АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 2, с. 256–262

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.87

ОСОБЕННОСТИ ФОКУСИРОВКИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В МЕЛКОМ МОРЕ

© 2010 г. А. А. Луньков, В. Г. Петников, А. А. Стромков*

Научный центр волновых исследований
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН
119991 Москва , ул. Вавилова 38. Тел.: (499) 503-8384; Факс: (499) 135-8234
E-mail: petniko@kapella.gpi.ru
** Институт прикладной физики РАН*
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46. Тел. (831) 436-72-93
E-mail: stromkov@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 15.06.09 г.

В рамках численного эксперимента исследованы возможности фокусировки низкочастотного (100–300 Гц) звукового поля в мелководном акустическом волноводе, характерном для морского шельфа. Рассмотрена фокусировка, получаемая при обращении широкополосных акустических сигналов во времени, получившая название фокусировки при временном обращении волн, а также фокусировка, реализуемая при обращении волнового фронта монохроматических звуковых полей. Продемонстрировано, что при использовании временного обращения волн для фокусировки в волноводе достаточно иметь одиночный приемно-излучающий элемент. В то же время использование соответствующей вертикальной антенны улучшает качество фокусировки. Получаемое в последнем случае качество фокусировки, оказывается примерно таким же, как в случае применения обращения волнового фронта для фокусировки монохроматических полей с частотой, равной несущей частоте широкополосных сигналов. Показано также, что в изоскоростном волноводе интенсивное поверхностное волнение существенным образом ухудшает качество фокусировки. Ухудшение особенно заметно при использовании ОВФ.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для целого ряда прикладных задач в акустике мелкого моря широко используется фокусировка звука, получаемая при обращении акустических сигналов во времени или, как это принято называть, фокусировка при временном обращении волн (ВОВ). В качестве примера здесь можно упомянуть методику подавления дальней реверберации, основанную на фокусировке акустического поля в центре мелководного волновода, т.е. в области, удаленной от рассеивающих звук верхней и нижней границ волновода [1, 8]. Другим примером здесь служит фокусировка, осуществляемая при дальней звукоподводной связи [2]. Заметим также, что с помощью ВОВ можно не только фокусировать звук, но и применять этот метод при обработке сигналов с приемных антенн [3], однако в настоящей статье мы рассмотрим лишь обычную фокусировку.

Термином "ВОВ" принято называть обращение широкополосного волнового поля. В случае тонального источника операция ВОВ становится эквивалентна обращению фазы сигнала, и ее уже называют обращением волнового фронта (ОВФ) [4, 5]. С инструментальной точки зрения в акустике оба способа фокусировки, основанные на ВОВ и ОВФ, во многом сходны между собой. В обоих из них используется пробный источник звука, помещаемый в точку предполагаемой фокусировки, а также фокусируемая вертикальная приемно-передающая антенна, принимающая сигнал от пробного источника и излучающая обратно в среду обращенный во времени сигнал. При этом в случайно неоднородном волноводе, типичном для мелководного шельфа, фокусировка в том и другом случае имеет место только вдоль одного направления, а именно вдоль линии соединяющей вертикальную антенну и пробный источник. Однако, как показано В.А. Зверевым [6], эти два способа фокусировки звука имеют и принципиальные различия. В связи с этим возможности и качество фокусировки также должны зависить от выбранного способа и от характеристик акустического волновода, где такая фокусировка имеет место. Целью настоящей работы является демонстрация в рамках численного эксперимента указанных зависимостей для мелководного волновода с постоянной скоростью звука. Такой волновод типичен для океанского шельфа в зимних услови-

ях, когда основным фактором, препятствующим эффективно фокусировать звуковое поле, является поверхностное волнение (ПВ).

Известно также, что при фокусировке в однородном волноводе с помощью ВОВ не обязательно использовать вертикальную антенну. В отличие от ОВФ фокусировка имеет место и при короткой антенне и при одиночном точечном приемно-излучающем элементе [7]. Очевидно, что возможность замены приемно-передающей антенны одиночным элементом позволяет получить как технический, так и экономический выигрыш. Однако до настоящего времени оставался открытым вопрос: насколько оправдано использование в мелководном акустическом волноводе вертикальной антенны по сравнению с одиночным приемником-излучателем. Сравнительный анализ качества фокусировки при использовании одиночного элемента и всей линейной вертикальной антенны также составляет предмет настоящей статьи.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Напомним основные схемы фокусировки звука в акустическом волноводе малой глубины. Для наших целей выберем цилиндрическую систему координат (r,z,φ). Предположим, что имеется вертикальная антенна, состоящая из J приемно-излучающих элементов, расположенных в точках $\vec{r}_j = (0, z_j)$. Антенна перегораживает большую часть рассматриваемого волновода по глубине. В точку предполагаемой фокусировки $\vec{r}_0 = (r_0, z_0, \varphi_0)$ помещается пробный источник. Сигнал от пробного источника регистрируется всеми элементами приемно-излучающей антенны и переизлучается с обращением во времени в случае, если пробный источник излучал короткий широкополосный сигнал, т.е. при использовании ВОВ. Здесь под коротким широкополосным сигналом понимается сигнал, время автокорреляции которого много меньше, чем длительность принятого сигнала на выходе оптимального фильтра, подключенного к элементу антенны. В случае излучения узкополосного тонального сигнала, т.е. при использовании ОВФ, в переизлученном сигнале обращается его фаза. Рассмотрим фокусировку звука для этих двух случаев отдельно. В первом случае эффект фокусировки в окрестности точки $\vec{r}_0$, основанный на обращении сигналов во времени, имеет место для пространственного распределения величины $B(\vec{r})$:

$$B(\vec{r}) = \max_t \left| \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega,\vec{r}) s(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \right|, \qquad (1)$$

где максимум берется для зависимости от времени t, $s(\omega)$ – спектр излученного сигнала, $P(\omega,\vec{r})$ – спектр переизлученного сигнала в точке $\vec{r}$.

$$P(\omega,\vec{r}) = \sum_j^J Z_1(\omega,\vec{r}_j,\vec{r}) Z^*(\omega,\vec{r}_0,\vec{r}_j) s^*(\omega). \qquad (2)$$

Здесь знак * означает комплексное сопряжение. $Z(\omega,\vec{r}_0,\vec{r}_j)$ – передаточная функция волновода между точками $\vec{r}_0$ и $\vec{r}_j$. $Z_1(\omega,\vec{r}_j,\vec{r})$ – передаточная функция между точками с координатами, задаваемыми векторами $\vec{r}_j$ и $\vec{r}$ (в случае использования одиночного приемно-излучающего элемента знак суммы в формуле (2) отсутствует). Заметим здесь, что функции $Z(\omega,\vec{r}_0,\vec{r}_j)$ и $Z_1(\omega,\vec{r}_j,\vec{r})\big|_{\vec{r}=\vec{r}_0}$ совпадают между собой лишь в однородном стационарном волноводе без случайных возмущений.

При использовании модового описания звукового поля передаточная функция $Z(\omega,\vec{r}_0,\vec{r}_j)$ записывается в следующем виде:

$$Z(\omega,\vec{r}_0,\vec{r}_j) = \sum_m^{M(\omega)} C_m(\omega,\vec{r}_0,\vec{r}_j) \frac{\psi_m(\omega,z_j)}{\sqrt{q_m(\omega) r_0}} \exp(i q_m(\omega) r_0), \qquad (3)$$

где $\psi_m(\omega,z)$ и $\xi_m(\omega)$ ($\xi_m(\omega) = q_m(\omega) + i\gamma_m(\omega)/2$) собственные функции (волноводные моды) и собственные значения соответствующей задачи Штурма–Лиувиля, $M(\omega)$ – число распространяющихся мод.

Коэффициенты $C_m(\omega,\vec{r}_0,\vec{r}_j)$ определяются решением системы дифференциальных уравнений для взаимодействующих мод на дистанции от пробного источника звука (точки фокусировки) до приемно-излучающего элемента антенны [8]:

$$\frac{dC_m}{dr'} = -\frac{\gamma_m}{2} C_m + i \sum_n^{M(\omega)} \nu_{nm}(\omega,r',\varphi_0) C_n \exp\left(i(q_n(\omega) - q_m(\omega) r')\right) \qquad (4)$$

с граничными условиями:

$$C_m(\omega,\vec{r}_0) = \sqrt{\rho_0 c_0 W} \psi_m(\omega,z_0), \qquad (5)$$

где ρ_0 и c_0 – соответственно плотность и скорость звука на глубине местоположения пробного источника z_0, W – мощность источника, $\nu_{nm}(\omega,r',\varphi_0)$ – коэффициент взаимодействия мод. В случае, когда единственным источником малых динамических возмущений среды распростране-

ния является ветровое поверхностное волнение[1], коэффициенты $\nu_{nm}(\omega, r', \varphi_0)$ равны:

$$\nu_{nm}(\omega, r', \varphi_0) = \\ = \zeta_{sw}(r', \varphi_0) \frac{1}{2\sqrt{q_n(\omega) q_m(\omega)}} \left. \frac{\partial \psi_n(\omega, z)}{\partial z} \right|_{z=0} \left. \frac{\partial \psi_m(\omega, z)}{\partial z} \right|_{z=0}, \quad (6)$$

$\zeta_{sw}(r', \varphi_0)$ – случайное отклонение морской поверхности от равновесного положения.

Аналогичным образом записываются соотношения для передаточной функции $Z_1(\omega, \vec{r}_j, \vec{r})$:

$$Z(\omega, \vec{r}_j, \vec{r}) = \sum_m^{M(\omega)} C_m(\omega, \vec{r}_j, \vec{r}) \frac{\psi_m(\omega, z)}{\sqrt{q_m(\omega) r}} \exp(i q_m(\omega) r), \quad (7)$$

где коэффициенты $C_m(\omega, \vec{r}_j, \vec{r})$ определяются решениями уравнения (4) на дистанции от приемно-передающих элементов антенны до точки с координатами, задаваемыми вектором $\vec{r}$. Граничные условия для уравнения (4) здесь записываются в следующем виде:

$$C_m(\omega, \vec{r}_0) = \sqrt{\rho_j c_j W_j} \psi_m(\omega, z_j), \quad (8)$$

где ρ_j и c_j – плотность и скорость звука на глубине z_j, W_j – мощность j-того излучателя антенны.

При использовании ОВФ имеет место фокусировка гармонического звукового поля с частотой ω, излучаемого вертикальной антенной. При этом распределение амплитуды звукового поля в окрестности точки (r_0, z_0, φ_0) определяется выражением (9):

$$P(\omega, \vec{r}) = \left| \sum_j^J Z_1(\omega, \vec{r}_j, \vec{r}) Z^*(\omega, \vec{r}_0, \vec{r}_j) \right|. \quad (9)$$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходные данные для численных экспериментов выбирались типичными для мелкого моря в зимних условиях[2]: скорость звука в воде не зависит от глубины и равна $c = 1460$ м/с, глубина волновода $H = 72$ м. Дно представлялось жидким однородным полупространством с плотностью 1900 кг/м^3 и показателем преломления $n_1 = c(1 + i\alpha/2)/c_1$. Скорость звука в дне $c_1 = 1800$ м/с, коэффициент $\alpha = 0.012$. При расчетах предполагалось, что вертикальная 24 элементная эквидистантная приемно-передающая линейная антенна расположена в начале координат и перекрывает весь волновод. Координаты точки фокусировки выбирались равными: $r_0 = 10$ км, $z_0 = 40$ м, $\varphi_0 = 0°$.

При изучении влияния поверхностного волнения предполагалась следующая ситуация: распространение звука от пробного источника до приемно-передающей антенны происходит в отсутствие ПВ, а обратное распространение от антенны до точки фокусировки уже при наличии ПВ. Такой приближенный подход позволил в известной степени учесть тот факт, что звук от пробного источника до антенны и обратно распространяется за конечное время, в течение которого величина $\zeta_{sw}(r', \varphi)$ изменяется случайным образом. Моделирование ПВ осуществлялось с помощью спектра Пирсона-Неймана [9]. Методика моделирования реализаций полей случайных гидродинамических возмущений описана в работе [10]. При расчетах передаточных функций волновода подразумевалось, что акустические и ветровые поверхностные волны распространяются в одном и том же направлении. Другими словами, предполагалось, что направление ветра соответствует углу $\varphi = 0°$. Таким образом, анализировалась ситуация, когда случайное поле ПВ максимальным образом влияет на распространение звука. Значения случайных величин ζ_{sw} первоначально вычислялись в декартовой системе координат с шагом по дистанции 1 м

Полоса частот широкополосных сигналов для ВОВ выбиралась равной 100–300 Гц. Предполагалось, что в указанном диапазоне частот излучается сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). В случае гармонических сигналов, т.е. при моделировании фокусировки с использованием ОВФ, частота варьировалась в этих же пределах.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ВЫВОДЫ

Результаты фокусировки в регулярном волноводе в отсутствие поверхностного волнения показаны на рис. 1 и 2. Рис. 1 демонстрирует фокусировку при использовании ВОВ, рис. 2 – ОВФ. Как видно на рис. 1, в случае применения ВОВ фокусировка имеет место и при использовании одиночного точечного приемно-излучающего элемента, что соответствует и полученным ранее экспериментальным результатам [12]. Однако качество фокусировки при использовании верти-

[1] Отметим здесь, что в изоскоростном волноводе динамические возмущения иного рода, связанные, в частности, с внутренними волнами, отсутствуют. (Нет самих внутренних волн). Что касается статических возмущений, обусловленных, например, шероховатостями дна, то для рассматриваемых методов фокусировки такие возмущения не существенны, поскольку звук в прямом и обратном направлении распространяется через одни и те же неоднородности.

[2] При выборе исходных данных для расчетов учитывалась также возможность сравнения результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований, описанных в работах [11].

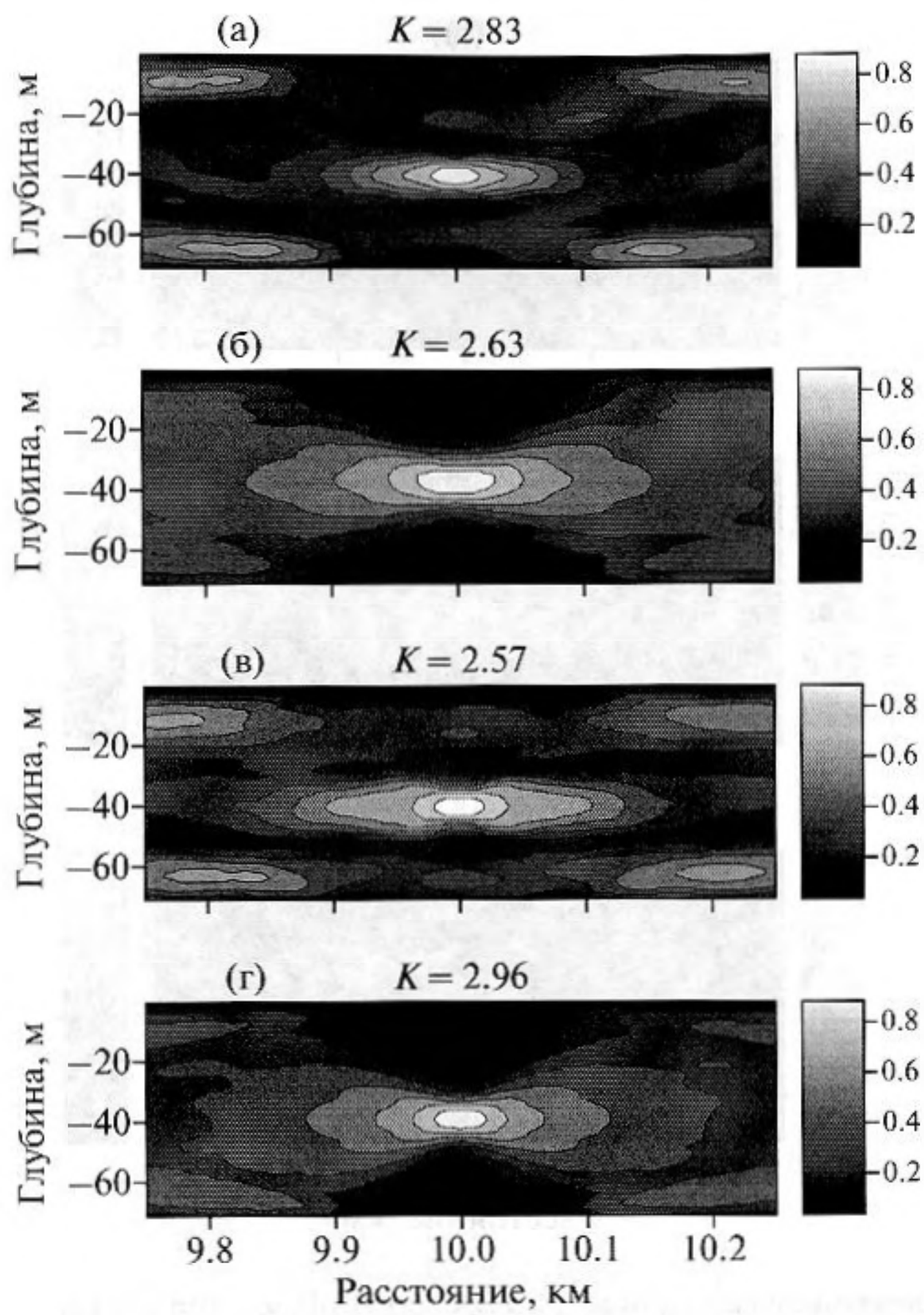

Рис. 1. Фокусировка звукового поля с использованием ВОВ. (а) одиночный приемно-излучающий элемент на глубине 9 м, (б) то же при глубине 40 м, (в) то же при глубине 63 м, (г) приемно-излучающая вертикальная антенна. K – фактор фокусировки.

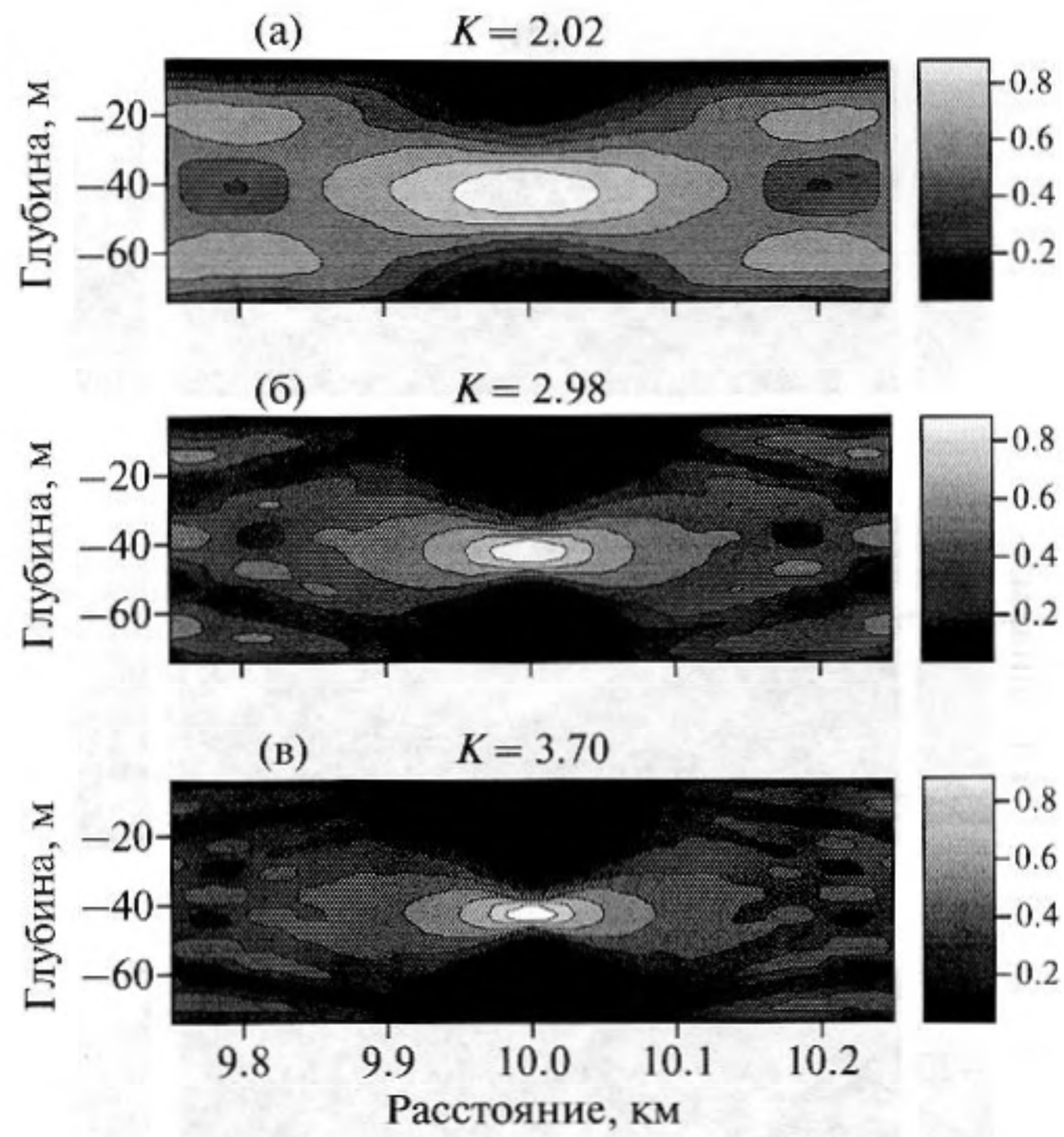

Рис. 2. Фокусировка с использованием ОВФ. Частота: (а) 100 Гц, (б) 200 Гц, (в) 300 Гц. K – фактор фокусировки.

кальной антенны немного лучше. Количественно это улучшение может быть охарактеризовано с помощью фактора фокусировки, определяемого следующим образом:

$$K = \frac{\max(B(r,z))}{\langle B(r,z)\rangle}, \tag{10}$$

$$K = \frac{\max(P(r,z))}{\langle P(r,z)\rangle} \tag{11}$$

для ВОВ и ОВФ соответственно. Здесь под $\max(B(r,z))$ и $\max(P(r,z))$ понимаются максимальные значения соответствующих величин $B(r,z)$ и $P(r,z)$, определяемых для интервалов r и z, представленных на рис. 1 и 2. $\langle B(r,z)\rangle$ и $\langle P(r,z)\rangle$ – средние значения тех же величин для тех же интервалов r и z, за исключением их значений в точке, где эти величины имеют максимальное значение. Значения K для каждого случая фокусировки показаны на рис. 1 и 2.

В то же время следует отметить, что величина K не отражает некоторых особенностей фокусировки. Например, при использовании ВОВ характер фокусировки при использовании одиночного точечного приемно-излучающего элемента зависит от глубины сложным образом. При расположении элемента на той же глубине z_0, что и пробный источник, звуковое поле в основном сосредоточено в районе фокусного пятна, хотя размер этого пятна несколько больше, чем в случае применения вертикальной антенны. При расположении одиночного элемента вблизи верхней или нижней границы волновода размер фокусного пятна примерно такой же, как для вертикальной антенны. Однако в этих случаях для распределения поля характерны побочные максимумы, отсутствующие при расположении элемента на глубине z_0, а также в случае использования антенны. Указанные особенности фокусировки обусловлены зависимостью спектра возбуждаемых мод от глубины местоположения источника звука.

Сравнение рис. 1 и рис. 2 показывает, что качество фокусировки при ВОВ и ОВФ примерно одно и то же при условии использования ОВФ акустических волн с частотой f = 200 Гц, т.е. с частотой, равной средней частоте ЛЧМ сигналов, применяемых при ВОВ[3]. Уменьшение либо уве-

[3] Отметим, что здесь приводится сравнение качества фокусировок, реализованных при одной и той же вертикальной антенне.

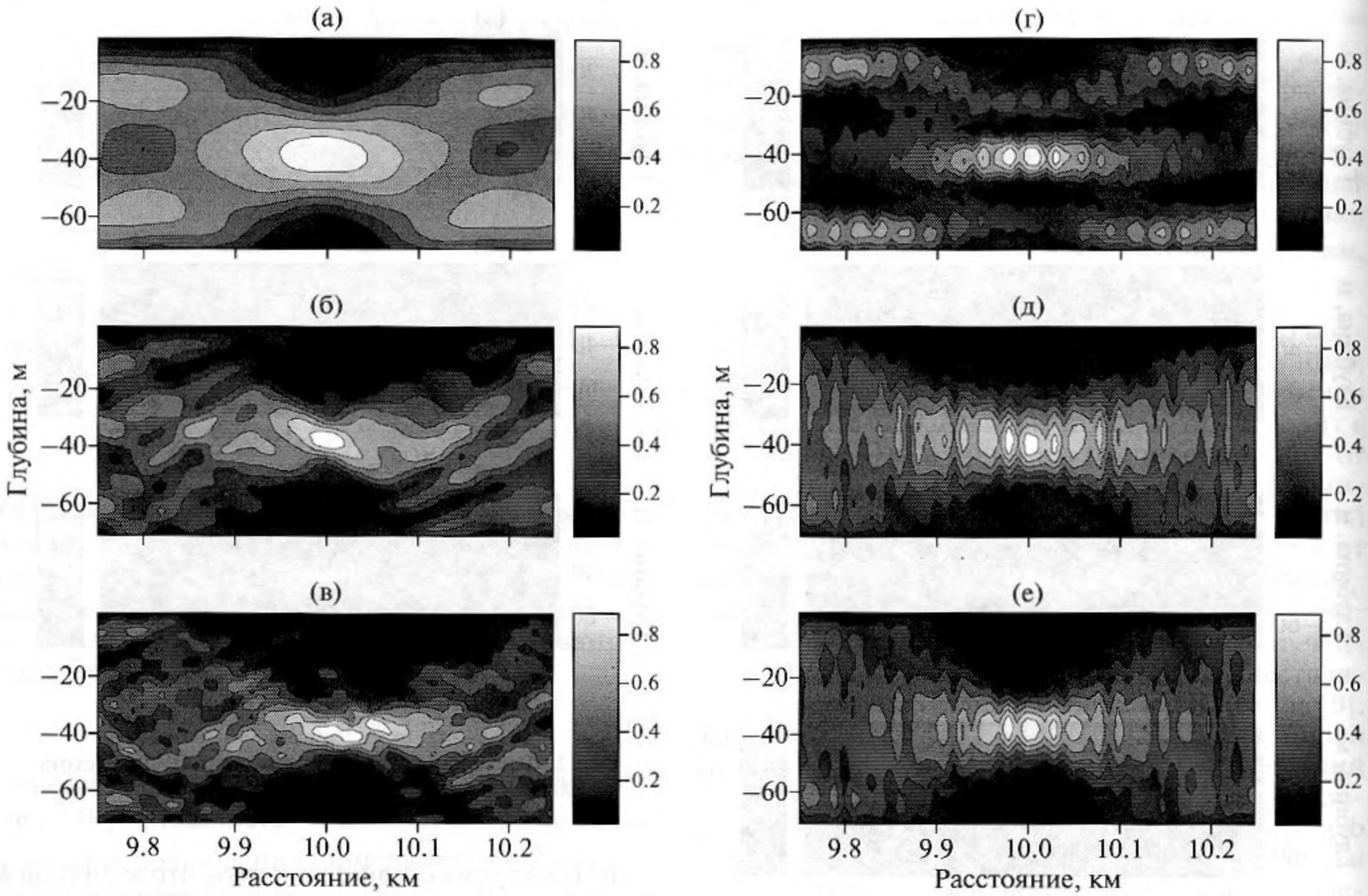

Рис. 3. Фокусировка звука при поверхностном волнении, отвечающем скорости ветра 9 м/с. (а) ОВФ, частота 100 Гц, (б) ОВФ, частота 200 Гц, (в) ОВФ, частота 300 Гц, (г) ВОВ, глубина приемно-излучающего элемента 9 м, (д) ВОВ, глубина приемно-излучающего элемента 40 м, (е) ВОВ, приемно-излучающая вертикальная антенна.

личение частоты f относительно указанного среднего значения приводит, соответственно, к ухудшению либо улучшению качества фокусировки.

Таблица. Значения $b_{ВОВ}$ и $b_{ОВФ}$ при различных способах фокусировки и разном поверхностном волнении

Тип фокусировки \ Скорость ветра, м/с		0	9	12
ВОВ	Одиночный излучатель			
	$z_0 = 9$ м	0.174	0.198	0.488
	$z_0 = 40$ м	0.095	0.132	0.171
	$z_0 = 63$ м	0.250	0.250	0.385
	Антенна	0.008	0.053	0.101
ОВФ	Антенна			
	$f = 100$ Гц	0.039	0.045	0.269
	$f = 200$ Гц	0.004	0.123	0.342
	$f = 300$ Гц	0.002	0.097	0.364

Поверхностное волнение в рассматриваемом волноводе заметным образом влияет на качество фокусировки (см. рис. 3 и 4). Естественно, что степень такого влияния зависит от скорости ветра и, соответственно, от интенсивности волнения. При скорости ветра более 12 м/с ПВ в рассматриваемых примерах практически полностью разрушает фокусное пятно на расстоянии 10 км от излучающей антенны, хотя при использовании ВОВ остается еще некоторая локализация по глубине. Отмеченное ухудшение качества фокусировки характерно лишь для изоскоростного мелководного волновода, типичного для зимнего периода времени. Летом резкий термоклин, имеющий место на океанском шельфе, "экранирует" от морской поверхности энергонесущие низшие моды распространяющегося звукового поля. Это, в свою очередь, уменьшает влияние ПВ [8].

Как было отмечено во введении, одной из областей применения фокусировки звука в мелком море является подавление дальней реверберации за счет локализации звукового поля в центре волновода. Сравним возможность локализации

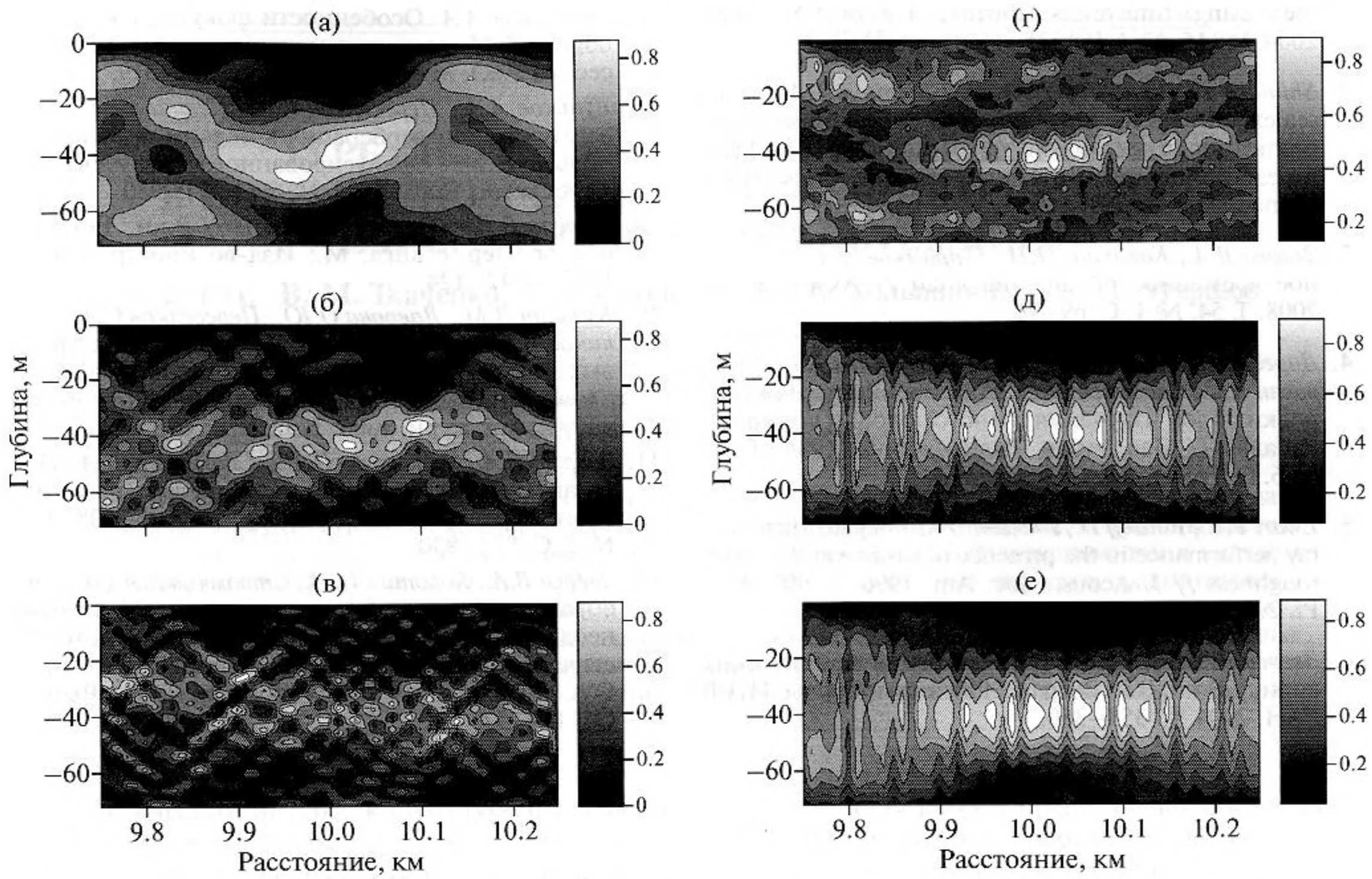

Рис. 4. Фокусировка звука при поверхностном волнении, отвечающем скорости ветра 12 м/с. (а) ОВФ, частота 100 Гц, (б) ОВФ, частота 200 Гц, (в) ОВФ, частота 300 Гц, (г) ВОВ, глубина приемно-излучающего элемента 9 м, (д) ВОВ, глубина приемно-излучающего элемента 40 м, (е) ВОВ, приемно-излучающая вертикальная антенна.

поля для ОВФ и ВОВ при различных условиях. В качестве критерия качества локализации рассмотрим отношение усредненной амплитуды звукового поля на дне волновода и в области фокусного пятна:

$$b_{\text{ВОВ}} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} B(r', H)dr'}{\int_{r_1}^{r_2} B(r', z_0)dr'}, \quad b_{\text{ОВФ}} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} P(r', H)dr'}{\int_{r_1}^{r_2} P(r', z_0)dr'}, \qquad (12)$$

где $r_1 = r_0 - 0.5\Delta r$, $r_2 = r_0 + 0.5\Delta r$, $\Delta r = 50$ м. (Выбранное значение $\Delta r = 50$ м соответствует среднему значению горизонтального размера фокусного пятна, полученного в численных экспериментах, описанных выше). Результаты расчета по формулам (12) приведены в таблице. Как видно из таблицы, в волноводе без случайных возмущений наибольшая эффективность локализации поля имеет место при использовании ОВФ на частоте 300 Гц. Однако сфокусированное на данной частоте звуковое поле оказывается наиболее чувствительным к неоднородностям, и при увеличении скорости ветра величина $b_{\text{ОВФ}}$ резко возрастает. Применяя ВОВ, мы, конечно, проигрываем в степени локализации поля в невозмущенном волноводе (см. таблицу), но в то же время с ростом интенсивности ветрового волнения уровень облученности донной поверхности остается относительно низким. В первую очередь, эта положительная тенденция наблюдается при использовании вертикальной антенны, а также в случае применения одиночного широкополосного приемно-излучающего элемента, расположенного в центре волновода. В то же время, сопоставляя результаты расчета $b_{\text{ВОВ}}$ для одиночного излучателя и антенны, можно сделать вывод о том, что использование антенны является более эффективным.

Работа поддержана РФФИ, проекты № 08-02-00283 и № 07-02-001205, а также CRDF проект REC 010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kim S., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C., Edelmann G., Akai T.* Echo-to-reverberation enhance-

ment using a time reversal mirror // J. Acoust. Soc. Am. 2004. V. 115. № 4. P. 1525–1531.

2. *Shimura T., Watanabe Y., Ochi H., Hattori T.* Basic at-sea experiment for long horizontal time-reversal communication in deep ocean // Proceedings of the 9th European Conference on Underwater Acoustics. Paris, France, 2008. P. 699–704.

3. *Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А.* Численное временное обращение волн // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 69–76.

4. *Даргейко М.М., Кравцов Ю.А., Петников В.Г., Петросян А.С., Славинский М.М.* Особенности фокусировки полей излучения в многомодовых волновых каналах // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 6. С. 746–752.

5. *Ewart T.E., Rouseff D., Jackson D.* Conjugate mirror array performance in the presence of surface and bottom roughness // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 99. № 4. Pt. 2. P. 2572.

6. *Зверев В.А.* Два принципа обращения акустических волн // В кн. В.А. Зверев. Избранные труды. ИПФ РАН, 2004. С. 351–360.

7. *Стромков А.А.* Особенности фокусировки систем обращения времени в мелком море // Труды XX сессии РАО. М.: ГЕОС, 2008. С. 315–319.

8. *Луньков А.А., Переселков С.А., Петников В.Г.* Поверхностная реверберация в мелком море при использовании сфокусированного излучения // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 6. С. 971–980.

9. *Пирсон В.Дж.* Ветровые волны // В кн.: Ветровые волны. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. С. 42–124.

10. *Кузькин В.М., Лаврова О.Ю., Пересёлков С.А., Петников В.Г., Сабинин К.Д.* Анизотропное поле фоновых внутренних волн на морском шельфе и его влияние на распространение низкочастотного звука // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 1. С. 74–86.

11. *Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А.* Пространственная протяженность области акустического обращения волн // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 5. С. 823–830.

12. *Зверев В.А., Коротин П.И., Стромков А.А.* Акустика обращения сигналов в мелком море // Акустика неоднородных сред. Ежегодник Российского акустического общества. Труды научной школы проф. С.А. Рыбака. Троицк.: Тровант, 2007. Вып. 8. С. 147–157.