АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 3, с. 400–409

УДК 534.87

ДАЛЬНЯЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОМ МЕЛКОМ МОРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2007 г. С. А. Пересёлков, В. Г. Петников*

Воронежский государственный университет
394006 Воронеж, Университетская пл. 1
E-mail: pereselkov@yandex.ru
**Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*
119991 Москва, ул. Вавилова 38
E-mail: petniko@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 06.09.06 г.

В рамках численного эксперимента исследованы особенности донной низкочастотной реверберации в случайно-неоднородном мелком море при использовании вертикальных излучающих антенн, фокусирующих акустическое поле на различных расстояниях от морского дна. Предполагалось, что основным источником флуктуаций скорости звука в среде являются фоновые внутренние волны. Для фокусировки поля использовалось обращение волнового фронта акустических волн от пробного источника, помещенного в точку фокусировки. Показано, что уровень реверберации во многом определяется присутствием внутренних волн и может изменяться на 5–20 дБ при удалении точки фокусировки от морского дна на расстояние $H/2$, где H – глубина волновода.

PACS: 43.30.Vh, 43.30.Gv, 43.30.Hw

ВВЕДЕНИЕ

Говоря о будущем акустики океана, как одном из разделов современной физики, академик Л.М. Бреховских еще в 1987 г. [1] отметил следующие возможные направления ее развития:

• изучение особенностей распространения акустических волн в океане на все более низких частотах до десятков герц;

• исследование проблем распространения звука на мелководном морском шельфе;

• разработка различных методов решения обратной задачи по акустическому мониторингу (акустической томографии) морской среды.

Последующие годы полностью подтвердили справедливость научного предвидения Л.М. Бреховских. Одной из актуальных проблем стали исследования низкочастотной донной реверберации на морском шельфе применительно к задачам крупномасштабного акустического мониторинга. Этой проблеме посвящена и настоящая статья.

Для управления реверберацией в работе [2] предложено использовать сфокусированное излучение, т.е. локализовать звуковое поле на различных расстояниях от морского дна и таким образом влиять на интенсивность обратного рассеяния звука. (Фокусировка производится с помощью вертикальной линейной антенны, перегораживающей большую часть акустического волновода.) В частности, в этой работе продемонстрировано, что за счет фокусировки в центр волновода удается уменьшить уровень рассеянных сигналов на 5 дБ при расстояниях до рассеивающей площадки морского дна (или, что то же самое, до точки фокусировки) 4.7 км. Частота звука составляла 3.5 кГц. Однако возможности управления реверберацией существенным образом зависят от параметров акустического волновода, частоты и расстояния до рассеивающей площадки. В первую очередь такая зависимость связана с затуханием звука, изменяющим количество энергонесущих волноводных мод, а следовательно, и качество фокусировки.

Под параметрами волновода здесь понимается и пространственное распределение поля скорости звука в морской воде, которое в силу присутствия фоновых внутренних волн (ВВ) носит случайный характер и меняется с течением времени. Последнее обстоятельство особым образом влияет на возможность управления донной реверберацией по следующим причинам:

Во-первых, при исследовании реверберации с помощью совмещенных линейных излучающих и приемных антенн рассеянный звуковой сигнал приходит с разных направлений. В присутствии случайного поля ВВ мгновенные характеристики

волновода вдоль этих направлений различаются между собой даже в случае, если мы имеем дело с изотропным полем ВВ. С другой стороны, если для фокусировки звука мы используем обращение во времени сигнала от пробного точечного источника [3], то фокусировка осуществляется лишь только вдоль одного из этих направлений. Это кардинальным образом изменяет ситуацию по отношению к регулярному волноводу без случайных неоднородностей, характеристики которого, по нашему предположению, не зависят от направления в горизонтальной плоскости и, следовательно, фокусировка имеет место для всех направлений.

Во-вторых, на практике распределение звукового поля[1] по апертуре вертикальной антенны, необходимое для его фокусировки на разной глубине, может определяться в один момент времени, а эксперименты, связанные с реверберацией, могут осуществляться в другой момент. При этом разница во времени может достигать нескольких часов, в течение которых параметры фокусировки из-за наличия ВВ ухудшаются.

Заметим здесь также, что интенсивность фоновых ВВ на морском шельфе существенным образом зависит как от района исследований, так и от времени года.

В данной работе в рамках численного эксперимента рассмотрена дальняя (10–30 км) низкочастотная (230 Гц) донная реверберация при использовании сфокусированного излучения. Расчеты выполнены для мелководной акватории, характерной для Атлантического шельфа США в летнее время, когда фоновые ВВ выражены особенно ярко. Получены оценки уменьшения уровня реверберации при перемещении точки фокусировки от морского дна к середине волновода.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Для моделирования донной реверберации использовалось модовое описание звукового поля [4, 5]. Фокусировка осуществлялась за счет обращения волнового фронта звуковой волны от пробного источника, помещенного в точку предполагаемой фокусировки [3].

Рассматривался волновод постоянной глубины H. Начало отсчета цилиндрической системы координат находилось на верхней поверхности волновода. Горизонтальная ось – r, угол – φ, вертикальная ось – z (направлена вниз). Элементы линейной приемоизлучающей антенны имели координаты $(0, z_j)$, $j = 1, \ldots, J$. Приемоизлучающая антенна излучала импульсный сигнал длительности τ и была настроена на фокусировку в точку (r_0, φ_0, z_0). В предположении узкополосного сигнала, все параметры падающего и рассеянного полей рассматривались только для одной центральной частоты f_0.

Комплексная амплитуда акустического поля антенны в момент времени T в произвольной точке волновода с координатами (r, φ, H) имеет вид:

$$p(r, \varphi, z, T) = \sum_m^M C_m(r, \varphi, T)\frac{\psi_m(z)}{\sqrt{q_m r}}\exp(iq_m r) \equiv \equiv \sum_m^M p_m(r, \varphi, z, T), \quad (1)$$

где $\psi_m(z)$ и $\xi_m = q_m + i\gamma_m/2$ – собственная функция и постоянная распространения m-й моды; – число энергонесущих мод, C_m – коэффициент, определяемый решением системы уравнений на дистанции от антенны $r' = 0$ до рассеивающей площадки дна $r' = r$ [6]:

$$\frac{dC_m(r', \varphi, T)}{dr'} = -\frac{\gamma_m}{2}C_m(r', \varphi, T) + + i\sum_{n=1}^M \nu_{nm}(r', \varphi, T)C_n(r', \varphi, T)\exp(i(q_n - q_m)r') \quad (2)$$

с коэффициентами взаимодействия мод ν_{nm} и начальными условиями:

$$C_m = \sqrt{VW_0}\exp(i\pi/4)\times \times \sum_{j=1}^J \sqrt{\rho_j c_j}w^*(0, \varphi_0, z_j, T)\psi_m(z_j), \quad (3)$$

$w(0, \varphi_0, z_j, T)$ – принимаемое в точке $(0, z_j)$ поле пробного точечного источника единичной мощности, расположенного в точке фокусировки (r_0, z_0, φ_0) (знак "*" означает комплексное сопряжение):

$$w(0, \varphi_0, z_j, T) = = \sum_{m=1}^M C'_m(0, \varphi_0, T)\frac{\psi_m(z_j)}{\sqrt{q_m r_0}}\exp(i\pi/4)\exp(iq_m r_0); \quad (4)$$

Коэффициенты C'_m также определяются решением системы (2), но на дистанции от $r' = r$ до $r' = 0$, в момент времени T и с другими начальными условиями:

$$C'_m = \sqrt{\rho_0 c_0}\exp(i\pi/4)\psi_m(z_0), \quad (5)$$

[1] Здесь и далее под термином звуковое поле имеется в виду его комплексная амплитуда.

$V = [\sum_{j=1}^{J} |w(0, z_j)|^2]^{-1}$ – коэффициент, определяемый из условия: $W_0 = \sum_{j=1}^{J} W_j$, W_0 и $W_j = VW_0|w(0, z_j)|^2$ – мощность всей антенны и ее элемента номера j соответственно; ρ_j, ρ_0 и c_j, c_0 – плотность и скорость звука на глубинах z_j и z_0; M – число мод.

В соответствии с (1) звуковое поле, падающее на рассеивающую площадку морского дна с координатами (r, φ, H) равно $p(r, \varphi, H, T) = \sum_{m}^{M} p_m(r, \varphi, H, T)$.

Коэффициенты взаимодействия мод рассчитывались с помощью следующего соотношения:

$$\nu_{nm}(r', \varphi, T) = \\ = (k^2/2\sqrt{q_n q_m}) \int_0^H \tilde{\mu}(r', z, \varphi, T)\psi_n(z)\psi_m(z)dz, \quad (6)$$

где $\tilde{\mu}(r', z, \varphi, T)$ – случайные возмущения показателя преломления $\tilde{n}(r', \varphi, z, T)$ водной среды $(\tilde{n}^2(r', \varphi, z, T) \cong \tilde{n}_0^2(z) + \tilde{\mu}(r', \varphi, z, T)$. В случае, когда случайные возмущения связаны с ВВ, значения $\tilde{\mu}$ определяются величиной вертикальных смещений жидкости $\zeta(r', \varphi, z, T)$. $\tilde{\mu} = -2QN^2(z)\zeta(r', \varphi, z, T)$, где $Q \cong 2.4$ с^2/м, $N(z)$ – частота плавучести. Методика моделирования случайных колебаний жидкости в поле ВВ $\zeta(r', \varphi, z, T)$ при известном спектре этих колебаний изложена в работе [7].

Реверберация рассчитывалась при следующих условиях: 1) Межмодовая дисперсия не учитывалась, групповые и фазовые скорости всех мод предполагались равными одной величине c. (Следует отметить, что в мелком море на дистанции в несколько десятков километров межмодовая дисперсия обычно хорошо заметна. Однако она может быть компенсирована на некотором интервале дистанций вблизи точки фокусировки при соответствующей обработке как излучаемого, так и принимаемого реверберационного сигнала. Для этой цели необходимо применять не обращение волнового фронта волны, а близкую к ней операцию обращения сигнала во времени [8, 9].) 2) Длительность излучаемого сигнала τ мала, и поперечный размер озвученной площадки $dr = c\tau/2$ много меньше периода интерференционных биений падающего поля. 3) Вся озвученная площадка, имеющая форму кольца с радиусом r и толщиной dr, разбивалась на элементарные площадки (сектора кругового кольца с угловым размером $\Delta\varphi$, в пределах которого падающее на площадку звуковое поле считалось постоянным). Направление на элементарную рассеивающую площадку задавалось углом φ_l, где l – номер площадки, L – общее число площадок. 4) Предполагался статистический характер рассеяния звука. При этом полагалось, что коэффициент обратного рассеяния m_b подчиняется закону Ламберта $m_b = g^2 \sin\theta^{in} \sin\theta^{sc}$, где θ^{in} и θ^{sc} – угол скольжения падающей и рассеянной звуковой волны соответственно, g – параметр, характеризующий отражающие свойства рассеивающей поверхности. 5) Величина T характеризует временну́ю зависимость параметров звукового канала, слабо меняющихся за время распространения звука до рассеивающей площадки дна и обратно до антенны.

Комплексную амплитуду реверберационного сигнала $p^{sc}(T, z_j)$, принимаемого со всех направлений на элементе приемоизлучающей антенны $(0, z_j)$ в момент времени T, удобно представить как функцию расстояния r до озвученной площадки. При выдвинутых выше предположениях, имеем [4, 5]:

$$p^{sc}(r, z_j, T) = \sum_{l}^{L}\sum_{\mu}^{M} C_\mu(0, \varphi_l, T)\frac{\psi_\mu(z_j)}{\sqrt{q_\mu r}}\exp(iq_\mu r), \quad (7)$$

где коэффициент C_μ для моды рассеянного поля определяется решением уравнения (2) на дистанции от $r' = r$ до $r' = 0$ с начальным условием:

$$C_\mu = \frac{\exp(i\pi/4)}{\sqrt{8\pi}}\sqrt{dS}\psi_\mu(H)\times \\ \times\sum_{m}^{M}\vartheta_{m,\mu,l}\exp(i\phi_{m,\mu,l})\sqrt{m_b(\theta_m^{in}, \theta_\mu^{sc})}p_m(r, \varphi_l, H, T), \quad (8)$$

где $m_b = g^2 \sin\theta_m^{in} \sin\theta_\mu^{sc}$, θ_m^{in} и θ_μ^{sc} – углы скольжения модообразующих (бриллюэновских) лучей, соответствующие m-й падающей и μ-й рассеянной модам, dS – размер рассеивающей площадки $(dS = rdr\Delta\varphi)$, $\vartheta_{m,\mu,l}$ и $\phi_{m,\mu,l}$ – статистически независимые случайные величины. Далее мы будем предполагать, что фаза $\phi_{m,\mu,l}$ распределена равномерно в интервале $(0, 2\pi)$, а амплитуда $\vartheta_{m,\mu,l}$ подчинена распределению Релея:

$$\eta(\vartheta_{m,\mu,l}) = \frac{\vartheta_{m,\mu,l}}{\sigma_{m,\mu}^2}\exp\left(-\frac{\vartheta_{m,\mu,l}^2}{2\sigma_{m,\mu}^2}\right). \quad (9)$$

На основе (7) рассчитывалась средняя по апертуре антенны интенсивность $I(r)$ реверберационного сигнала:

$$I(r) = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\frac{|p^{sc}(r, z_j)|^2}{\rho_j c_j}. \quad (10)$$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчетов был выбран волновод с параметрами, соответствующими Атлантическому

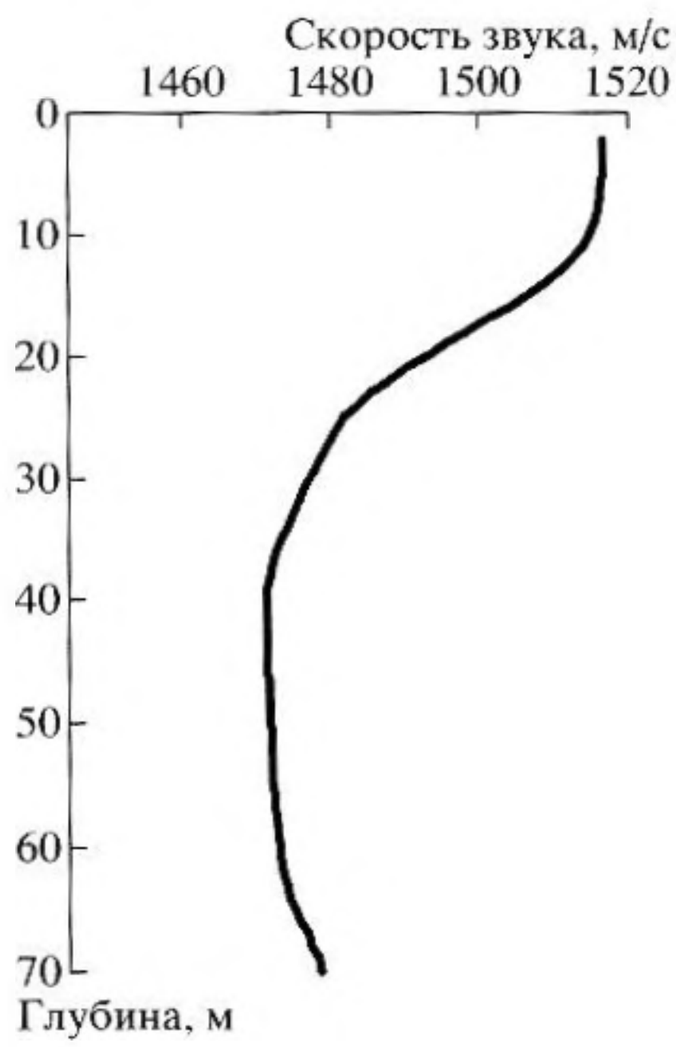

Рис. 1. Вертикальный профиль скорости звука.

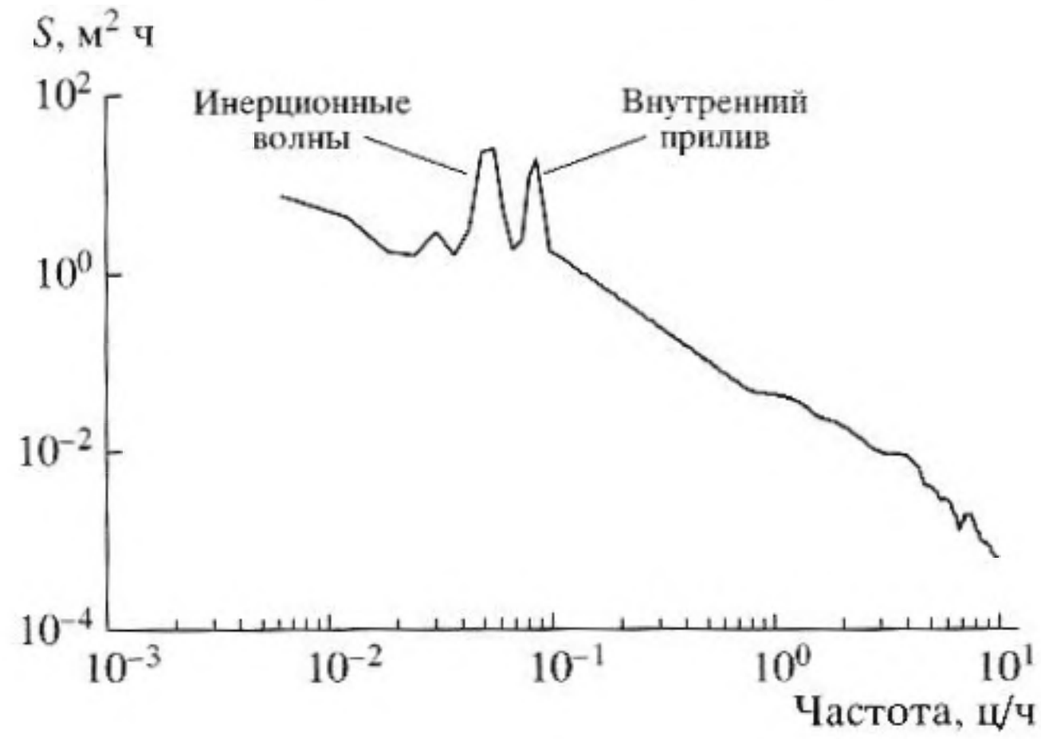

Рис. 2. Частотный спектр фоновых внутренних волн.

шельфу США. Глубина волновода предполагалась равной $H = 72$ м. Профиль скорости в волноводе, соответствующий измеренному в натурном эксперименте [7], показан на рис. 1. Параметры дна: скорость звука $c_1 = 1800$ м/с, плотность $\rho_1 = 1.9$ г/см^3, коэффициент затухания звука в дне $\beta = 0.09$ дБ/(км · Гц), параметр, характеризующий рассеивающие свойства дна, был выбран $g = 0.11$ [5]. Для моделирования случайных смещений жидкости был использован частотный спектр фоновых ВВ, приведенный для указанного района океанского шельфа в работе [7]. (Спектр показан на рис. 2.) Поле ВВ предполагалось изотропным[2]. Частота звука $f_0 = 230$ Гц. Мощность излучения антенны $W_0 = 2$ кВт. Длительность импульса $\tau = 0.1$ с. Предполагалось, что приемоизлучающая антенна перекрывает весь волновод. Глубины расположения элементов антенны $z_j = 72 - 3j$ м, $j = 0, \ldots, 24$. При численном моделировании величина L выбиралась равной $L = 20$.

[2] Указанное предположение для поля фоновых внутренних волн на морском шельфе выполняется далеко не всегда. Более того, приведенный на рис. 2 спектр был получен для анизотропного поля. Однако здесь мы полагаем, что подобная анизотропия не будет сказываться при регистрации рассеянного сигнала, приходящего со всех возможных направлений, т.е. от рассеивающих площадок, угловые координаты которых лежат в диапазоне углов $\varphi = 0$–2π. В связи с этим для простоты расчетов мы и предположили, что поле ВВ изотропное.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ВЫВОДЫ

На рис. 3 в яркостном виде показана амплитуда звукового поля вертикальной антенны в районе точек фокусировки (точек расположения пробного источника звука) в отсутствие ВВ. Как видно на рисунке, несмотря на затухание звука, хорошее качество фокусировки сохраняется вплоть до дистанций в 30 км от приемоизлучающей антенны. Еще раз заметим здесь, что в отсутствие ВВ подобная фокусировка имеет место для всех точек с координатами (r, z), показанными на рис. 3, вне зависимости от угловой координаты φ. Другими словами, такая фокусировка имеет место для всей области акустического волновода, имеющей форму тора с прямоугольным сечением и приемопередающей антенной в центре тора.

На рис. 4 показана аналогичная картина в момент времени $T = 0$ с при наличии ВВ и при фокусировке в точку с координатами $r_0 = 10$ км, $z_0 = 36$ м, $\varphi_0 = 0°$ и $r_0 = 10$ км, $z_0 = 72$ м, $\varphi_0 = 0°$. Как видно на рисунке, ВВ существенным образом влияют на структуру звукового поля даже на относительно небольшом (10 км) расстоянии от приемоизлучающей антенны. Это хорошо видно в точках, отличающихся от места расположения пробного источника значением угловой координаты φ. Соответственно и на усредненной для разных значений углов яркостной картине звукового поля эффекта фокусировки практически не видно (см. рис. 4ж, 4з). Усреднение проводилось для всех значений углов в интервале [0–360°]. Дискретность по углу при расчетах составляла $\Delta\varphi = 360°/L = 18°$.

Однако этот эффект становится более заметен в случае, когда антенна излучает обращенный во времени сигнал, принятый в отсутствии ВВ. Соответствующая этому случаю усредненная для разных значений углов яркостная картина показана на рис. 5а, 5б. Таким образом, в гипотети-

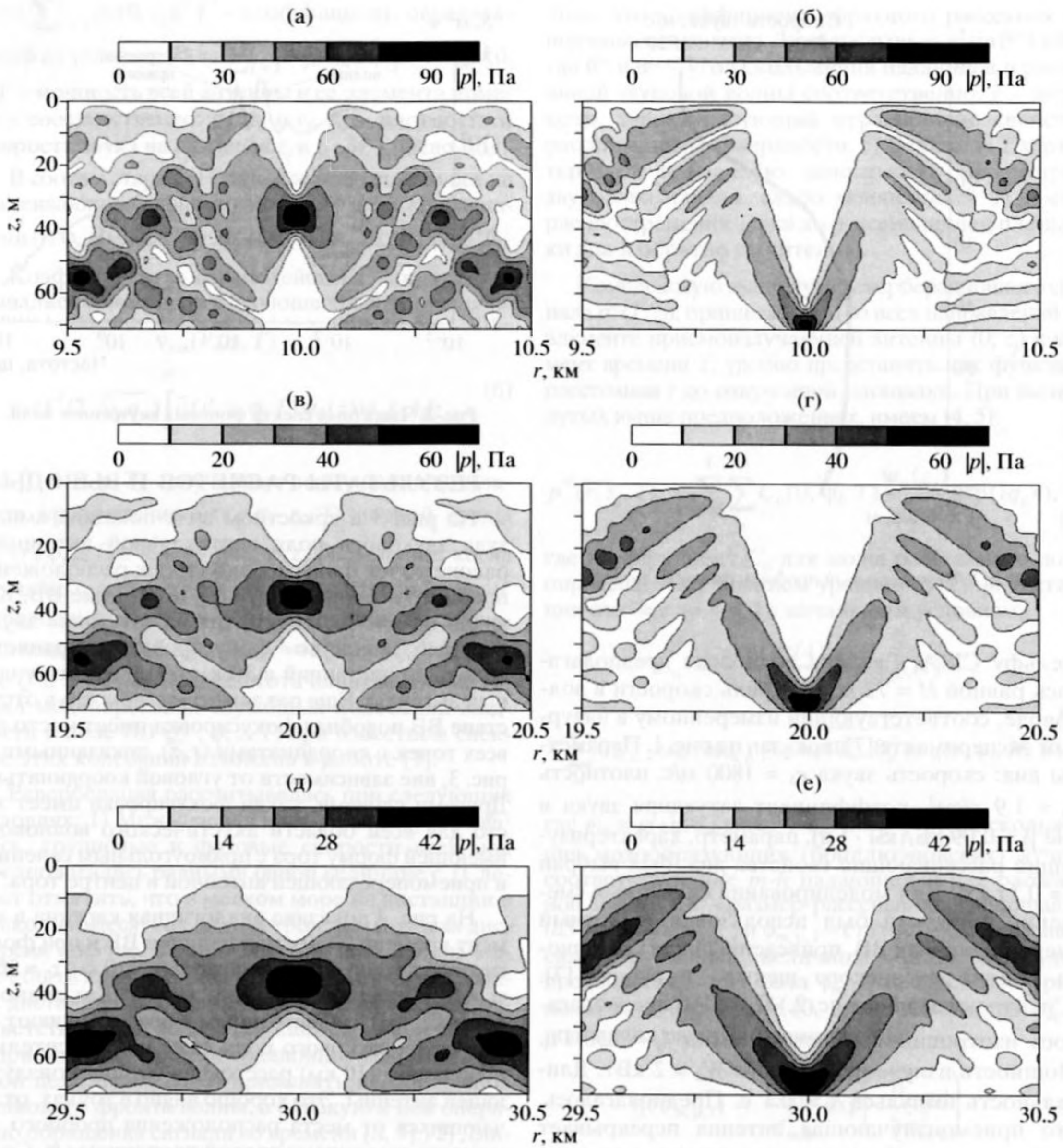

Рис. 3. Фокусировка звукового поля в отсутствие ВВ на различных расстояниях от излучающей антенны и различных глубинах. а) r_0 = 10 км, z_0 = 36 м; б) r_0 = 10 км, z_0 = 72 м; в) r_0 = 20 км, z_0 = 36 м; г) r_0 = 20 км, z_0 = 72 м; д) r_0 = 30 км, z_0 = 36 м; е) r_0 = 30 км, z_0 = 72 м.

ческой ситуации, показанной на рис. 5, когда прием сигналов от пробного источника осуществляется в отсутствие ВВ, а излучение при их наличии, фокусировка звукового поля в среднем оказывается лучше. Оценки фактора фокусировки в вертикальной плоскости подтверждают этот вывод. Так, фактор фокусировки звукового поля, показанного на рис. 4ж и 4з, соответственно равен $q = 1.71$ и $q = 2.46$, в то время как на рис. 5а и 5б $q = 2.2$ и $q = 3.59$. Напомним, что фактор фокусировки характеризует превышение амплитуды звукового поля в области локализации по сравнению со средним уровнем: $q = |p(r_0, z_0)|/p_{mid}$, где $p_{mid} = \int_0^H |p(r_0, z)|\, dz/H$.

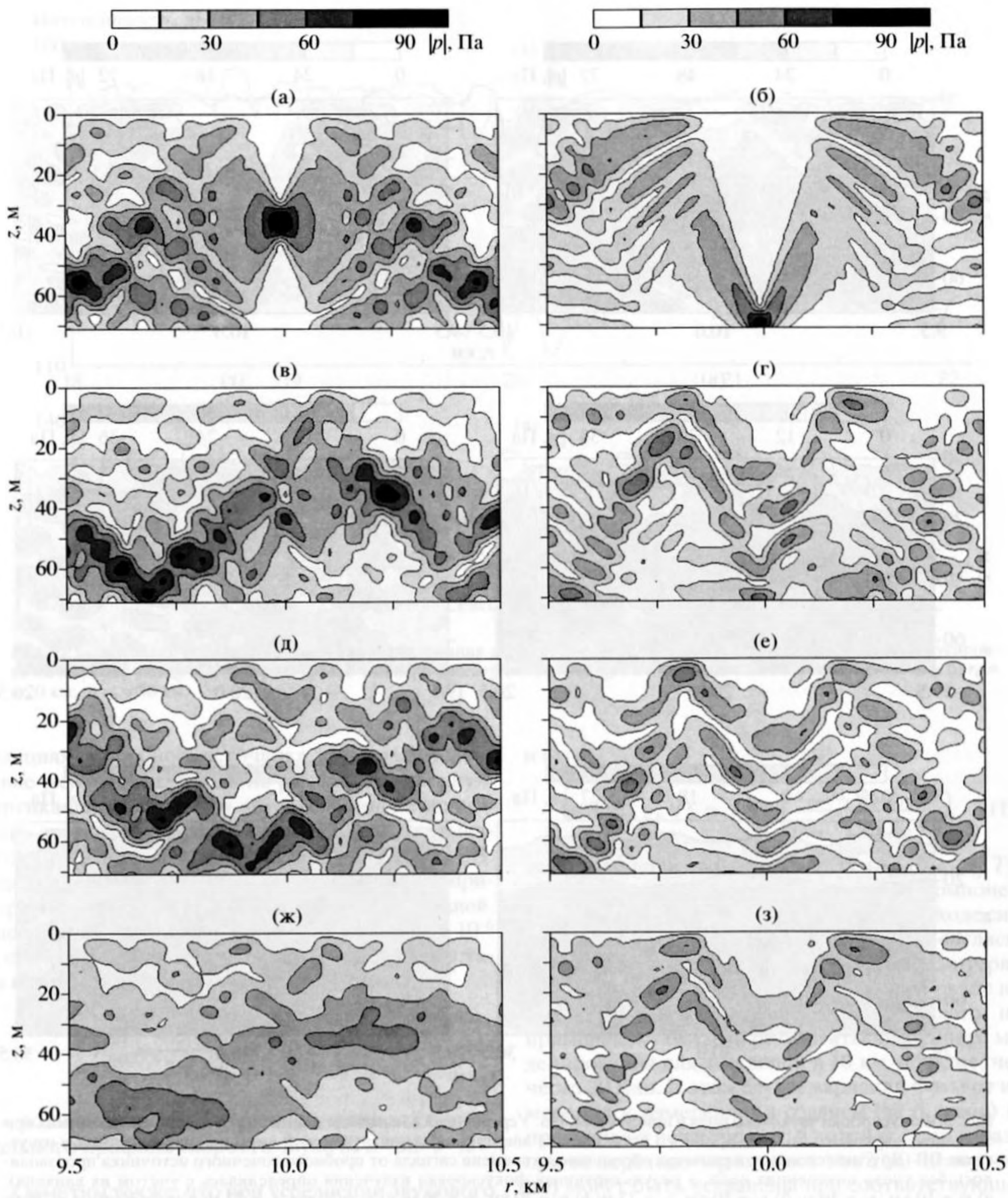

Рис. 4. Фокусировка звукового поля в присутствии ВВ, r_0 = 10 км. а) z_0 = 36 м, φ = 0°; б) z_0 = 72 м, φ = 0°; в) z_0 = 36 м, φ = 90°; г) z_0 = 72 м, φ = 90°; д) z_0 = 36 м, φ = 180°; е) z_0 = 72 м, φ = 180°; ж) z_0 = 36 м, средняя для всех углов; з) z_0 = 72 м, средняя для всех углов.

Показанные на рис. 3, 4ж, 4з и 5 картины звуковых полей характеризуют в среднем звуковое поле, падающее на рассеивающую круговую площадку морского дна при соответствующей фокусировке звукового поля. Соответственно улучшение фокусировки, продемонстрированное на

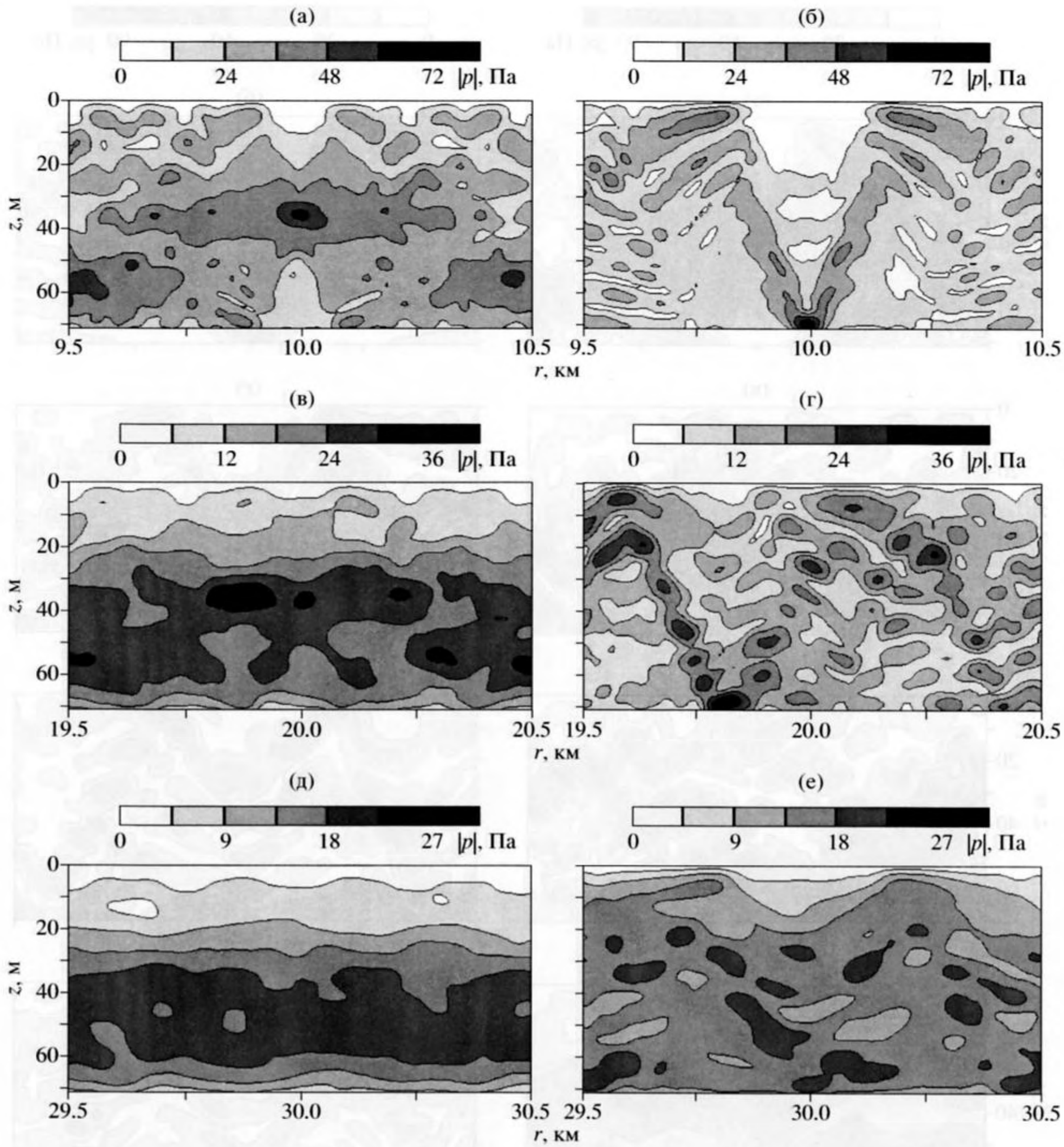

Рис. 5. Фокусировка звукового поля в присутствии ВВ. Усредненная для разных значений углов яркостная картина при значениях звукового поля от пробного источника на апертуре приемоизлучающей антенны, рассчитанных в отсутствие ВВ (Другими словами, в расчетах обращение во времени сигнала от пробного точечного источника производилось без учета внутренних волн, а результирующая фокусировка излучения определялась с учетом их влияния): а) r_0 = 10 км, z_0 = 36 м; б) r_0 = 10 км, z_0 = 72 м; в) r_0 = 20 км, z_0 = 36 м; г) r_0 = 20 км, z_0 = 72 м; д) r_0 = 30 км, z_0 = 36 м; е) r_0 = 30 км, z_0 = 72 м.

рис. 5а, 5б, позволяет утверждать, что в реальной ситуации при наличии ВВ минимизация поля на рассеивающей площадке (или наоборот, его концентрация) возможна при излучении звукового поля, полученного в результате усреднения по времени звукового поля от пробного источника. Время усреднения при этом должно быть много больше, чем время корреляции случайных колебаний жидкости в присутствии ВВ. Действительно, как показано в работе [10], на небольших ди-

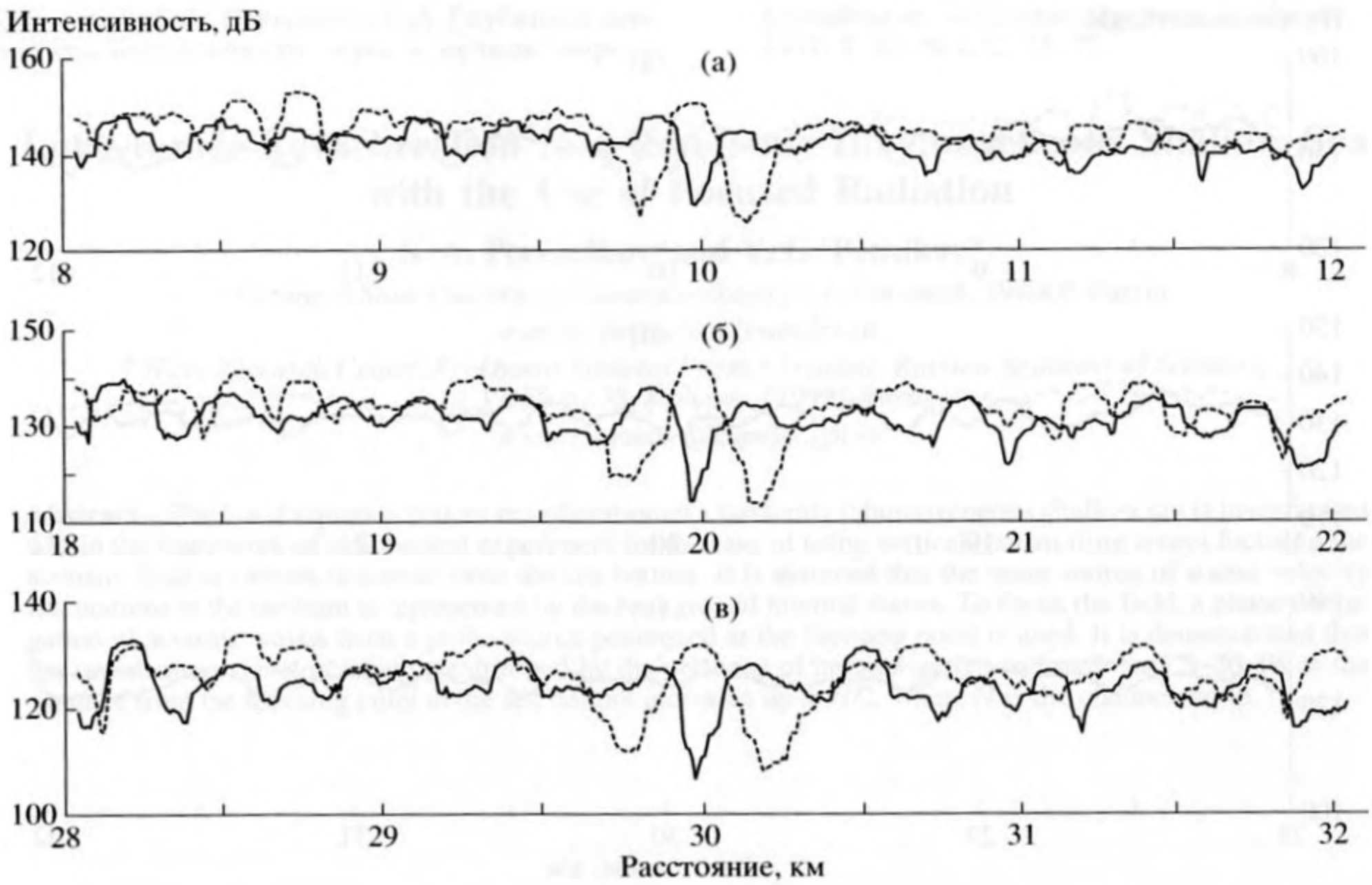

Рис. 6. Зависимости уровня реверберации от расстояния до рассеивающей площадки в отсутствие ВВ при фокусировке на морское дно $z_0 = 72$ м (пунктирные линии) и в центр волновода $z_0 = 36$ м (сплошные линии). а) $r_0 = 10$ км; б) $r_0 = 20$ км; в) $r_0 = 30$ км.

станциях от пробного источника, когда взаимодействие между модами еще не разрушает исходную вертикальную структуру звукового поля в волноводе, среднее по времени значение поля оказывается близким к его величине в отсутствие ВВ. Оценки показывают, что в рассматриваемом примере мы имеем дело именно с такой ситуацией. Здесь коэффициент диффузии [10] равен $a_p \leq 10^{-6}$ и, соответственно, величина продольного масштаба когерентности звукового поля составляет:

$$R_{cog} \approx \frac{4|d|k^2H^3}{3\pi^4 c a_p} \geq 170 \text{ км}, \qquad (11)$$

k – волновое число, d – средний градиент вертикального профиля скорости звука ($d \cong -0.5$ с$^{-1}$).

Отметим также, что при усреднении звукового поля на приемных элементах антенны мы имеем в виду следующий алгоритм, реализуемый в реальной ситуации. Отдельно измеряются и затем усредняются амплитуда

$$A(0, \varphi_0, z_j, T) = |w(0, \varphi_0, z_j, T)| = \sqrt{a^2_{\cos}(0, \varphi_0, z_j, T) + a^2_{\sin}(0, \varphi_0, z_j, T)} \qquad (12)$$

и фаза

$$\varphi(0, \varphi_0, z_j, T) = \mathrm{Arctg}\left(\frac{a_{\sin}(0, \varphi_0, z_j, T)}{a_{\cos}(0, \varphi_0, z_j, T)}\right) \qquad (13)$$

звукового поля, где $a_{\sin}(0, \varphi_0, z_j, T)$ и $a_{\cos}(0, \varphi_0, z_j, T)$ – квадратурные синусная и косинусная компоненты поля $w(0, \varphi_0, z_j, T)$, измеряемого на выходе синхронного детектора. Существенно, что согласно формуле (13) фаза сигнала изменяется в интервале $[-\infty, \infty]$. Для ее измерения в этом интервале необходимо измерять фазу достаточно часто, например, как показали результаты численного моделирования для дистанции в 10 км, не реже, чем через 30 мин. В этом случае вариации фазы от измерения к измерению в среднем (за 6 суток) не превышают величины 19° и ложные скачки фазы при ее переходе через точки $\pm\pi n/2$ (n – целое число) могут быть устранены при соответствующей обработке.

Интенсивность реверберации, регистрируемой приемоизлучающей антенной, отвечает ситуациям, изображенным на рис. 3, 5. Например, на рис. 6 приведены зависимости средней по вертикали интенсивности реверберации при фокусировке звукового поля, показанной на рис. 3, т.е. в отсутствие ВВ. Зависимости сглажены и по гори-

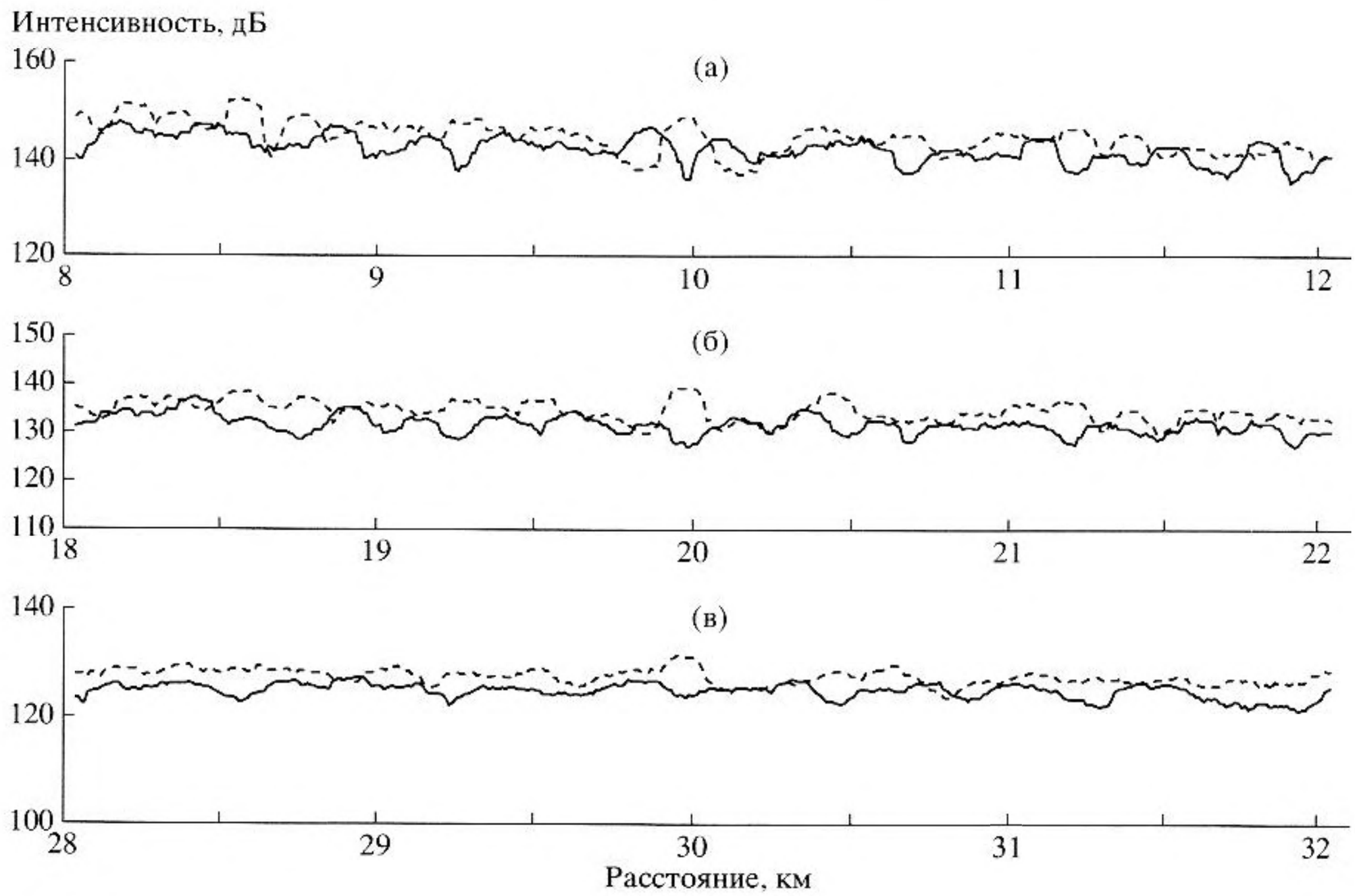

Рис. 7. Зависимости уровня реверберации от расстояния до рассеивающей площадки в присутствии ВВ при фокусировке на морское дно z_0 = 72 м (пунктирные линии) и в центр волновода z_0 = 36 м (сплошные линии). а) r_0 = 10 км; б) r_0 = 20 км; в) r_0 = 30 км.

зонтали скользящим окном 100 м, примерно соответствующим горизонтальному размеру фокального пятна. При $r = r_0$ на кривых наблюдаются пик-максимум и пик-минимум соответственно при фокусировке поля на дно и в центр волновода. Этот эффект имеет место и при наличии ВВ, хотя и не столь выраженный. Расчеты дальней реверберации при наличии ВВ показаны на рис. 7. (Соответствующая усредненная картина звукового поля для разных расстояний от приемоизлучающей антенны показана на рис. 5.)

Таким образом, предложенная в работе [2] методика управления донной реверберацией оказывается работоспособной и на низких частотах при больших расстояниях от приемоизлучающей антенны. Присутствие интенсивных фоновых ВВ сказывается на эффективности ее применения.

Авторы выражают благодарность В.А. Григорьеву за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 05-02-16842.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М.* Океан и человек. Настоящее и будущее. М.: Наука, 1987. 304 с.
2. *Kim S., Kuperman W.A., Hodgkiss W.S., Song H.C., Edelmann G., Akai T.* Echo-to-reverberation enhancement using a time reversal mirror // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. V. 115. № 4. P. 1525–1531.
3. *Даргейко М.М. и др.* Особенности фокусировки полей излучения в многомодовых волновых каналах // Изв. вузов Радиофизика. 1984. V. 27. № 6. С. 746–752.
4. *Ellis D.D.* A shallow-water normal-mode reverberation model // J. Acoust. Soc. Amer. 1995. V. 97. № 5. P. 2804–2814.
5. *Grigor'ev V.A., Katsnelson B.G., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A.* Scattering of low frequency sound by bottom in shallow oceanic waveguide // Physics of Wave Phenomena. 2004. V. 12. № 1. P. 40–56.
6. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
7. *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.
8. *Kuperman W.A. et al.* Phase conjugation in the ocean: Experimental demonstration of an acoustic time-reversal mirror // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 1. P. 25–40.
9. *Зверев В.А.* Принцип акустического обращения волн и голография // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 792–801.

10. *Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А.* Глубинная зависимость интенсивности звука в мелком море со случайными неоднородностями // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 1. С. 73–77.

Long-Range Reverberation in a Randomly Inhomogeneous Shallow Sea with the Use of Focused Radiation

S. A. Pereselkov[a] and V. G. Petnikov[b]

[a] *Voronezh State University, Universitetskaya pl. 1, Voronezh, 394006 Russia*
e-mail: pereselkov@yandex.ru

[b] *Wave Research Center, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, Moscow, 119991 Russia*
e-mail: petniko@kapella.gpi.ru

Abstract—The low-frequency bottom reverberation in a randomly inhomogeneous shallow sea is investigated within the framework of a numerical experiment for the case of using vertical transmitting arrays focusing the acoustic field at various distances from the sea bottom. It is assumed that the main source of sound velocity fluctuations in the medium is represented by the background internal waves. To focus the field, a phase conjugation of acoustic waves from a probe source positioned at the focusing point is used. It is demonstrated that the reverberation level is mainly determined by the presence of internal waves and may vary 5–20 dB as the distance from the focusing point to the sea bottom increases up to $H/2$, where H is the channel depth.