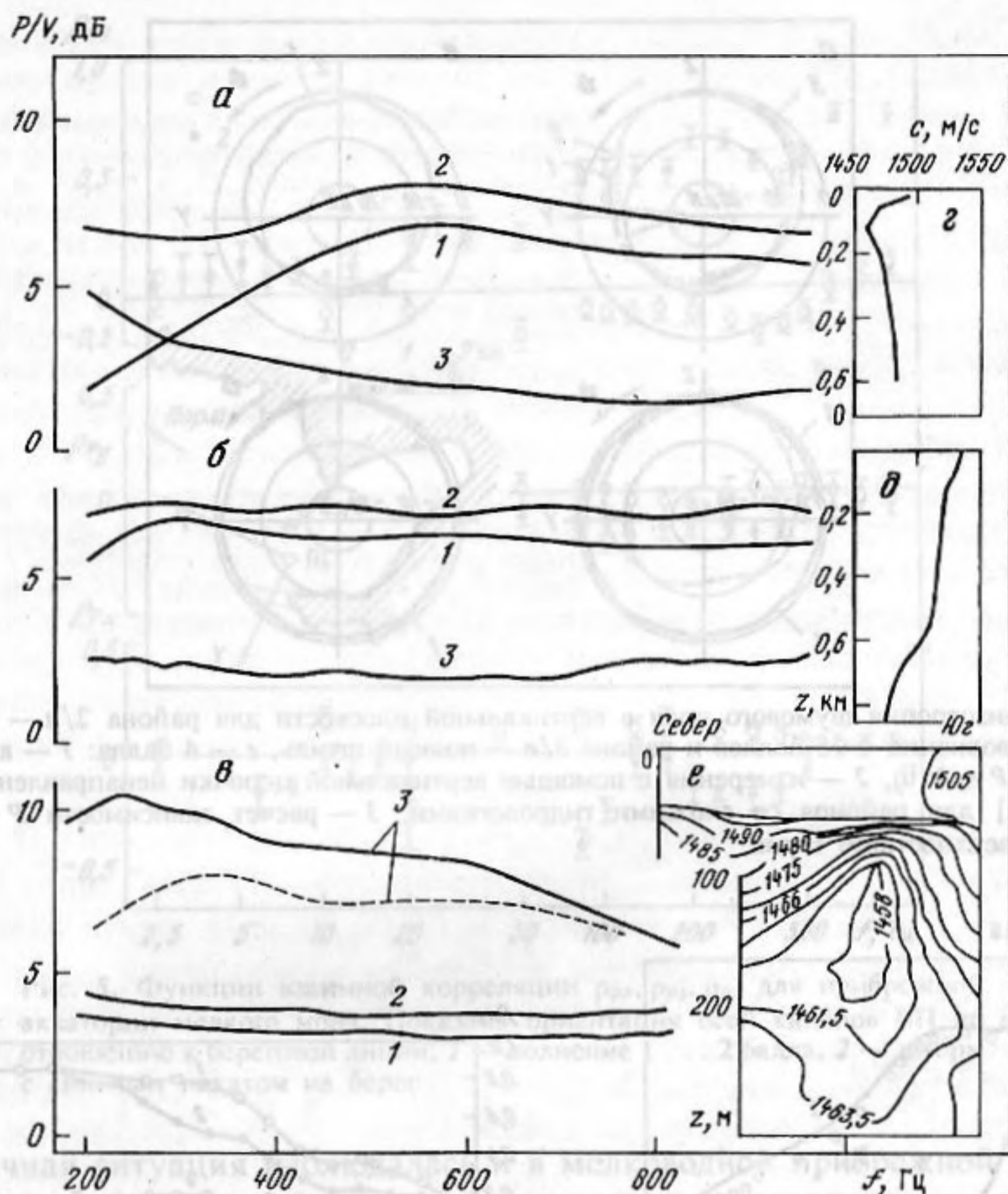


Рис. 1. Амплитудные соотношения между звуковым давлением  $P$  и проекциями колебательной скорости  $V_x, V_y, V_z$  для района 1 со звуковым каналом на глубине 100...200 м (а), района 2 — глубоководным звуковым каналом (б), района 3 — с двумерной в вертикальной плоскости стратификацией океана (в), вертикальный профиль скорости звука для районов 1 и 2 (г, д), линии скорости звука в вертикальном сечении для двумерно стратифицированного океана (е); 1 —  $P^2/V_x^2$ ; 2 —  $P^2/V_y^2$ ; 3 —  $P^2/V_z^2$

$P^2/V_z^2 = 2 \dots 4$  дБ свидетельствуют о том, что основная энергия звукового поля формируется близлежащими участками поверхности. Характерная анизотропия в вертикальной плоскости, полученная путем вращения характеристики направленности приемной системы типа кардиоиды, для  $f > 300$  Гц составляет 10...13 дБ (рис. 2, а—б) и слабо зависит от состояния поверхности океана.

Наиболее существенные отличия наблюдались для третьего района. Вплоть до частот порядка 1 кГц отношение  $P^2/V_z^2$  составляет 6...11 дБ при штиле (рис. 1, в) и около 5...8 дБ при волнении 4 балла, причем  $P^2/V_z^2 > P^2/V_x^2 \approx P^2/V_y^2$ , т. е. основная часть энергии приходит с горизонтальных направлений. В соответствии с (9) доля этой энергии по отношению к уровню звукового давления, генерируемого собственно волновой поверхностью, составляет  $P_r^2/P_n^2 = 3 \dots 5$ . Похожая картина наблюдается и вблизи судоходных трасс (рис. 3).

Функция взаимной корреляции  $\rho_{pz}$  для первого района составляет 0,2...0,3, для второго — 0,8...0,95, а ее знак соответствует приходу энергии преимущественно от поверхности. Для  $f < 300$  Гц при уменьшении ветрового волнения анизотропия в вертикальной плоскости уменьшается, по-видимому, за счет увеличения вклада удаленных источников в регистрируемые уровни. В этой же

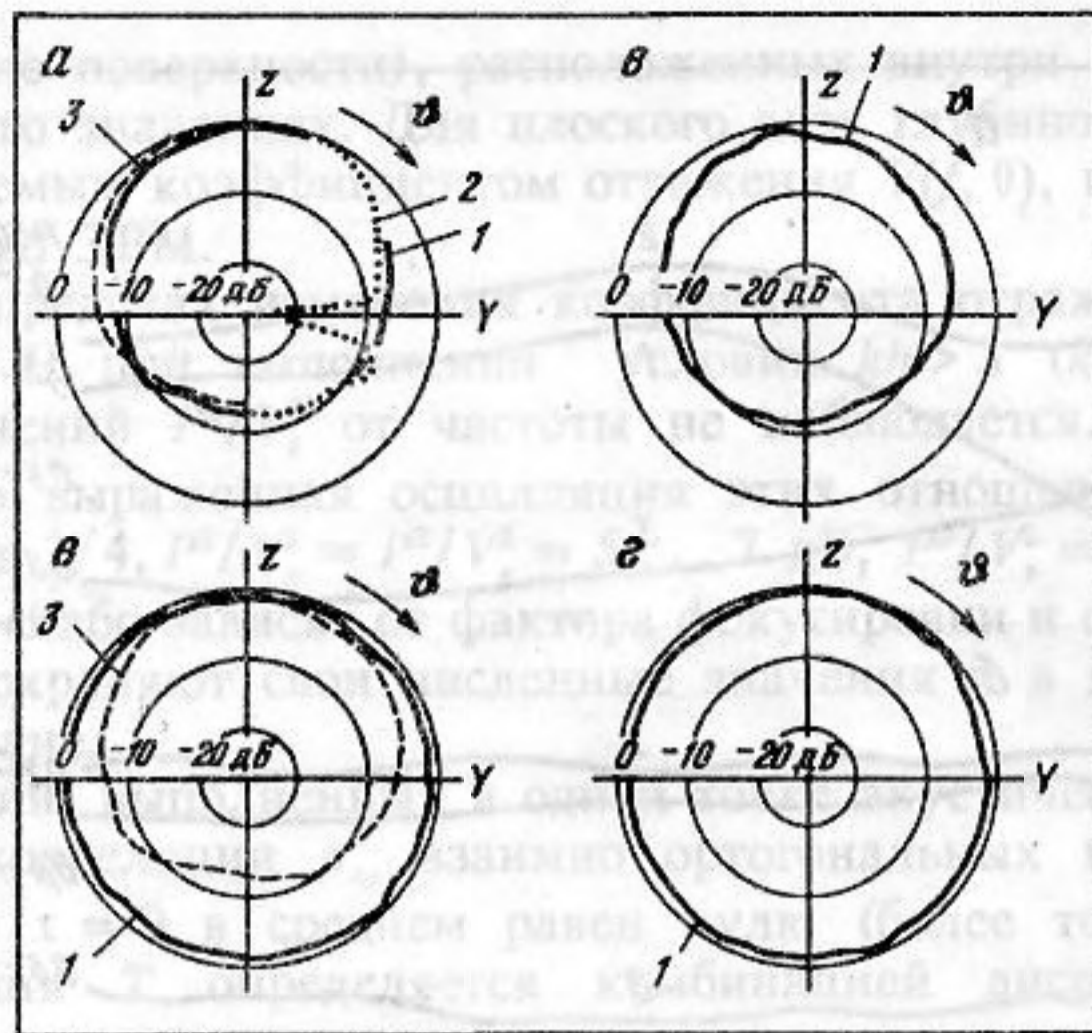


Рис. 2. Анизотропия шумового поля в вертикальной плоскости для района 2/а — волнение 1 балл; б — волнение 4—5 баллов и района 3/в — полный штиль, г — 4 балла: 1 — анизотропия величины  $P + V(\theta)$ , 2 — измерения с помощью вертикальной цепочки ненаправленных гидрофонов [12] для районов со схожими гидрологиями, 3 — расчет зависимости  $P + V(\theta)$  для модели поверхностного шума

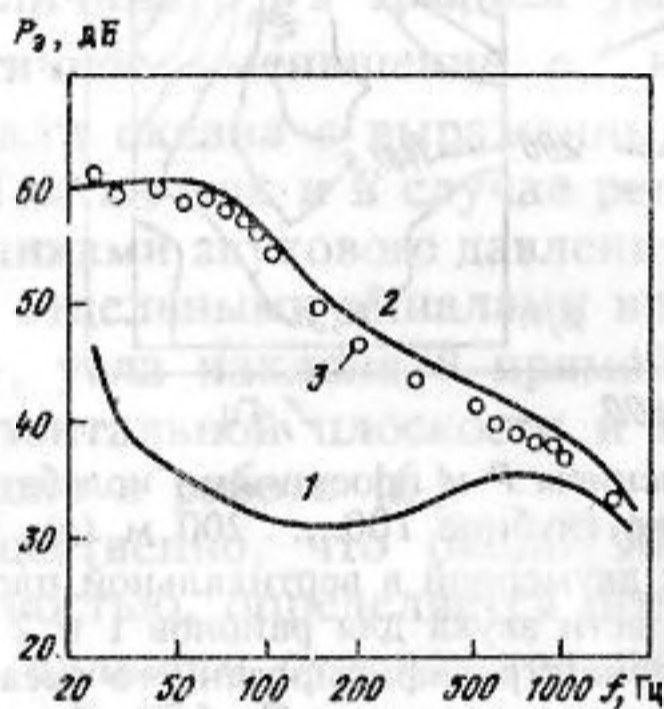


Рис. 3

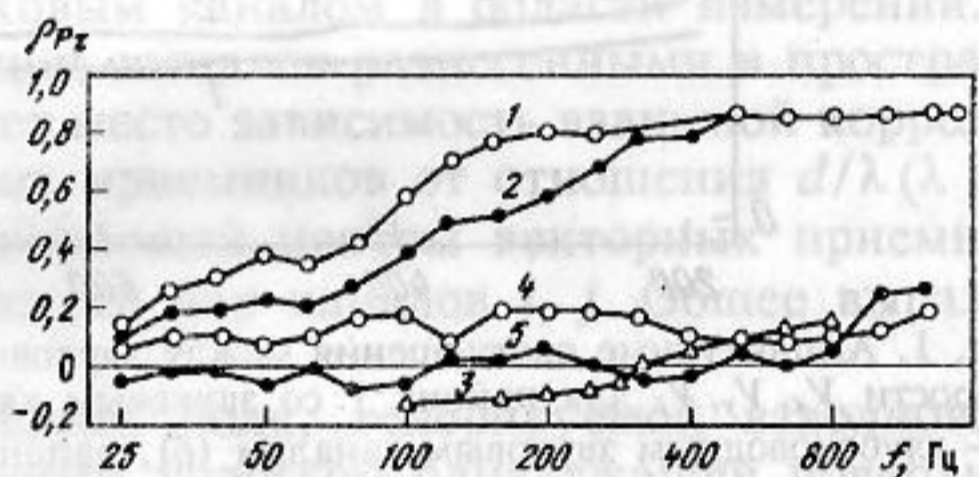


Рис. 4

Рис. 3. Характерные соотношения эквивалентных уровней звукового давления, зарегистрированные КПС вблизи судоходной трассы: 1 —  $V_z$ ; 2 —  $P$ ; 3 —  $\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$

Рис. 4. Взаимная корреляция  $\rho_{pz}$  между звуковым давлением и вертикальной составляющей колебательной скорости: 1 — район 2, волнение 4—5 баллов; 2 — район тот же, полный штиль, 1 балл; 3 — район 1, 1—2 балла; 4 — район 3, 4 балла; 5 — район тот же, 1 балл

частотной области проявляются и некоторые особенности поведения  $\rho_{pz}$ . В случае глубокого океана и развитого волнения вектор потока акустической мощности  $W_{Rz}$  направлен вниз. Экспериментальные значения коэффициента корреляции между  $P$  и  $V_z$  лежат в пределах  $0,2 \dots 0,8$  в зависимости от окружающей обстановки (рис. 4). При наличии звукового канала на небольших глубинах или на относительно мелководных акваториях, когда за счет взаимодействия с дном коэффициент взаимной корреляции между давлением и компонентом  $V_z$  поля, генерируемого взволнованной поверхностью, уменьшается до  $0,1 \dots 0,2$ , доминировать в смысле потока акустической мощности могут шумы дальнего судоходства, энергия которых во многих случаях приходит снизу под углом  $5 \dots 20^\circ$  относительно плоскости  $XY$ , т. е. знак  $\rho_{pz}$  изменяется. Именно этому случаю соответствует корреляция  $\rho_{pz}$ , приведенная на рис. 4 для первого района.

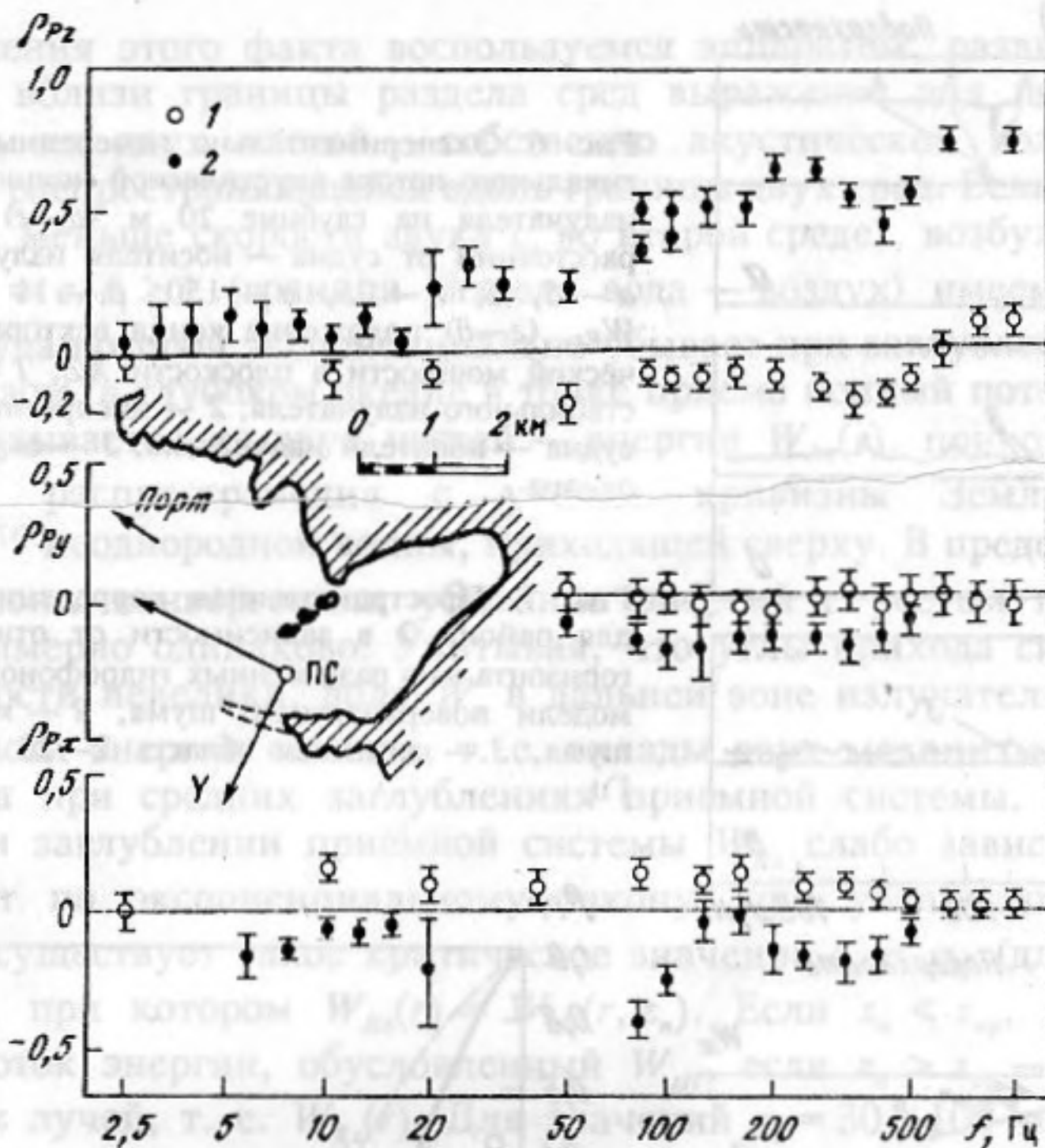


Рис. 5. Функции взаимной корреляции  $r_{px}$ ,  $r_{py}$ ,  $r_{pz}$  для прибрежной акватории мелкого моря. Показана ориентация осей каналов ВП по отношению к береговой линии: 1 — волнение 1...2 балла, 2 — шторм с сильным накатом на берег.

Аналогичная ситуация наблюдалась и в мелководной прибрежной шельфовой зоне. На рис. 5 приведена частотная зависимость корреляции  $r_{pz}$ , полученная при анализе сигналов в 1/3 октавных полосах, встровом волнении 1...2 балла (кривая 1) и шторме (кривая 2) с сильным накатом на каменистый берег. Из рисунка видно, что по мере увеличения волнения  $r_{pz}$  растет. При слабом волнении в ряде случаев (преимущественно на низких частотах)  $r_{pz}$  отрицательна. Сопоставляя корреляционные отношения  $r_{px}$  и  $r_{py}$ , можно показать, что при малом волнении направление прихода энергии соответствует открытой части акватории, в северо-западной части которой находится морской порт с круглосуточно работающими механизмами. При шторме доминирующим в горизонтальной плоскости становится шум, генерируемый за счет наката на берега бухты, островов, южной оконечности мыса и на мель, выдающуюся в море (пунктир на рис. 5).

Ранее при обсуждении особенностей формирования акустического поля сосредоточенного источника при распространении сигнала на протяженных трассах мы неоднократно отмечали, что в глубоком океане при погружении излучателя на глубину  $z_n = 50-100$  м сигнал в вертикальной плоскости приходит преимущественно снизу под углом  $3-10^\circ$  к горизонту [1] независимо от характера гидрологии, т. е. вертикальная составляющая потока акустической мощности  $\langle W_{Rz} \rangle_T < 0$ . Этот результат не вытекает из классического рассмотрения распространения звука в стратифицированном океане. Газарян осуществил ряд расчетов и показал, что преимущественный приход лучей снизу может быть качественно с физической точки зрения объяснен учетом кривизны Земли (см., например, [7], рис. 6). При средних заглублениях (порядка 100 м) излучателя и приемной системы последняя на протяженных трассах оказывается всегда как бы выше источника по отношению к линии горизонта в точке приема. В пределах первой

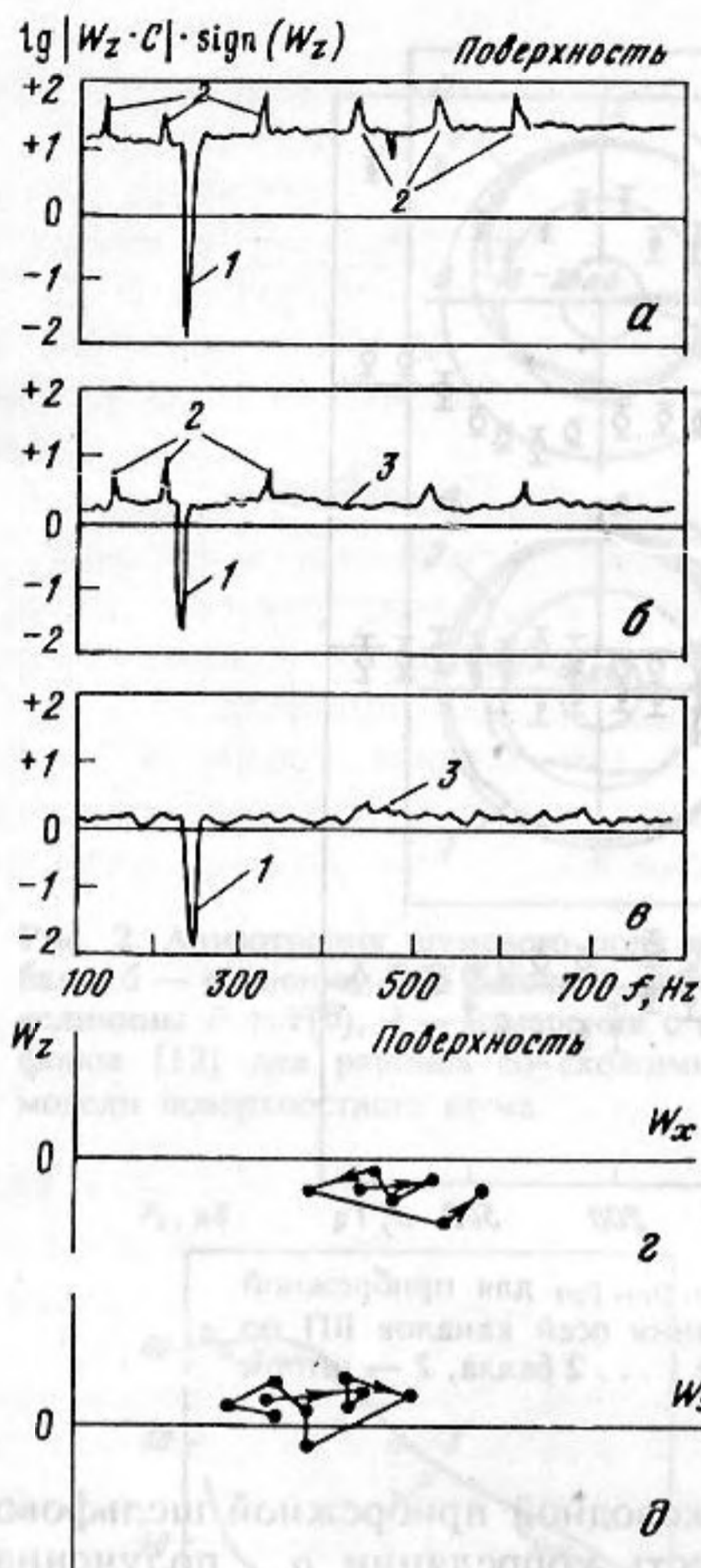


Рис. 6

Рис. 6. Экспериментально измеренные значения вертикального потока акустической мощности в океане для излучателя на глубине 70 м (а—б) и 5 м (в) на расстоянии от судна — носителя излучателя в милях: а — 5, б, в — 25, в — 150, д — 11 (а—в) — спектр  $W_{Rz}$ , (г—д) положение конца вектора потока акустической мощности в плоскости  $XZ$ , 1 — сигнал высоко стабильного излучателя; 2 — дискретные составляющие судна — носители излучателя; 3 — окружающие шумы океана

Рис. 7. Пространственная корреляция шумов океана для района 2 в зависимости от отношения  $d/\lambda$  для горизонтально разнесенных гидрофонов: 1 — расчет для модели поверхностного шума, 2 — модель объемного шума, 3 — частотная область 2—20 Гц, 4 — 20—800 Гц

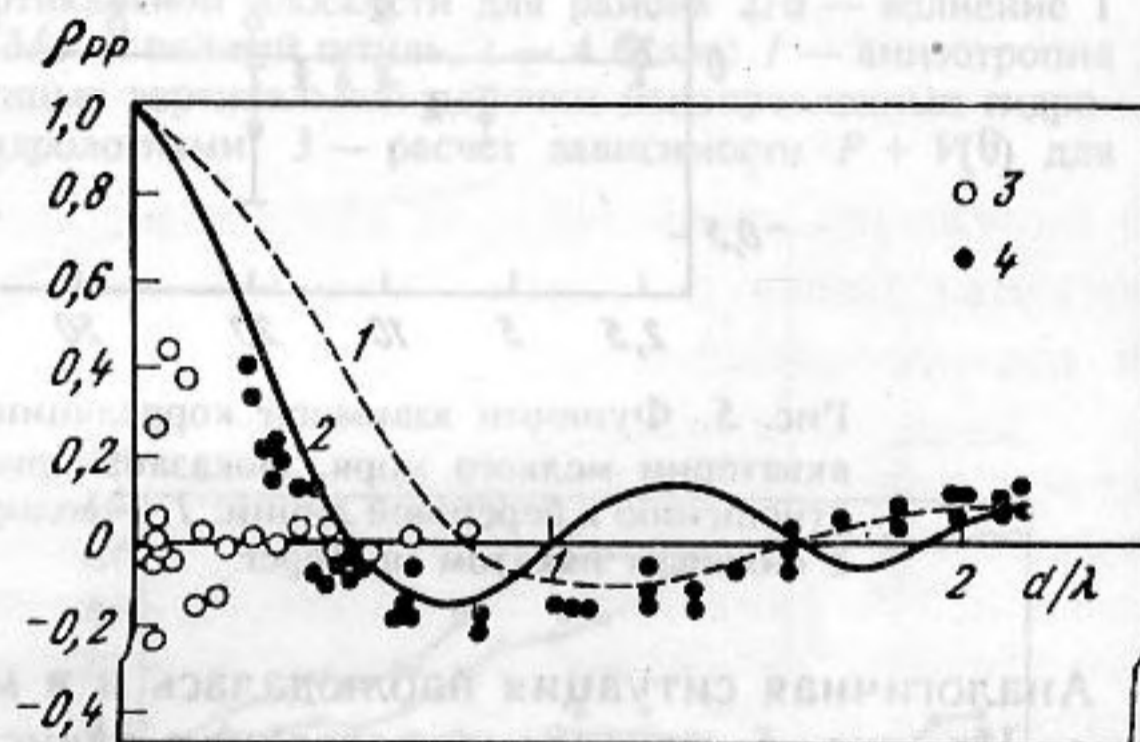


Рис. 7

зоны конвергенции некоторое влияние может оказывать характер гидрологии, как, например, при формировании поля сигнала в вертикальной плоскости вблизи фронтальной зоны, обсуждавшееся нами ранее [8]. Чтобы установить, насколько обнаруженная закономерность является фундаментальной, мы провели дополнительный анализ результатов натурных исследований, проведенных нами в период с 1983 по 1990 гг. В качестве акустических датчиков приемной системы во всех случаях использовались трехканальные приемники градиента давления конструкции МГУ [1]. Анализировались данные для протяженных глубоководных трасс различных районов океана. Некоторые результаты экспериментов приведены на рис. 6. Отметим, что в тех случаях, когда собственные шумы судна — носители излучателя (в частности, дискретные составляющие его спектра) превышали уровень шумов океана в точке проведения измерений, они регистрировались как приходящие сверху (рис. 6, а, б). В этой связи мы проанализировали направление прихода сигнала для различных глубин погружения излучателя от 3 до 70 м (заглубление приемной системы составляло 30—50 м). Оказалось, что при приеме сигналов от излучателя, опущенного с борта НИС на глубину не более 5—15 м (рис. 6, д) или собственных шумовых сигналов проходящих мимо судов, энергия в точке приема приходит преимущественно сверху, т. е.  $\langle W_z \rangle_T > 0$ .

В отдельных случаях наблюдались флуктуации мгновенных значений направлений прихода сигнала в вертикальной плоскости, обусловленные наличием различного рода возмущений между точками излучения и приема сигнала.

Для объяснения этого факта воспользуемся аппаратом, развитым в [5], где показано, что вблизи границы раздела сред выражение для потенциала поля будет состоять из двух частей — собственно акустической волны (прямой и отраженной) и распространяющейся вдоль границы двух сред. Если  $n < 1$  (скорость звука в воде  $c$  меньше скорости звука  $c_1$  во второй среде), возбуждается боковая волна. Если  $n = c/c_1 > 1$  (граница раздела вода — воздух) имеем неоднородную волну, амплитуда которой экспоненциально убывает при заглублении излучателя.

Таким образом, в глубоком океане в точке приема полный поток акустической мощности складывается из двух частей — энергии  $W_{Rz}(r)$ , приходящей снизу за счет условий распространения с учетом кривизны Земли, и энергии  $W_{zH} = W(r)e^{-kF(z)}$  неоднородной волны, приходящей сверху. В пределах по крайней мере первой зоны конвергенции убывание энергий с ростом горизонтального расстояния примерно одинаково. Учитывая, что углы прихода сигнала в вертикальной плоскости невелики, доля  $W_z$  в дальней зоне излучателя составляет не более 5% от всей энергии сигнала, т. е. вклады двух механизмов оказываются одного порядка при средних заглублениях приемной системы. Поскольку при фиксированном заглублении приемной системы  $W_{Rz}$  слабо зависит от глубины, а  $W_{zH}$  убывает по экспоненциальному закону, при увеличении заглубления излучателя  $z_n$  существует такое критическое значение  $z_n = z_{кр}$  (для относительно небольших  $h$ ), при котором  $W_{Rz}(r) = W_{zH}(r, z_n)$ . Если  $z_n < z_{кр}$ , доминирующим оказывается поток энергии, обусловленный  $W_{zH}$ , если  $z_n > z_{кр}$  — поток энергии за счет водных лучей, т. е.  $W_{Rz}(r)$ . Для значений  $z_n = 30—100$  м  $z_{кр} = 15—20$  м, так что по знаку усредненного во времени вертикального потока акустической мощности можно судить качественно о величине заглубления источника сигнала.

Аналогичная ситуация наблюдается и в случае мелководных акваторий. Однако для мелководных акваторий глубиной 25—40 м большой протяженности может возникнуть эффект экранировки описанной выше закономерности за счет боковой волны, распространяющейся вдоль границы вода — грунт. В этом случае при значительных удалениях излучателя сигнал может быть зарегистрирован как приходящий снизу при любом заглублении излучателя. Именно с таким явлением мы столкнулись при проведении исследований в некоторых мелководных районах шельфовой зоны Тихого океана.

О пространственной корреляции шумов океана можно судить по данным рис. 7, на котором приведена функция пространственной корреляции сигналов, снимаемых с приемников звукового давления, разнесенных в пространстве по горизонтали на расстояние  $d$  в глубоком океане (район 2), в зависимости от отношения  $d/\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны). Поскольку для эксперимента использовались пять равноудаленных приемников, малым значениям  $d/\lambda$  соответствуют преимущественно низкие частоты, большим — высокие. Из рис. 7 видно, что в области высоких частот зависимость  $\rho_{pp}(d/\lambda)$  близка к расчетной для модели поверхностного шума (сплошная линия). По мере понижения частоты экспериментальные точки начинают группироваться вблизи кривой, описывающей объемный шум. Область перехода соответствует частотам 150...200 Гц, ниже которых начинает достаточно резко убывать коэффициент корреляции  $\rho_{pz}$  (рис. 4).

Ниже 20 Гц функция взаимной корреляции определяется преимущественно гидродинамическими шумами. Поскольку радиус корреляции для них невелик, при расстояниях  $d > 1,5$  м средние значения  $\rho_{pp}$  близки к нулю, хотя дисперсия  $P$  достаточно велика. На рис. 7 частотам  $f < 20$  Гц соответствуют не заштрихованные точки.

Характер зависимости  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{yy}$  от отношения  $d/\lambda$  (направление  $X$  перпендикулярно линии разнесения приемников) в области высоких частот  $f > 200$  Гц удовлетворительно описывается в рамках модели поверхностных шумов (рис. 8). На низких частотах наблюдается расхождение с теоретической кривой, связанное

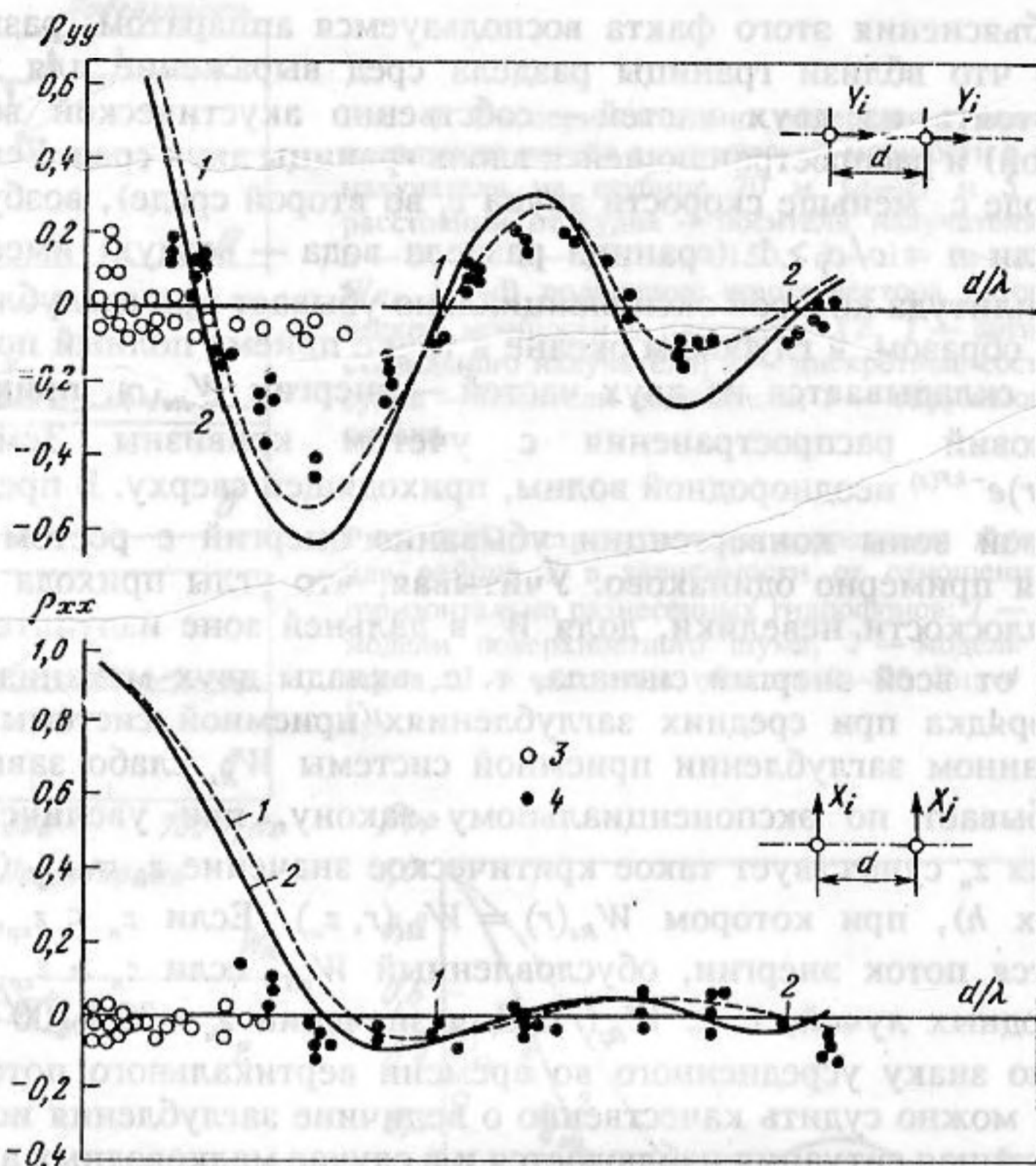


Рис. 8. Функция взаимной пространственной корреляции при  $\tau = 0$  для двух ВП разнесенных по горизонтали в пространстве в зависимости от отношения  $d/\lambda$ : 1 — расчет для модели поверхностного шума, 2 — расчет для модели объемного шума. Показана взаимная ориентация каналов ВП в горизонтальной плоскости

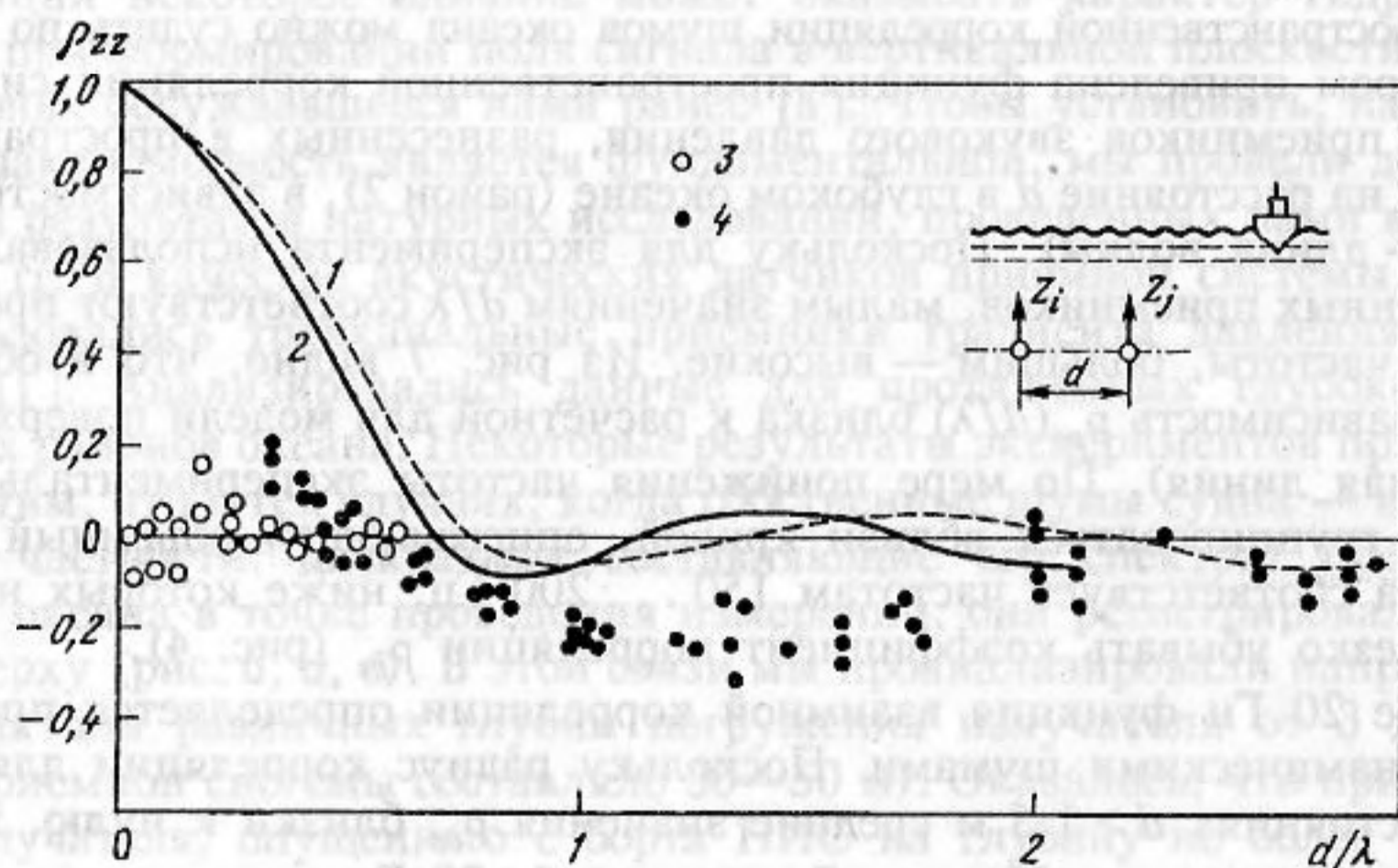


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, для вертикальной ориентации канала ВП

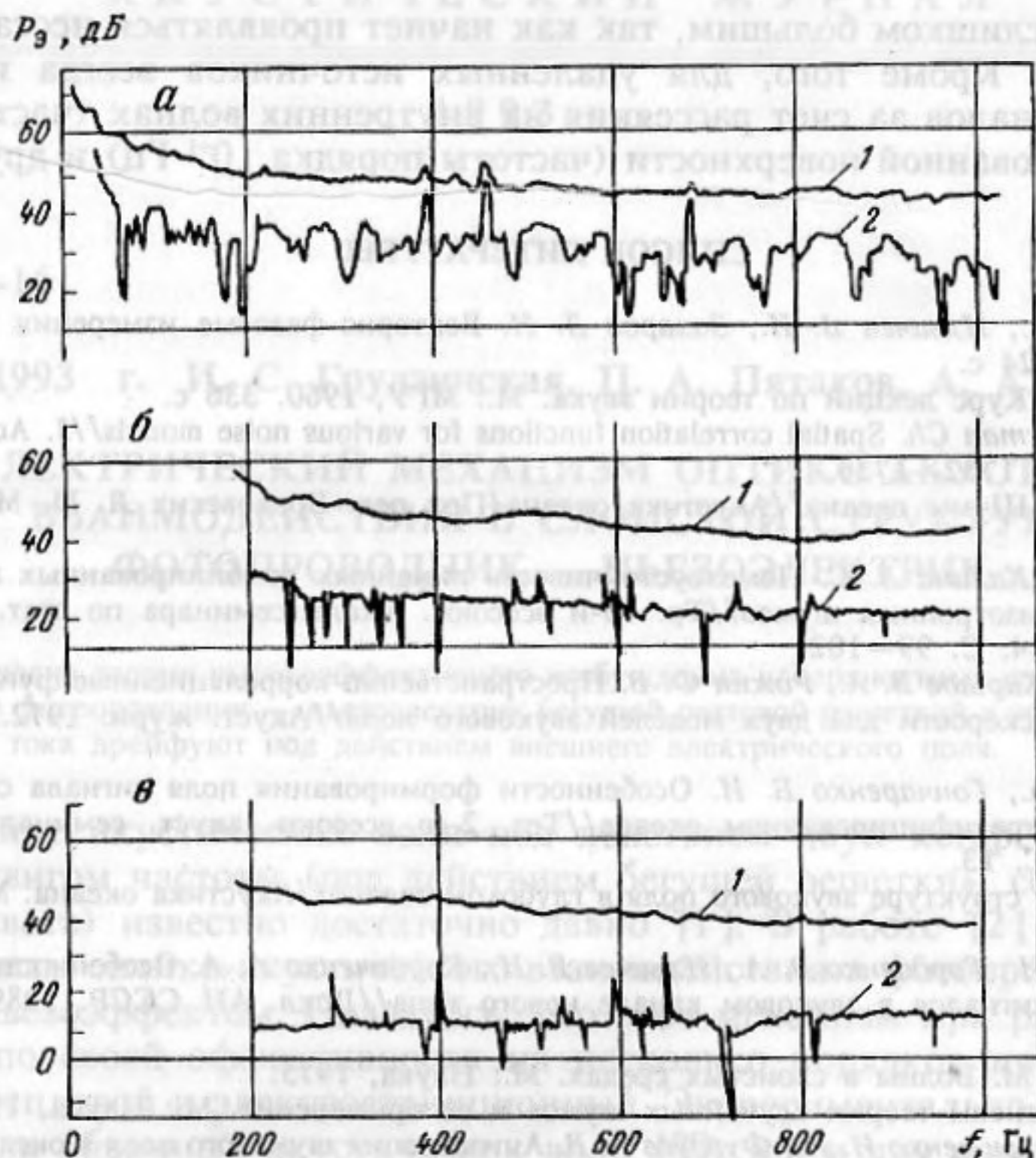


Рис. 10. Усредненные уровни звукового давления  $20 \lg \frac{P}{P_0}$  (1) и горизонтального потока акустической мощности  $10 \lg(W_{Rx}/P_0^2)$  (2), а — прибрежная акватория мелкого моря (рис. 4); б — район 1 на удалении 20...25 миль от трассы с интенсивным судоходством; в — район 2 вдали от судоходных трасс

как с шумами дальнего судоходства, так и с возрастанием роли гидродинамических полей, воздействию которых векторные приемники подвержены в большей степени, чем приемники давления.

Корреляционные соотношения между вертикальными каналами оказываются более чувствительными к характеру стратификации, наличию шумов дальнего судоходства (приходящих, как уже указывалось, преимущественно снизу) и пр., поэтому для зависимости  $\rho_{zz}(d/\lambda)$  отличия от модельных представлений без учета импеданского дна оказываются максимальными (рис. 9).

Очевидно, что в случае изотропного шума поток акустической мощности отсутствует. Что касается шумовых полей с аксиальной симметрией (например, поверхностные шумы), то здесь должен отсутствовать поток мощности в направлении перпендикулярном оси симметрии (условно ось  $Z$ ). Более того, для поверхностных шумов, особенно в случае мелких водоемов, достаточно выполнения условий симметрии в радиусе 5...10 глубин места или погружения приемной системы (при условии, что последняя находится не ниже слоя скачка). Таким образом, переходя на измерения потока акустической мощности, можно существенно уменьшить постоянную составляющую шумового поля (рис. 10). Фактически выходной сигнал приемной системы, регистрирующей горизонтальную составляющую потока акустической мощности, оказывается пропорциональным дисперсии величины  $W_{Rx}$ , которая убывает с увеличением времени усреднения как  $\sqrt{T}$ , так что при времени усреднения  $\sim 40$  с отношение величины этой дисперсии к среднему уровню  $P^2$  давления поля шумов составляет обычно не менее 11...15 дБ. Следует учесть, что в реальных условиях время усреднения

не может быть слишком большим, так как начнет проявляться нестационарность шумового поля. Кроме того, для удаленных источников всегда имеют место флуктуации сигналов за счет рассеяния на внутренних волнах (частоты порядка  $10^{-3}$  Гц), взволнованной поверхности (частоты порядка  $10^{-1}$  Гц) и других причин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В. А., Ильичев В. И., Захаров Л. Н. Векторно-фазовые измерения в акустике. М.: Наука, 1989. 224 с.
2. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: МГУ, 1960. 336 с.
3. Cron B. F., Sherman Ch. Spatial correlation functions for various noise models//J. Acoust. Soc. Amer. 1968. V. 34. P. 1732—1736.
4. Фурдуев А. В. Шумы океана//Акустика океана/Под ред. Бреховских Л. М. М.: Наука, 1974. Ч. 9.
5. Захаров Л. Н., Калина Л. С. Помехоустойчивость линейных комбинированных антенн в случае воздействия анизотропных шумов//Тр. 13-й всесоюз. школы-семинара по стат. гидроакустике. М.: АКИН, 1984. С. 99—102.
6. Захаров Л. Н., Киришов В. А., Рожин Ф. В. Пространственно-корреляционные функции компонент колебательной скорости для двух моделей звукового поля//Акуст. журн. 1972. Т. 18. Вып. 1. С. 49—52.
7. Гордиенко В. А., Гончаренко Б. И. Особенности формирования поля сигнала сосредоточенного источника в стратифицированном океане//Тез. 2-го всесоюз. акуст. семинара МАПР-2. М.: АКИН, 1988. С. 13.
8. Галкин О. П. О структуре звукового поля в глубоком океане//Акустика океана. М.: Наука, 1982. С. 92—106.
9. Гончаренко Б. И., Гордиенко В. А., Ильичев В. И., Коропченко А. А. Особенности формирования акустических сигналов в звуковом канале нового типа//Докл. АН СССР. 1989. Т. 309. № 5. С. 1211—1214.
10. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1975.
11. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применение. М.: Наука, 1965. 365 с.
12. Ардов А. А., Охрименко И. Н., Фурдуев А. В. Анизотропия шумового поля в океане (эксперимент и расчет)//Акуст. журн. 1988. Т. 34. Вып. 2. С. 215—221.

Московский государственный университет им.  
М. В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
21.05.92  
После исправления  
27.10.92

V. A. Gordienko, B. I. Goncharenko, Ya. A. Ilyushin

#### BASIC RULES OF VECTOR-PHASE STRUCTURE FORMATION OF OCEAN NOISE FIELD

Basic rules of vector-phase structure-formation of ocean noise fields are discussed. Amplitude-phase relationships of sound pressure and three components of particle sound velocity in an acoustic wave are considered within the framework of model concepts. Mathematical modelling results are compared to the results of research conducted in natural conditions of shallow sea and deep ocean regions with different patterns of ambient stratification. Experimentally measured values of cross-space correlation function for different couples of ocean acoustic field components are presented. Introduction of acoustic power flux registration is demonstrated to increase the signal-to-noise ratio by 10—15 dB in the coastal zone and up to 20—30 dB in deep ocean. In this case the sign of the vertical power flux from a concentrated radiator characterizes qualitatively its approximate depth.