

АКУСТИКА ОКЕАНА,
ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.322:534.8

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА СИГНАЛА
ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА БАЗЕ ПРИЕМНИКА
ПОТОКА АКУСТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

© 2007 г. В. А. Гордиенко, Н. В. Краснописцев*, А. В. Наседкин*, В. Н. Некрасов*

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

119992 ГСП-2, Москва, Ленинские горы

E-mail: vgord@list.ru

**ФГУП ВНИИ Физико-технических и радиотехнических измерений*

Пло Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл.

Поступила в редакцию 21.06.06 г.

Рассматриваются особенности формирования потока акустической мощности векторным приемником сигнала на фоне шума океана, обсуждаются информативные параметры зарегистрированных сигналов, которые определяют заданную статистически обеспеченную регистрацию слабых сигналов на фоне шумов океана. Используя уравнение гидролокации и установленные ранее фундаментальные связи между уровнями сигналов, регистрируемых приемником давления и векторным приемником для поля сигнала и поля шумов, обсуждаются полученные значения предельно возможных оценочных значений выигрыша в дальности обнаружения источника сигнала при регистрации потока акустической мощности в зависимости от величины анизотропии поля шумов в данном районе.

PACS: 43.30.Wi

Последние десятилетия характеризуются значительным интересом к исследованию статистических особенностей векторно-фазовой структуры акустических полей, как в общенаучном, так и в практическом плане. Это связано, прежде всего, с попытками обеспечить увеличение дальности действия малогабаритных гидроакустических систем при приеме слабых сигналов [1]. В данном контексте – слабый сигнал, это, как правило, сигнал, уровень которого по звуковому давлению сравним или ниже уровня фоновых шумов акватории.

Сегодня приемные системы, часто называемые комбинированными приемными системами (КПС), которые измеряют в некоторых заданных точках среды одновременно скалярную характеристику акустического поля (акустическое давление) и векторную (обычно проекции градиента звукового давления или колебательной скорости на два или три взаимно ортогональных направления в пространстве), используются как в нашей стране [2, 3], так и за рубежом [4].

Вариант КПС для измерения перечисленных параметров в области пространства, малой по сравнению с длиной волны (практически в точке), обычно называют комбинированным приемником (КП) или комбинированным приемным модулем (КПМ).

Хорошо известно [5], что дальность действия гидроакустических систем зависит как от их кон-

структивных особенностей и используемых алгоритмов обработки акустической информации, так в значительной степени от гидрофизических условий океана и характера помехи. Однако гидрофизические и, соответственно, акустические условия океана имеют большую пространственную и временную изменчивость, что делает эффективность гидроакустических систем и дальность их действия неустойчивыми. Поэтому оценке реальных возможностей приемных систем обычно предшествует экспериментальное изучение условий распространения сигналов на акватории предполагаемого использования той или иной гидроакустической приемной системы, выявления всевозможных аномалий распространения, влияния рельефа дна и т.п., часто называемое калибровкой района.

При использовании КПМ для выделения сигнала от цели на фоне сигнала от относительно стационарного локализованного источника (в частности, судна-постановщика приемной системы) обычно хорошо работают аддитивные алгоритмы. Например, за счет формирования кардиоды в диаграмме направленности путем взвешенного суммирования сигналов, снимаемых с выходов скалярного и векторных каналов КПМ, с минимумом, направленным на источник помехи, удается ослабить влияние локализованного источника на 20...30 дБ [6]. В остальных случаях основной выигрыш наблюдается, как правило, при

прямом измерении потока акустической энергии (мощности) $W_{Rr} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P(t) V_r(t) dt$ в направлении \mathbf{r} на источник сигнала цели, что позволяет ослабить в определенных пределах влияние фоновых шумов акватории [1, 6]. Однако вопрос о факторах, определяющих численное значение этих пределов, и в конечном итоге – дальность обнаружения такими приемными системами, пока остается открытым.

При оценке дальности обнаружения источника сигнала гидроакустической системой обычно исходят из уже ставших классическими уравнений гидролокации, учитывающих вклады основных механизмов, которые могут каким-либо образом повлиять на уровни регистрируемого сигнала и в конечном итоге на соотношение сигнал/помеха на выходе приемной системы.

Очевидно, что для выполнения задачи обнаружения необходимо знать величину отношения сигнал/помеха, зависящую от вида решаемой задачи и заданных вероятностей обнаружения цели и ложных тревог. Если предположить, что сигнал медленно увеличивается при неизменной помехе, то решение задачи, поставленной перед приемной системой, окажется возможным практически с того момента, когда уровень сигнала превысит некоторый порог обнаружения (ПО) по отношению к уровню маскирующей его помехи. Для этого обычно устанавливается связь между вероятностью правильного обнаружения, вероятностью ложной тревоги, статистической обеспеченностью и отношением сигнал/помеха на выходе приемной системы. Примеры таких параметрических зависимостей для пассивной системы, приведены в работе Ю.М. Сухаревского [5].

В этой же работе [5] предпринята одна из серьезных попыток подставить в уравнения гидролокации технические параметры гидроакустической системы на базе приемников звукового давления. Основная цель анализа решения таких уравнений состоит в выявлении параметров, которые оптимальным образом позволяют уменьшить чувствительность гидроакустической системы к мешающему фону, или, другими словами, увеличить вероятность правильного обнаружения.

В данной работе мы остановимся на рассмотрении проблемы дальности обнаружения комбинированным приемным модулем, регистрирующим проекции вектора потока акустической мощности на два (плоский случай) или три взаимно ортогональных направления в пространстве.

Под приемником потока акустической мощности в дальнейшем будем понимать акустическую приемную систему, включающую комбинированный приемный модуль малых волновых размеров, состоящий из приемника акустического давления (ПД) и трех- или двухкомпонентного век-

торного приемника (ВП), и систему обработки данных, позволяющую на выходе приемной системы определять проекции потока акустической мощности (ПАМ) на заданные, обычно взаимно ортогональные направления в пространстве.

В основе обсуждаемых подходов лежат особенности формирования потока акустической мощности сигнала на фоне шумов океана, отличающие такую приемную систему от стандартной на базе ненаправленных гидрофонов, и определяющие заданную статистически обеспеченную дальность регистрации слабых сигналов на фоне шумов океана по потоку акустической мощности, что можно считать дальнейшим развитием работ [5, 7].

Основываясь на развитых в работе [5] представлениях, уравнение дальности для пассивной локации можно записать следующим образом:

$$10 \lg(P_{0s}^2 f^{m_s}) + 10 \lg r^q + [A_r - 10 \lg(P_{0p}^2 f^{m_p})] - (1) \\ - r \beta_0 f^n \times 10^{-3} + 10 \lg k_0 + 10 \lg (10^3 \tau \Delta f)^{1/2} + \Delta = Q$$

Здесь P_{0s}^2 – квадрат спектральной плотности шумового сигнала цели; r – расстояние (дальность) до цели в м; $[A_r (\text{дБ}) - 10 \lg P_{0p}^2 f^{m_p}]$ – отношение в дБ аномалии распространения A на расстоянии r к уровню помехи на частоте f ; P_{0p}^2 – квадрат звукового давления помехи на частоте 1 кГц; β_0 – коэффициент, а n – показатель при частоте для закона километрического затухания в дБ/км; k_0 – коэффициент помехоустойчивости (или коэффициент концентрации) приемной системы; $10 \lg (10^3 \tau \Delta f)^{1/2}$ – эффект интегрирования; Δf – относительная полоса частот; τ – время интегрирования; $\Delta = \Delta_a + \Delta_L + \Delta_I$ – суммарная поправка, учитывающая эквивалентное изменение отношения сигнал/помеха за счет эффекта адаптации системы (Δ_a), трассового (многоциклового) накопления (Δ_L), информации о наличии сигнала и неконтролируемых потерь (Δ_I) в дБ; Q – требуемая величина отношения сигнал/помеха на выходе для реализации заданных характеристик обнаружения сигнала – вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги в дБ; f – частота в кГц.

Легко показать, что это уравнение может быть применено и к приемной системе, регистрирующей поток акустической мощности. Действительно, ранее нами как теоретически, так и экспериментально [1, 3, 6] уже было установлено наличие фундаментальных связей (т.е. практически не зависящих от гидрофизических параметров среды) между уровнями сигналов, регистрируемых приемником давления и векторным приемником для удаленного локализованного источника. В частности, если горизонтальная ось канала ВП (условно X) совпадает с направлением прихо-

да сигнала, то с точностью не хуже 0.5 дБ, независимо от характера стратификации среды и наличия импедансного дна, в дальнем поле источника

должны выполняться условия: $V_x^2(f, r) = \frac{P^2(f, r)}{(\rho c)^2}$

и $W_{Rx} = \frac{P^2}{\rho c}$.

При произвольной ориентации в горизонтальной плоскости осей X и Y ВП

$$V_x^2(f, r) = \frac{P^2(f, r)}{(\rho c)^2} \cos^2 \varphi;$$

$$V_y^2(f, r) = \frac{P^2(f, r)}{(\rho c)^2} \sin^2 \varphi.$$

Исключение, возможно, составляет пока единственный известный нам случай трассы с двумерной стратификацией в Тихом океане [8], для которой при отклонении направления распространения сигнала от оси ВП более чем на 60° , эти соотношения могут нарушаться. Здесь, как обычно, $P(f, r)$ – звуковое давление. Что касается компоненты V_z , то аналогичная связь чаще всего не выполняется. Однако для систем дальнего обнаружения, использующих преимущественно информацию с горизонтальных каналов векторного приемника, это не является принципиальным.

Таким образом, уровни выходных сигналов с любого горизонтального канала КПМ для поля сигнала локализованного источника могут быть приведены к уровням эквивалентного звукового давления в плоской звуковой волне путем домножения их на соответствующий множитель (волновое сопротивление среды) так, что для любого удаленного источника, переобозначив $W_R \rightarrow \rho c W_R$, $V_i \rightarrow \rho c V_i$, можно будет записать для численных значений соответствующих характеристик поля в направлении на локализованный источник сигнала:

$$W_{Rx} = V_x^2 = P^2. \quad (2)$$

Это, в свою очередь означает, что в уравнении (1) все основные параметры, характеризующие квадрат спектральной плотности шумового сигнала цели, аномалии распространения, закон километрического затухания и эффекты интегрирования, записанные для поля давления сигнала, будут такими же и для горизонтальной проекции потока акустической мощности в направлении на источник сигнала.

Для поля шумов акватории соотношения (2) выполняться не будут. Как правило (за исключением, быть может, работы в поле гидродинамических помех или ближнем поле излучателя), $V_x^2 < P^2$, $W_{Rx} \ll P^2$. Следовательно, уже в переходе на изме-

рение векторных характеристик поля заложена определенная помехоустойчивость по отношению к одиночному гидрофону. Эти особенности работы приемника, регистрирующего ПАМ, могут быть учтены как в коэффициенте помехоустойчивости приемной системы k_0 , так и в поправке Δ , например, путем введения дополнительного слагаемого, учитывающего специфику алгоритма обработки сигнала (использование единичного канала приемника ПАМ, использование алгоритмов пространственной фильтрации сигналов и т.д.).

По аналогии с антеннами на базе гидрофонов, наиболее простым кажется подход, основанный на расчете коэффициента помехоустойчивости для приемника потока акустической мощности и введении его значения в уравнение (1). В литературе неоднократно предпринимались попытки оценить помехоустойчивость таких приемных систем (см., например, работы [9–13]). Однако эти подходы пока, к сожалению, дают различающиеся значения помехоустойчивости для близких сигнально-помеховых ситуаций, часто не совпадающие с их экспериментальными значениями, и, как правило, не учитывают возможности использования упоминавшихся выше алгоритмов пространственной фильтрации сигналов за счет совместной обработки информации, снимаемой с ортогональных каналов ВП. Таким образом, пока нельзя считать задачу теоретической оценки помехоустойчивости приемника ПАМ решенной. Основная проблема в том, что приемник ПАМ регистрирует отличную от поля давления и поля колебательных скоростей вполне реальную физическую характеристику поля – значение проекции вектора, характеризующего перенос акустической энергии в пространстве. Поэтому, хотя выражение (1) содержит интегрирование по времени и произведение двух центрированных величин, и формально подходит под определение мультипликативной антенны [14], – оно, несмотря на кажущееся внешнее сходство, не может быть сведено только к корреляционной, или только к мультипликативной обработке информации.

Возможно, было бы более надежно при нелинейной обработке, какой собственно и является расчет проекций вектора потока акустической мощности, сравнивать входные отношения, обеспечивающие на выходах одинаковое качество обнаружения (например, одинаковую вероятность правильного обнаружения при одинаковой вероятности ложных тревог – критерий Неймана-Пирсона). Это позволило бы избежать ошибок, обусловленных различным распределением вероятностей выходных процессов: не всегда одинаковое отношение сигнал/помеха обозначает и одинаковое качество обнаружения [13].

Основываясь на статистике результатов натурных экспериментов 1985–2004 гг. по выделению на фоне окружающих шумов сигналов локализованных источников различного уровня на протяженных трассах различных акваторий мирового океана и его прибрежных зон с существенно различным характером гидрологии, мы считаем, что для целей практической оценки влияния уровня помехи на характеристики обнаружения канала потока акустической мощности, наиболее удобным является разделение фоновой составляющей сигнала на две.

Ранее [2, 15, 16] мы уже показали, что для приемника ПАМ необходимо различать два понятия – шум $W_{\tau p}$, представляющий анизотропную, не компенсируемую усреднением по времени составляющую потока, и помеху $S_{\tau w}$, определяемую величиной флуктуаций потока акустической мощности от его среднего значения.

Флуктуационную составляющую $S_{\tau w}$ можно учесть непосредственно в коэффициенте k_0 уравнения (1). Поскольку отдельный канал ВП имеет косинусную характеристику направленности, то для изотропных в горизонтальной плоскости шумов (в частности, динамических шумов, генерируемых взволнованной поверхностью), уменьшение уровня шумов по отношению к регистрируемым ненаправленным гидрофоном (как впрочем, и уровня флуктуаций при фиксированном времени усреднения сигнала), в силу наличия связей $V^2(\varphi) = V_0^2 \cos^2 \varphi$ и $W_R(\varphi) = PV_0 \cos \varphi$ (φ – угол между направлением на источник сигнала и осью соответствующего канала ВП), для горизонтального канала ВП составляет величину, примерно равную значению $K_V \approx 1/\left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi\right) = 2$, т.е. 6 дБ, а для горизонтального канала приемника ПАМ – $K_W \approx 1/\left(\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \varphi d\varphi}\right) = \sqrt{2}$, или примерно 3...4 дБ (более подробно см. [6, 9]).

Анизотропию шума в полосе частот Δf в некотором горизонтальном направлении, характеризуемом азимутальным углом φ , применительно к приемнику ПАМ удобно характеризовать коэффициентом $\gamma_w(\varphi) = W_a(\varphi)/P_N^2$, где $W_a(\varphi) = \overline{P(t)V(t, \varphi)}_{\tau \rightarrow \infty}$, τ – время усреднения, P_N^2 – уровень шума на выходе ПД. Таким образом, под величиной анизотропной составляющей потока W_a мы понимаем усредненное за достаточно большой промежуток времени значение проекции потока акустической мощности собственных шумов акватории в направлении на источник при отсутствии последнего. Если анизотропия велика ($\gamma_w > -10$ дБ), значение K_w может колебаться

в определенных пределах и для наиболее характерных ситуаций поверхностного шума составлять 2...6 дБ [9, 10]. Воспользовавшись модельными представлениями, развитыми в [1, 6], можно рассчитать соответствующие значения K_w и для других моделей шумового поля – объемного шума, шума берегового прибое и т.п.

Выигрыш в помехоустойчивости, обусловленный отличием характеристики направленности отдельного канала приемника ПАМ от круговой, мы называем “классическим”. В основной массе работ, в которых предпринимаются попытки оценить помехоустойчивость приемника ПАМ (в частности, в цитированных выше [7, 9, 10]), обычно приводятся именно эти цифры. Этот выигрыш можно учесть с помощью коэффициента концентрации k_0 в формуле (1), рассчитав (или определив экспериментально в отсутствие полезного сигнала) K_w для канала ВП, ориентированного в направлении на источник регистрируемого сигнала и полагая в (1) $k_0 = K_w$.

Однако на самом деле, это только часть выигрыша, который обеспечивает приемник ПАМ при регистрации сигнала локализованного источника на фоне шумов акватории. Анизотропная, не компенсируемая усреднением по времени составляющая потока, обозначенная выше $W_{\tau p}$, вносит свою составляющую в помехоустойчивость, которая в общем случае не является аддитивной по отношению к K_w . Для стационарных во времени условий, как ранее уже показывалось [2, 12], фактически определяющим информативным параметром при “абсолютном” выделении сигнала на фоне помех являются соотношения между разностью уровней сигнала P_s и шумов P_N и флуктуаций поля шумов по звуковому давлению – $S_{\tau p}$, и аналогичными значениями величин $|W_s| - |W_{\tau p}|$ и $S_{\tau w}$. Отношение этих величин и будет определять в конечном итоге величину превышения сигнала над фоновой помехой на выходе приемника ПАМ к аналогичному превышению на выходе ПД, которую, с учетом (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \Delta_w &= \left(\frac{W_s + W_a}{W_a + \sigma_{WN}^2} \right) \left(\frac{P_s^2 + P_N^2}{P_N^2 + \sigma_{pN}^2} \right) = \\ &= \frac{(P_s^2 + W_a)(P_N^2 + \sigma_{pN}^2)}{(P_s^2 + P_N^2)(W_a + \sigma_{WN}^2)} = \\ &= \left(\frac{C_{\Pi}^2 + \gamma_w}{C_{\Pi}^2 + 1} \right) \left(\frac{1 + s_N^2}{\gamma_w + s_w^2} \right) = \frac{C_{\Pi}^2 + \gamma_w}{C_{\Pi}^2 + 1} \Delta_{WP}, \end{aligned}$$

или

$$\Delta_w = \frac{C_{\Pi}^2 + \gamma_w}{C_{\Pi}^2 + 1} \Delta_{WP}. \quad (3)$$

Здесь $C_{\Pi}^2 = \frac{P_s^2}{P_N^2}$; $s_N^2 = \frac{\sigma_{pN}^2}{P_N^2}$; $s_W^2 = \frac{\sigma_W^2}{P_N^2}$; $\gamma_W = \frac{W_a}{P_N^2}$ – параметр, характеризующий анизотропию поля шумов в точке проведения измерений; $\tau\sigma_{pN}^2$, $\tau\sigma_W^2$ – величина дисперсий поля давления и поля вектора ПАМ, определяющих уровень флуктуаций на выходе системы обработки в заданной полосе частот при заданном времени усреднения τ (в принципе для некоррелированных источников шума должно выполняться условие $\sigma_W^2 = K_W\sigma_{pN}^2$). Относительный уровень флуктуаций можно определить, например, набирая статистику флуктуаций для интересующих районов.

Второй сомножитель Δ_{WP} в выражении (3) как раз и определяет помехоустойчивость уединенного канала приемника ПАМ, ориентированного максимумом характеристики направленности на источник. Для большинства практических случаев $s_N^2 \ll 1$, поэтому без особого ущерба можно полагать $\Delta_{WP} \approx 1/(\gamma_W + s_W^2)$. Для стационарного сигнала, когда время усреднения τ может быть достаточно велико, можно ориентироваться на помехоустойчивость, определяемую предельным значением Δ_{WP} , равным $\Delta_{W0} = 1/\gamma_W$. В реальных условиях, особенно отличающихся от стационарных, как правило, приходится учитывать и флуктуационную составляющую, так что все-таки правильнее говорить о значении $\Delta_{WP} \approx 1/(\gamma_W + s_W^2)$. Определение численного значения γ_W (в отличие от s_W^2) не представляет особых проблем. Поэтому, учитывая, что уравнение (1) в достаточной мере полуэмпирическое и оценочное, для приемника ПАМ можно ограничиться введением в это уравнение дополнительного слагаемого Δ_{W0} , учитывающего анизотропию района измерений по потоку акустической мощности, полагая, что соотношение между s_W^2 и s_N^2 уже учтено в коэффициенте k_0 , а уменьшение флуктуационной составляющей за счет увеличения времени усреднения или расширения частотного диапазона анализа определяется предпоследним слагаемым в (1).

Можно подойти к решению задачи и несколько иначе. Если решена задача определения дальности обнаружения некоторого источника в заданной акватории для приемной системы на базе одиночного гидрофона, то, используя приведенные выше соотношения, можно оценить дополнительный выигрыш Δ_W , который дает приемник потока акустической мощности, а затем еще раз пересчитать дальность в предположении, что квадрат спектральной плотности шумового сигнала цели P_{0s}^2 увеличился на величину Δ_W дБ.

Следует заметить, что значение величины γ_W подвержено влиянию большого числа факторов, включая характер анизотропии поверхностного волнения, балльность моря, интенсивность дальнего судоходства и т.п. Методов теоретической оценки этого параметра и, тем более, частотной зависимости для различных погодных условий пока не существует. Поэтому единственным способом введения значения γ_W в уравнения (1) и (3) является экспериментальное его определение в заданной полосе частот непосредственно перед проведением измерений. Для некоторых акваторий, удаленных от судоходных трасс и береговой зоны с промышленными предприятиями на берегу, в принципе, возможно составление таблиц прогноза по результатам статистической обработки уровней шумов для различных погодных и сезонных условий, времени суток, интенсивности дальнего судоходства и т.п., как ранее это было сделано для уровней шума поля давления (см. [6], с. 150–153).

Что касается преимуществ приемника ПАМ по отношению к отдельному гидрофону, то при достаточно большом времени усреднения, когда $s_N^2 \ll 1$; $s_W^2 \ll 1$, для сигналов малых уровней ($C_{\Pi}^2 \ll 1$) можно записать:

$$\Delta_W = \left(1 + \frac{\gamma_W}{C_{\Pi}^2}\right) / \left(\frac{\gamma_W}{C_{\Pi}^2} + \frac{s_W^2}{C_{\Pi}^2}\right). \quad (4)$$

Если анизотропия велика, для предельных оценок (т.е. если имеется возможность усреднять результаты измерений за достаточно большой промежуток времени – формально при времени усреднения $\tau \rightarrow \infty$) второе слагаемое в знаменателе (4) может быть опущено. В результате получаем предельно возможное значение выигрыша для приемника потока акустической мощности при величине анизотропии в данном районе γ_W , т.е.

$$\Delta_{W\text{пред}} \approx \left(\frac{C_{\Pi}^2}{\gamma_W} + 1\right).$$

Отметим также, что в качестве P_s^2 необходимо подставлять значение мощности источника в точке постановки приемной системы, т.е. с учетом километрического затухания и аномалий распространения звука, а в качестве C_{Π}^2 – значение сигнал/помеха на выходе гидрофона, обеспечивающее заданную вероятность правильного обнаружения $w_{\text{по}}$ для пассивной системы в зависимости от величины отношения сигнал/помеха на выходе системы при заданной вероятности ложной тревоги, например, в соответствии с данными работы [5].

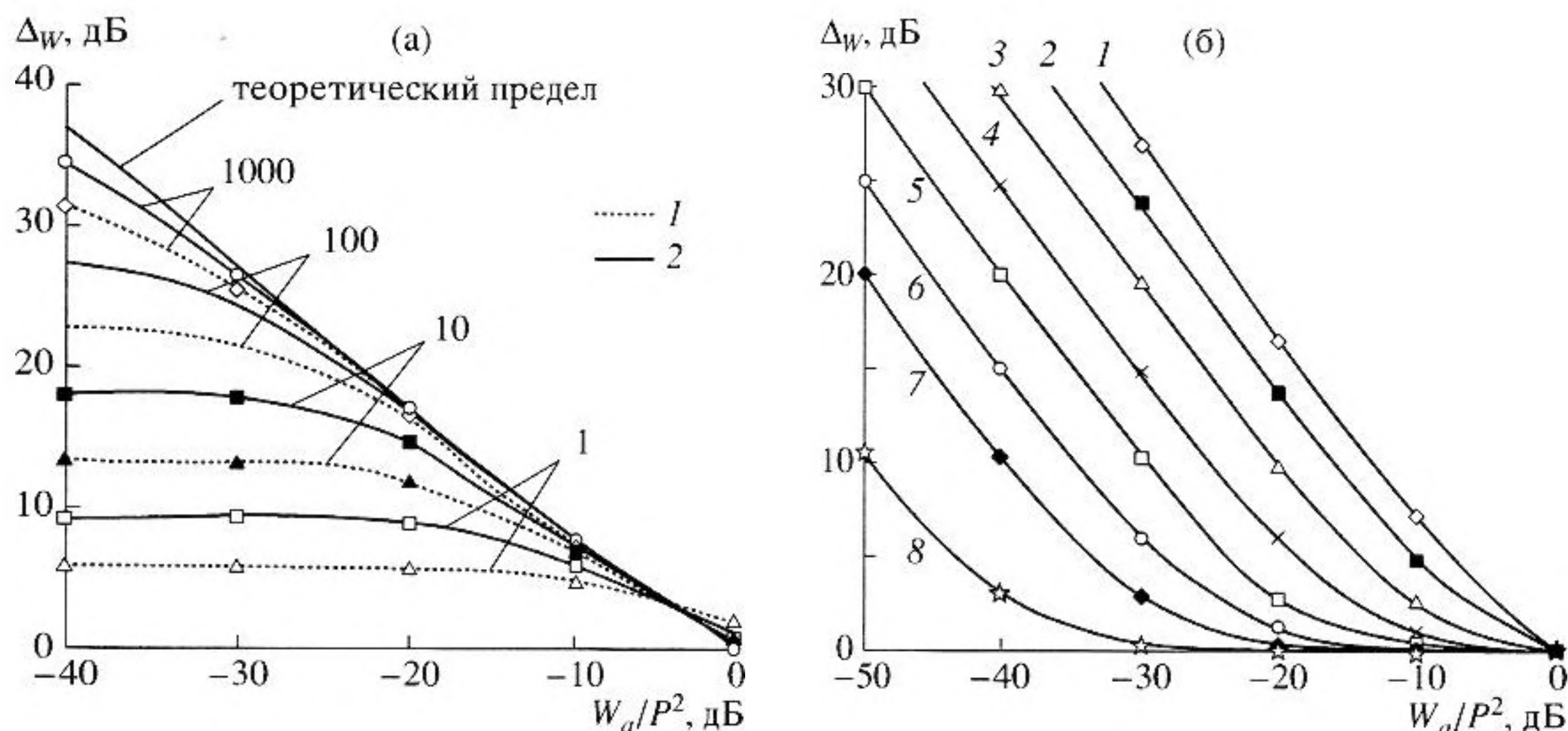


Рис. 1. Предельные значения дополнительного выигрыша в помехоустойчивости приемника, регистрирующего поток акустической мощности по отношению к ПД: а – соотношение сигнал/помеха на входе канала звукового давления равно 1 при времени усреднения – 1, 10, 100, 1000 отн. единиц и двух значениях относительной величины дисперсии s_N^2 : 1 – 0.3; 2 – 1; 3 – теоретический предел; б – зависимость Δ_w от величины анизотропии при различных соотношениях сигнал/помеха, дБ: 1 – 0; 2 – -5; 3 – -10; 4 – -15; 5 – -20; 6 – -25; 7 – -30; 8 – -40.

Таким образом, при умеренной анизотропии шумов акватории потенциальная дальность приемной системы, использующей КПМ должна отличаться от аналогичной системы на базе приемника давления на величину, примерно определяемую значением $\Delta = [3 + 10 \lg(\Delta_w)]$ дБ.

Это, например, означает, что для значения $C_{\Pi} = 2$ (т.е. 6 дБ) и величины анизотропии по потоку акустической мощности $\gamma_w = -20$ дБ, соответствующий предельный выигрыш должен составить около 15...18 дБ при вероятности правильного

обнаружения $w_{\text{по}} \approx 75\%$ с вероятностью ложной тревоги 10%. Оценочные значения предельных значений величины $10 \lg(\Delta_w)$ в зависимости от параметра анизотропии акватории γ_w для соотношения сигнал/помеха, равного 1, значений $s_N^2 = 1$ и $s_N^2 = 0.3$ при наличии классической связи между величинами дисперсий $s_N^2/s_w^2 = 3$ дБ представлены на рис. 1.

В качестве иллюстрации сказанного на рис. 2 приведены зависимости от горизонтального расстояния между приемной системой и исследуемым объектом, удаляющимся с постоянной скоростью от приемной системы, уровней, зарегистрированных приемником звукового давления и величиной проекции потока акустической мощности в направлении примерно на объект, для акватории Финского залива Балтийского моря. Среднее, экспериментально измеренное значение анизотропии в месте проведения измерений $\gamma_w = -12...-15$ дБ, т.е значение Δ составляет примерно 15...18 дБ. Это в свою очередь, означает, что при $C_{\Pi} = 2$ и сферическом законе убывания сигнала, дальность обнаружения должна увеличиться в 8...10 раз, а при цилиндрическом – не менее чем в 70 раз.

Для исследуемого объекта уровни излучения, по крайней мере, на расстояниях более 250 м лежали заведомо ниже собственных шумов акватории, измеренных приемником давления в приводимом частотном диапазоне. Поэтому по зависи-

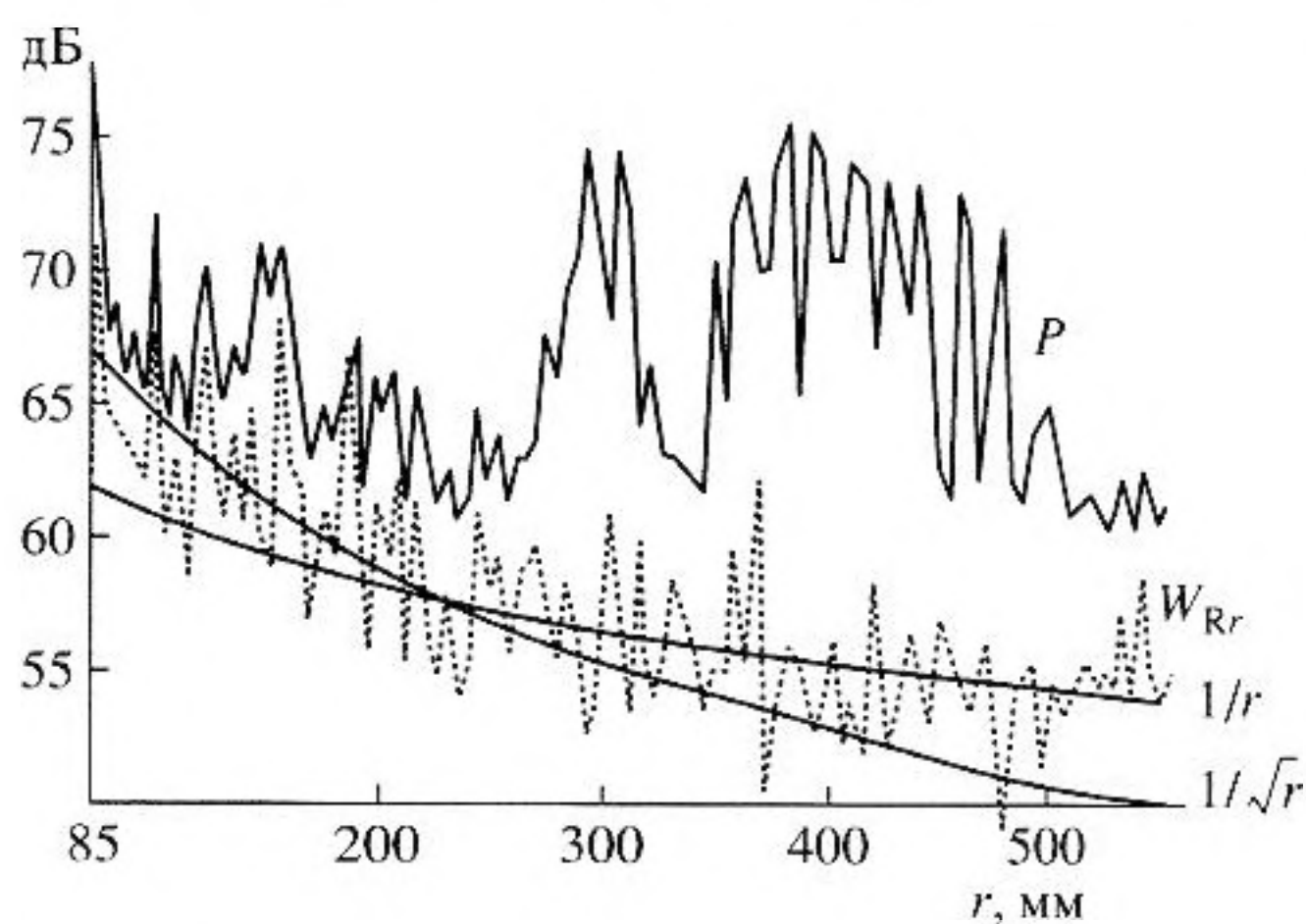


Рис. 2. Примеры зависимости от расстояния r до морского объекта уровней сигнала, зарегистрированных приемником давления P и горизонтальным каналом приемника потока акустической мощности W_{Rr} в направлении на объект в 1/3-октавной полосе 250 Гц (а) и 400 Гц (б) при времени усреднения 2 с.

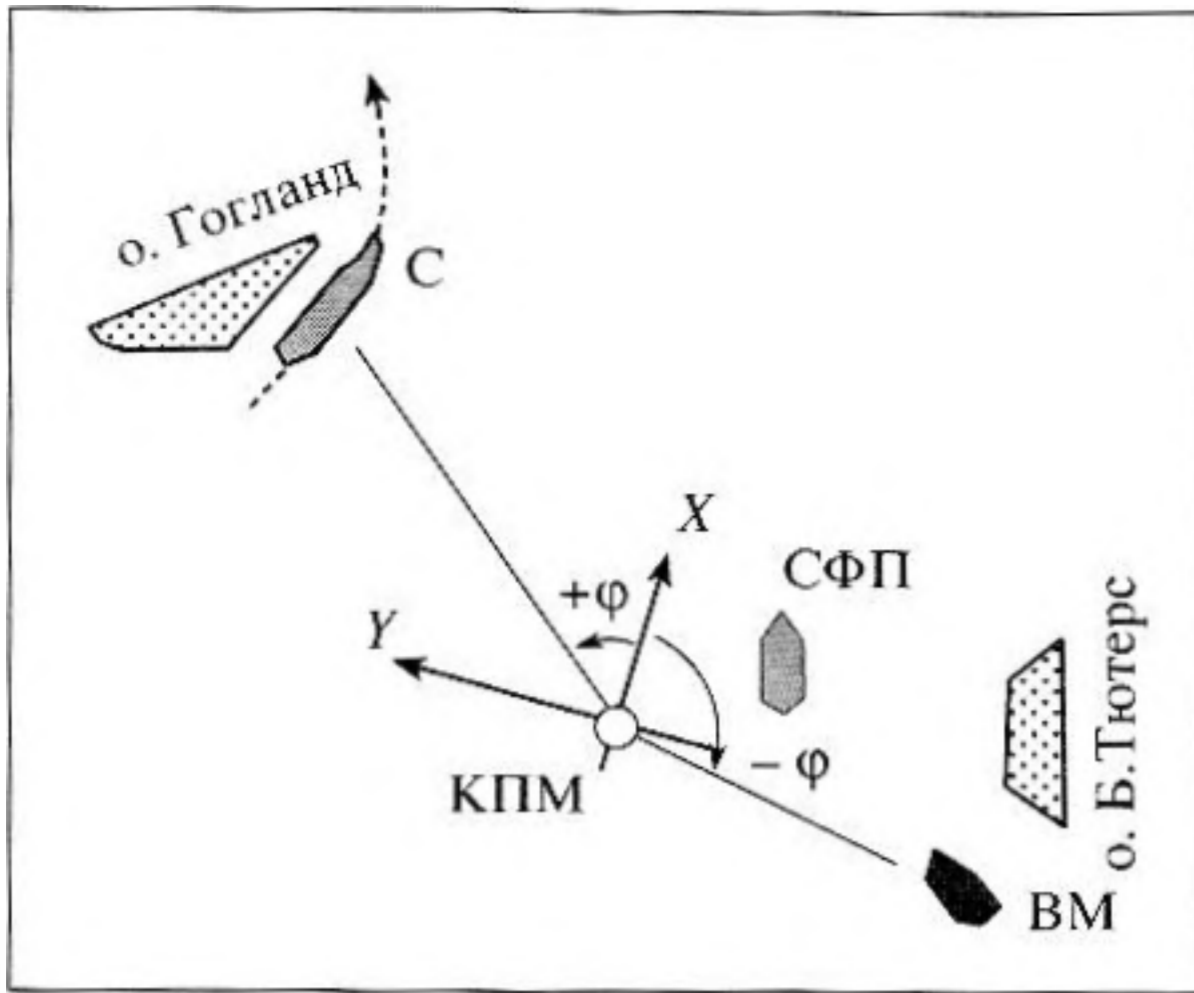


Рис. 3. Геометрия одного из экспериментов в Финском заливе Балтийского моря: С – сухогруз; ВМ – малое морское судно, СФП – судно-постановщик приемной системы, находящееся в режиме тишины.

нием до объекта. Что касается потока акустической мощности, несмотря на значительные флуктуации (связанные, как с малым временем усреднения, так и наличием интерференции за счет многолучевости распространения сигнала в условиях мелкого моря), наблюдается достаточно хорошо заметная тенденция к убыванию.

Отметим, что в рассматриваемом случае мы не обсуждали эффекты, связанные с алгоритмами пространственной фильтрации вектора ПАМ. Этот алгоритм в теоретическом аспекте был нами рассмотрен ранее в работе [15]. В частности было показано, что из-за неортогональности базиса разложения векторов потока акустической мощности, дополнительный выигрыш за счет пространственной фильтрации Δ_S зависит от соотношения сигнал/помеха на входе и ограничен значением $\Delta_S \approx 25$ дБ. Эту возможность выделения слабого сигнала на фоне шумов акватории иллюстрируют данные эксперимента по измерению фоновых шумов вблизи острова Б. Тютерс в Финском заливе Балтийского моря. Геометрия эксперимента приведена на рис. 3.

мости звукового давления от расстояния нельзя сделать какие-либо разумные выводы об убывании регистрируемых уровней давления с расстоя-

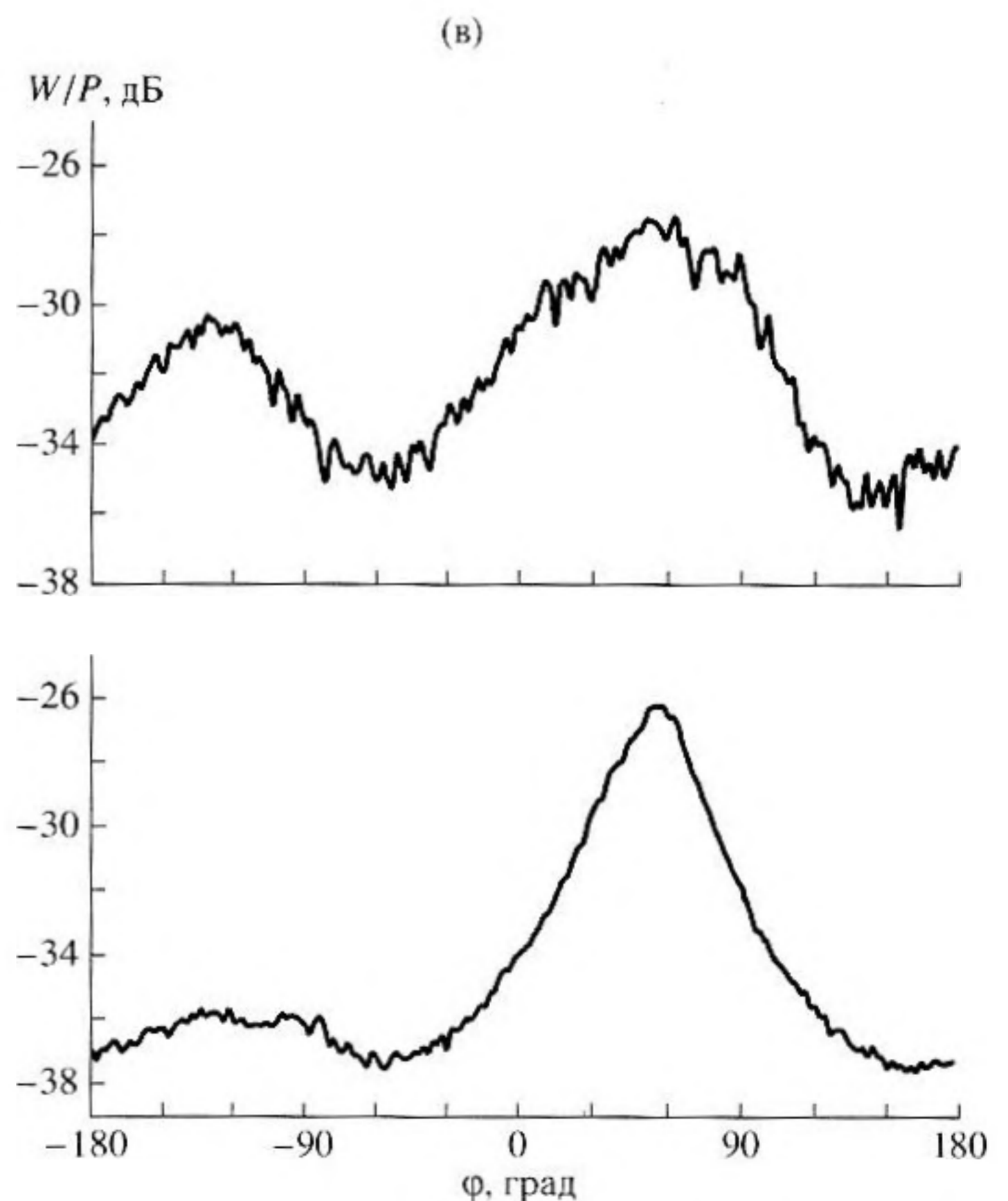
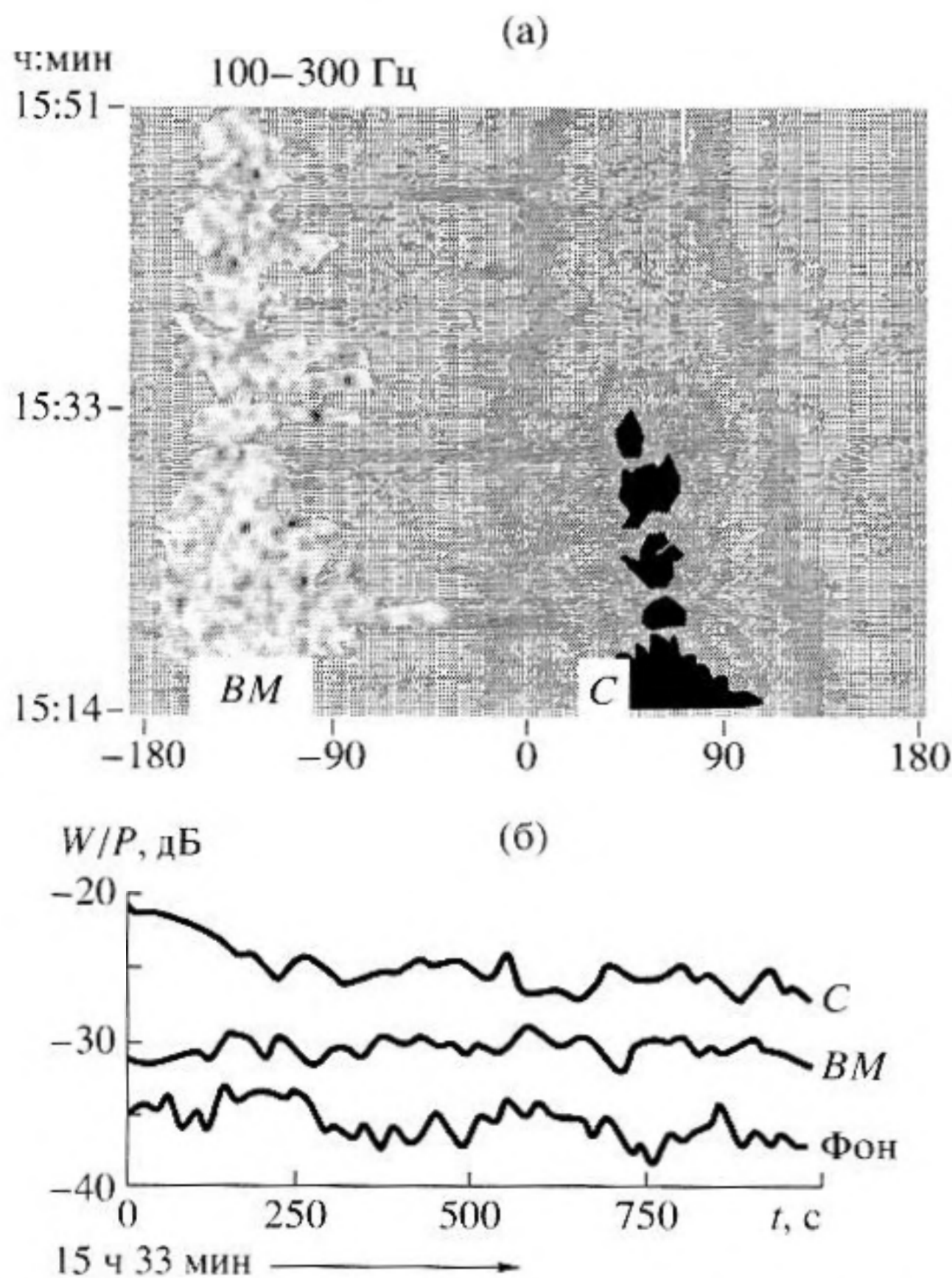


Рис. 4. Пространственный спектр вектора потока акустической мощности для геометрии рис. 3 (глубина акватории около 28 м): а – сонограмма в координатах время – азимутальный угол ϕ – интенсивность; б – проходные характеристики объектов; в, г – сечение пространственного спектра, соответствующее времени 15 часов 20 минут (расстояние до сухогруза 8 миль, до ВМ – 4 мили) для частотных диапазонов анализа 60–100 Гц (в) и 100–300 Гц (г).

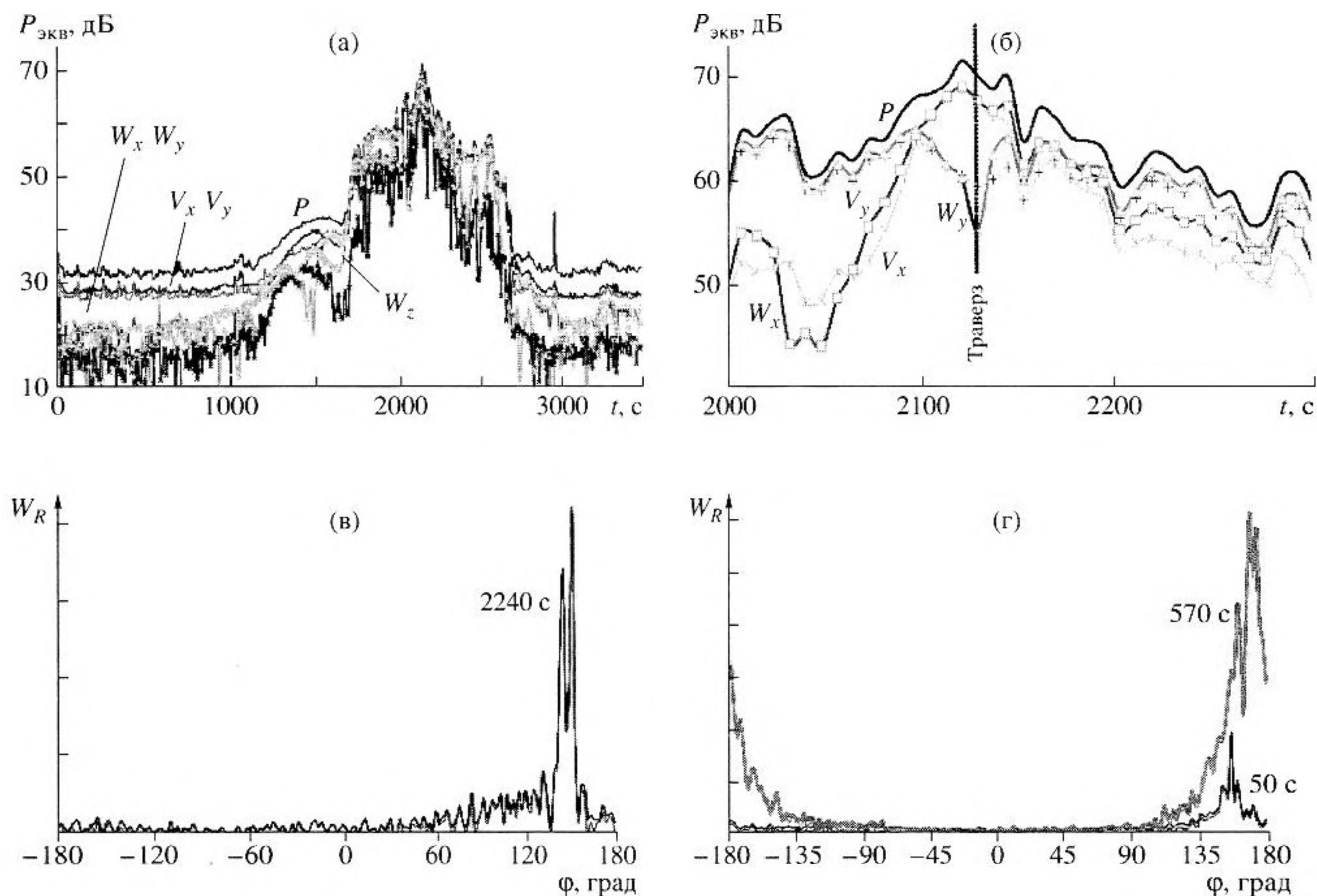


Рис. 5. Типичная проходная характеристика, записанная различными каналами КПМ (а), ее фрагмент вблизи траверза (б) и характерные угловые спектры потока акустической мощности, соответствующие областям вблизи траверза (в), и на удалении от него (г).

Малое морское судно ВМ водоизмещением около 300 т стояло на якорю приблизительно на удалении 4 мили от установленного вблизи дна на глубине около 28 м КПМ. На расстоянии около 8 миль со скоростью примерно 10 узлов удалялся сухогруз. По каналу давления проходные характеристики не регистрировались. Тем не менее, на построенном "псевдопространственном" спектре потока акустической мощности в горизонтальной плоскости (рис. 4) отчетливо проявились оба объекта. При угловом разрешении 1° фоновые уровни помех оказались ослабленными по потоку акустической мощности на 35...40 дБ.

Такие значения довольно легко объяснимы. Действительно, при "угловом разрешении" $\Delta\phi = 1^\circ$ изотропная составляющая в каждом угловом секторе ослабляется примерно в 360 раз, т.е. приблизительно на 25 дБ. При анизотропии (-10...-13) дБ общее ослабление уровня шумов по потоку акустической мощности должно составить 35...38 дБ. Как раз этому значению и соответствует уровень фона, приведенный на рис. 4. На этом фоне хорошо прослеживаются проходные характеристики объектов наблюдения. Их угловые спектры ин-

тенсивности в силу малости соотношения сигнал/помеха по потоку акустической мощности сильно размыты. При этом общий уровень сигнала сухогруза на удалении 8...10 миль составил -20...-22) дБ по отношению к уровню фоновых шумов P^2 , а ВМ – почти -30 дБ.

Существенным результатом экспериментальных исследований является также подтверждаемый факт, что для локализованного источника и правильно настроенной приемной системы уровни, зарегистрированные каналами векторного приемника, как впрочем, и каналами приемника, регистрирующего поток акустической мощности, хорошо приводятся к соответствующим значениям, полученным с помощью ПД (см. формулу (2)). Это, в частности, хорошо заметно на проходных характеристиках еще одного сухогруза, проходившего мимо приемной системы на удалении около 3.5 миль (рис. 5).

На траверзе уровни сигналов, зарегистрированные соответственно каналами V_x и W_x , должны совпадать как между собой, так и с уровнем звукового давления. Более высокий уровень, зарегистрированный каналом звукового давления

(рис. 5,б), объясняется двумя факторами – нахождением объекта в момент траверза не точно на оси X в горизонтальной плоскости (приемная система находилась глубже объекта) и более чем на 15 дБ превышением уровня шумов акватории по каналу давления над уровнем шумов по потоку акустической мощности. Действительно, для этого случая различие в абсолютных регистрируемых уровнях должно определяться соотношением:

$$\frac{P_s^2 + P_N^2}{W_{Rs} + W_{RN}} = \frac{P_s^2 + P_N^2}{P_s^2 + W_{RN}} = \left(1 + \frac{P_N^2}{P_s^2}\right) \left(1 + \frac{W_{RN}}{P_s^2}\right).$$

Уровни, зарегистрированные приемником давления и по потоку акустической мощности для малых отношений W_{RN}/P_s^2 будут совпадать, если можно пренебречь отношением P_N^2/P_s^2 по сравнению с единицей (большие уровни сигнала). Вполне естественно, что при пересечении объектом оси X системы уровни сигналов, определяемые каналом Y , уменьшаются (рис. 5).

Таким образом, описываемые эксперименты подтверждают высказанное выше утверждение, что именно величина анизотропии фоновых шумов является вторым после флуктуационной составляющей но, тем не менее, важнейшим определяющим фактором при оценке дальности обнаружения гидроакустических систем на базе приемника потока акустической мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И. Векторно-фазовые методы исследования акустических полей // Вестник МГУ, сер. Физика, Астрономия. № 6. 1994. С. 93–104.
2. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И., Некрасов В.Н., Краснописцев Н.В. Использование приемника потока акустической мощности для регистрации сигналов слабых локализованных источников на фоне шумов океана // Акустика океана. Докл. 10-й школы семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 2004. С. 349–354.
3. Гордиенко В.А., Некрасов В.Н., Гончаренко Б.И., Краснописцев Н.В., Гордиенко Е.Л., Ермолаева Е.О., Наседкин А.В. Некоторые аспекты использования приемника потока акустической мощности для регистрации сигналов слабых локализованных источников на фоне шумов океана // Проблемы и методы гидроакустических измерений: Сборник научных трудов/ФГУП “ВНИИФТРИ”. М.: 2003. С. 161–210.
4. Roy Jean-Alain. Centre Technique des Systemes Navals, Toulon, France. Measurement of ships' underwater radiated noise on ranges // UDT Pacific 98. February, 1998. Sydney, Australia. – P. 290–295.
5. Сухаревский Ю.М. Статистика основных акустических параметров // Акуст. журн. Т. 41. № 5. 1995. С. 853–861.
6. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 320 с.
7. Клячкин В.И. Статистический анализ векторно-фазовых характеристик акустических полей и алгоритм их регистрации // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 4. С. 516–523.
8. Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Гончаренко Б.И., Коропченко А.А. Особенности формирования акустических сигналов в звуковом канале нового типа // Докл. АН СССР, сер. Океанология. Т. 309. № 5. 1989. С. 1211–1214.
9. Воробьев С.Д., Сизов В.И. Векторно-фазовая структура и векторно-фазовый метод описания и анализа случайных акустических полей // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 4. С. 654–659.
10. Смартышев М.Д. О помехозащищенности гидроакустического комбинированного приемника // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 3. С. 357–358.
11. Смартышев М.Д., Шендеров Е.Л. Помехоустойчивость плоских антенн в анизотропном поле помех // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 4. С. 502–506.
12. Калью В.А., Самылин Л.П. Оценка помехоустойчивости некоторых векторно-фазовых алгоритмов обработки информации при измерении с помощью комбинированного приемника // Техн. Акуст. 1999. Т. 5. Вып. 3–4. С. 29–32.
13. Половинко Л.Н. Помехоустойчивость антенн малых волновых размеров в акустическом поле точечного источника в клине. Владивосток: изд-во ТОИ ДВО РАН, 1999. 68 с.
14. Терминологический словарь-справочник по гидроакустике / Р.Х. Бальян, Э.В. Батаногов, А.В. Богородский и др. Л.: Судостроение, 1989. С. 138.
15. Гордиенко В.А., Илюшин Я.А., Ильичев В.И. Об особенностях определения направления прихода слабых сигналов в поле шумов океана одиночным векторным приемником // Докл. АН. 1994. Т. 339. № 6. С. 808–811.
16. Гордиенко В.А., Ильичев В.И. Приемник потока акустической мощности: величина дисперсии и помехоустойчивость // Докл. РАН, Т. 340. № 3. 1995. С. 408–411.
17. Гордиенко В.А., Ильичев В.И. Одиночный приемник потока акустической мощности как эквивалент пространственной антенной решетки // Докл. РАН, Т. 339. № 5. 1994. С. 675–678.

Estimation of the Detection Range of a Hydroacoustic System Based on the Acoustic Power Flux Receiver

V. A. Gordienko^a, N. V. Krasnopistsev^b, A. V. Nasedkin^b, and V. N. Nekrasov^b

^a Faculty of Physics, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, 119992 Russia

e-mail: vgord@list.ru

^b Research Institute of Physicotechnical and Radio Engineering Measurements, Mendeleevo, Moscow oblast, Russia

Abstract—Approaches to estimating the detection range of systems based on vector receivers are considered. The approaches rely on a detailed analysis of the process of signal's acoustic power flux formation in the presence of ambient sea noise and uncover the signal information parameters at the receiver output that provide the required statistically confident range of weak signal detection under these conditions. Based on the sonar equations and the known fundamental relationships between the outputs of a pressure receiver and a vector receiver for signal and noise, estimates of the maximum possible gain in the detection range of an acoustic power flux receiver are considered as a function of anisotropy of the ambient noise field in the area.