

ность прошедшего импульса больше длительности падающего, временные и спектральные огибающие обоих импульсов различны), так что эйнштейновская трактовка скорости света как предельной скорости движения любого объекта в вакууме ("скорость света в вакууме не может зависеть от скорости источника" [14]), в обсуждаемой картине туннелирования не нарушается. Однако исследование сверхсветового опережения некоторой части импульса по сравнению с таким же импульсом, распространяющимся в вакууме, может представлять не только академический, но и практический интерес, открывая перспективы для приложений.

Авторы благодарят Т. Ареки, Л.М. Зелёного, М.А. Зуева, В. Кузмака, А.А. Марадудина, Г. Пети, О.В. Руденко и В.Е. Фортова за обсуждение результатов этой работы.

Список литературы

1. Gamow G Z. *Phys.* **51** 204 (1928)
2. Шварцбург А Б *УФН* **177** 43 (2007) [Shvartsburg A B *Phys. Usp.* **50** 37 (2007)]
3. Shvartsburg A B, Kuzmiak V, Petite G *Phys. Rep.* **452** 33 (2007)
4. Shvartsburg A B, Petite G, Zuev M *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 2271 (2011)
5. Гинзбург В Л *Распространение электромагнитных волн в плазме* (М.: Наука, 1967) [Ginzburg V L *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas* (Oxford: Pergamon Press, 1970)]
6. Shvartsburg A B *Impulse Time-Domain Electromagnetics of Continuous Media* (Boston: Birkhäuser, 1999)
7. Condon E U, Morse P M *Rev. Mod. Phys.* **3** 43 (1931)
8. MacColl L A *Phys. Rev.* **40** 621 (1932)
9. Buttiker M, Landauer R J. *Phys. C Solid State Phys.* **21** 6207 (1988)
10. Steinberg A M, Kwiat P G, Chiao R Y *Phys. Rev. Lett.* **71** 708 (1993)
11. Nimtz G, Enders A, Spieker H J. *Physique I* **4** 565 (1994)
12. Milonni P W J. *Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **35** R31 (2002)
13. Shvartsburg A B et al. *Phys. Rev. E* **78** 016601 (2008)
14. Einstein A "On the electrodynamics of moving bodies", in *The Collected Papers of Albert Einstein* Vol. 2 *The Swiss Years: Writings, 1900–1909* (Eds J Stachel et al.) (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1989)

PACS numbers: **43.20.+g, 43.30.+m, 43.60.-c**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201111k.1217

Фокусировка низкочастотных звуковых полей на океанском шельфе

В.Г. Петников, А.А. Стромков

1. Введение

В настоящее время для целого ряда прикладных задач акустики морского шельфа изучается возможность использования сфокусированного низкочастотного (100–500 Гц) звукового поля. Речь идёт о фокусировке звука на расстояниях в несколько десятков километров от фокусирующих систем при типичной глубине моря порядка 100 м.

С физической точки зрения, ставится задача о фокусировке звука в плоском волноводе, параметры кото-

рого (глубина, показатель преломления, акустические характеристики нижней границы, определяемые морским дном) сложным образом зависят от пространственных координат. Существенно, что часть этих параметров, в первую очередь показатель преломления, испытывает случайные пространственно-временные возмущения. Кроме того, расстояние до точки фокусировки значительно превышает размеры фокусирующей системы.

В такой ситуации, пожалуй, единственным способом сфокусировать звук является применение методов, основанных на излучении фокусирующей системой самосогласованного со средой волнового поля. К таким методам относятся обращение волнового фронта (ОВФ) акустических волн и сходный с ним метод, основанный на временном обращении волн (ВОВ) [1–3] (который в англоязычной литературе получил название "time-reversal mirror"). Напомним, что в основе указанных методов лежит регистрация звукового поля от пробного источника (ПИ), помещённого в точку предполагаемой фокусировки, и излучение фокусирующей системой обратно в волновод обращённого волнового поля. Распространение звука в обратном направлении через те же самые неоднородности, что и в прямом направлении, приводит к компенсации фазовых и временных искажений акустических сигналов и, как следствие, к фокусировке в месте расположения ПИ.

Настоящее сообщение содержит описание методов и результатов исследований необычных свойств сфокусированного звука в мелком море. Обсуждаются характеристики физических устройств, предназначенных для фокусировки акустического поля в столь сложных с экспериментальной точки зрения условиях. Рассматриваются возможные сферы использования сфокусированного звука.

2. Методы исследования сфокусированного звука в мелком море

Изучение особенностей фокусировки звука на морском шельфе проводилось как в рамках численного моделирования, так и в натурных экспериментах (см., например, работы [4–6]). В общем случае эффект фокусировки в окрестности точки $\mathbf{r}_0$, основанный на ВОВ, рассчитывался для пространственного распределения величины $B(\mathbf{r})$:

$$B(\mathbf{r}) = \max_t (B_c(\mathbf{r}, t)) = \max_t \left[\frac{1}{T} \left| \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, \mathbf{r}) s(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \right| \right]. \quad (1)$$

Здесь функция $B_c(\mathbf{r}, t)$ представляет собой огибающую взаимно корреляционной функции излучённого и принимаемого переизлучённого сигнала, строго говоря, определяемую для широкополосных сигналов с конечной длительностью; максимум берётся для зависимости от времени t ; $\mathbf{r}_0$ — радиус-вектор точки фокусировки (точки расположения ПИ); $s(\omega)$ — спектр излучённого сигнала; T — длительность сигнала; $P(\omega, \mathbf{r})$ — спектр переизлучённого сигнала в точке $\mathbf{r}$,

$$P(\omega, \mathbf{r}) = \sum_j Z_1(\omega, \mathbf{r}_j, \mathbf{r}) Z^*(\omega, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_j) s^*(\omega), \quad (2)$$

В.Г. Петников. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ. E-mail: petniko@kapella.gpi.ru
А.А. Стромков. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, РФ

где знак * означает комплексное сопряжение; $Z(\omega, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_j)$ и $Z_1(\omega, \mathbf{r}_j, \mathbf{r})$ — передаточные функции волновода между точками $\mathbf{r}_0$ и $\mathbf{r}_j$ и между точками $\mathbf{r}_j$ и $\mathbf{r}$ соответственно; $\mathbf{r}_j$ — радиус-вектор трансиверов (приёмно-излучающих элементов) фокусирующей системы. Предполагается, что в качестве такой системы выступает дискретная вертикальная антенна, состоящая из J трансиверов (именно такие антенны используются в натурном гидроакустическом эксперименте для излучения и приёма низкочастотных гидроакустических сигналов).

При фокусировке квазигармонического звукового поля с частотой $\omega = \omega_0$ и сколь угодно большой длительностью формула (1) переходит в известное выражение для амплитуды поля в точке наблюдения :

$$P_a(\omega_0, \mathbf{r}) = \left| \sum_j^J Z_1(\omega_0, \mathbf{r}_j, \mathbf{r}) Z^*(\omega_0, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_j) \right| s_0. \quad (3)$$

Формула (3) описывает фокусировку с помощью ОВФ для гармонического ПИ с амплитудой s_0 . Как показано В.А. Зверевым [3], два способа фокусировки (с помощью ВОВ и ОВФ) имеют принципиальные различия, что и подтвердило численное моделирование.

При численном моделировании передаточные функции представлялись в виде суммы взаимодействующих волноводных мод. В частности, для вычисления функции $Z(\omega, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_j)$ использовалось следующее выражение:

$$Z(\omega, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_j) = \sum_m^{M(\omega)} C_m(\omega, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_j) \frac{\psi_m(\omega, z_j)}{\sqrt{q_m(\omega) r_0}} \exp(iq_m(\omega) r_0), \quad (4)$$

где $\psi_m(\omega, z)$ и $\xi_m(\omega)$ — собственные функции (волноводные моды) и собственные значения соответствующей задачи Штурма–Лиувилля ($\xi_m(\omega) = q_m(\omega) + i\gamma_m(\omega)/2$), $M(\omega)$ — число распространяющихся мод. Аналогично записывается выражение и для функции $Z_1(\omega, \mathbf{r}_j, \mathbf{r})$ [6].

Коэффициенты $C_m(\omega, \mathbf{r}_0, \mathbf{r}_j)$ определяются решением системы дифференциальных уравнений для взаимодействующих мод на интервале от пробного источника до приёмно-излучающего элемента антенны [6]. Ключевым в этих уравнениях является коэффициент межмодового взаимодействия, зависящий от вида пространственно-временных возмущений показателя преломления (скорости звука) в волноводе. В качестве таковых для морского шельфа в первую очередь следует учитывать возмущения, связанные с поверхностными волнами, а в летний период — и с внутренними волнами.

Моделирование фокусировки звукового поля сводится к решению более общей задачи о взаимодействии волновых полей разной физической природы на океанском шельфе. Методика её решения содержится в работе [7]. Отметим здесь только, что эта методика основывается на использовании пространственно-временных спектров мощности случайных вертикальных смещений жидкости в поле внутренних и поверхностных волн. Для поля фоновых внутренних волн на шельфе такие спектры (заметно изменяющиеся от акватории к акватории) измеряются в эксперименте, включающем в себя и радиолокационные наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн. Для поверхностных волн можно использовать известные эмпирические соотношения для спектра ветрового волнения (например, соотношение Пирсона–Неймана).

Таким образом, с использованием соотношений (1), (3) оказывается возможным рассчитать сфокусированное звуковое поле в окрестности пробного источника при ВОВ и ОВФ. Наибольший интерес представляет расчёт поля в вертикальной плоскости, проходящей через вертикальную фокусирующую антенну и ПИ, — в цилиндрической системе координат с центром в точке расположения антенны это плоскость (r, z, φ_0) , где r — расстояние, z — глубина, φ_0 — угол, определяющий направление на источник. При этом примечательной особенностью рассматриваемой задачи, имеющей также важное практическое значение, является тот факт, что в горизонтально однородном волноводе при отсутствии случайных возмущений (например, в безветренную погоду в зимний период) фокусировка имеет место в любой вертикальной плоскости (r, z, φ) , а не только в плоскости ПИ, при условии, конечно, что параметры волновода не зависят от угла φ . Другими словами, область фокусировки в этом случае имеет форму тора. Конечно, в действительности такой случай не является типичным. Более вероятна ситуация, в которой существует слабая зависимость параметров волновода от угла φ и область фокусировки имеет форму тороидального сегмента.

При современных мощностях вычислительной техники расчёт сфокусированного звукового поля на плоскости (r, z, φ_0) с требуемым пространственным разрешением не представляет больших проблем. На рисунке 1 приведены схема и параметры численного эксперимента, имитирующего фокусировку звука в типичном районе морского шельфа. Результаты расчётов представлены в разделе 3. Отмеченные ниже общие закономерности, следующие из этих результатов, проверялись и наблюдались нами при численном моделировании с достаточно широким набором параметров (не только с указанным на рис. 1) задачи фокусировки в мелком море.

В то же время измерить пространственные характеристики звукового поля на плоскости (r, z, φ_0) в натурном эксперименте вряд ли возможно. Для этой цели необходимо развернуть в указанной плоскости большое количество вертикальных измерительных приёмных цепочек. В предположении, что ПИ находится в том же месте, что и один из приёмников цепочек ($r_0 = r_{q'}$, $z_0 = z_{n'}$), формулы (1) и (3) для плоскости (r, z, φ_0) могут быть представлены в следующем виде:

$$B(r_q, z_n) = \max_t \left[\frac{1}{T} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \sum_j^J Z_1(\omega, z_j, r_q, z_n) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times Z^*(\omega, r_{q'}, z_{n'}, z_j) |s(\omega)|^2 \exp(-i\omega t) d\omega \right| \right], \quad (5)$$

$$P_a(\omega_0, r_q, z_n) = \left| \sum_j^J Z_1(\omega_0, z_j, r_q, z_n) Z^*(\omega_0, r_{q'}, z_{n'}, z_j) \right| s_0. \quad (6)$$

Пространственное разрешение и размеры диагностируемой области при этом будут определяться числом цепочек и расстоянием между приёмниками.

В настоящее время известны результаты натурного эксперимента лишь с одной измерительной цепочкой, позволившей зарегистрировать вертикальное распределение звукового поля в фокусном пятне и его эволюцию со временем [4]. Однако этот натуральный эксперимент

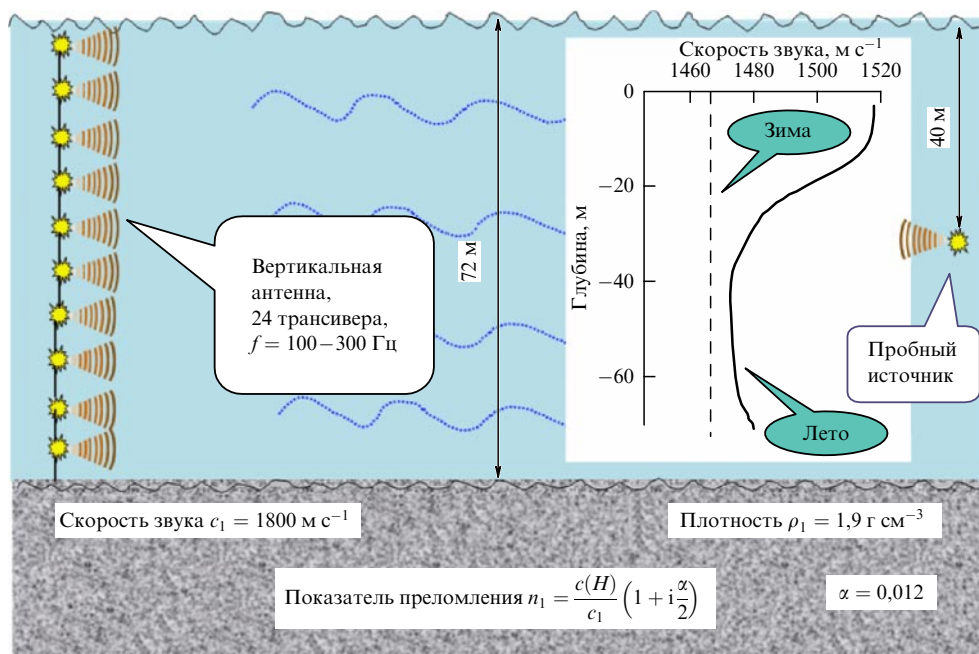


Рис. 1. Схема и параметры численного моделирования.

проводился в закрытом районе морского шельфа при небольшом градиенте вертикального профиля и слабом поверхностном волнении, т.е. в отсутствие указанных выше случайных возмущений профиля скорости звука. В такой ситуации, т.е. в приближении "замороженной" среды, существует более простой способ оценки качества фокусировки, реализованный в наших экспериментах [5]. Речь идёт о комбинированном способе оценки сфокусированного излучения, включающего в себя измерения передаточных функций волновода с последующим расчётом сфокусированного звукового поля. Естественно, при этом предполагается обратимость передаточной функции относительно местоположения источника и приёмника звука.

Методика измерений схематично представлена на рис. 2, где изображено научно-исследовательское судно, буксирующее источник звука по направлению к приёмной антенне. Трасса буксировки, которая пересекает точку предполагаемой фокусировки звука, находится в плоскости (r, z, φ_0) . Регистрация известного сигнала от источника позволяет измерить передаточные функции $Z(\omega, r_0, z_0, \varphi_0, z_j)$ и $Z_1(\omega, z_j, r_q, z_{n'}, \varphi_0)$ и затем, используя (5), (6), рассчитать горизонтальное распределение звукового поля в фокусном пятне.

3. Особенности фокусировки звука на морском шельфе

Особенности фокусировки низкочастотного звука в мелком море обусловлены волноводным характером распространения акустического поля. Среди этих особенностей в первую очередь следует отметить возможность фокусировки с использованием одиночного трансивера в случае применения ВОВ и широкополосного акустического поля¹.

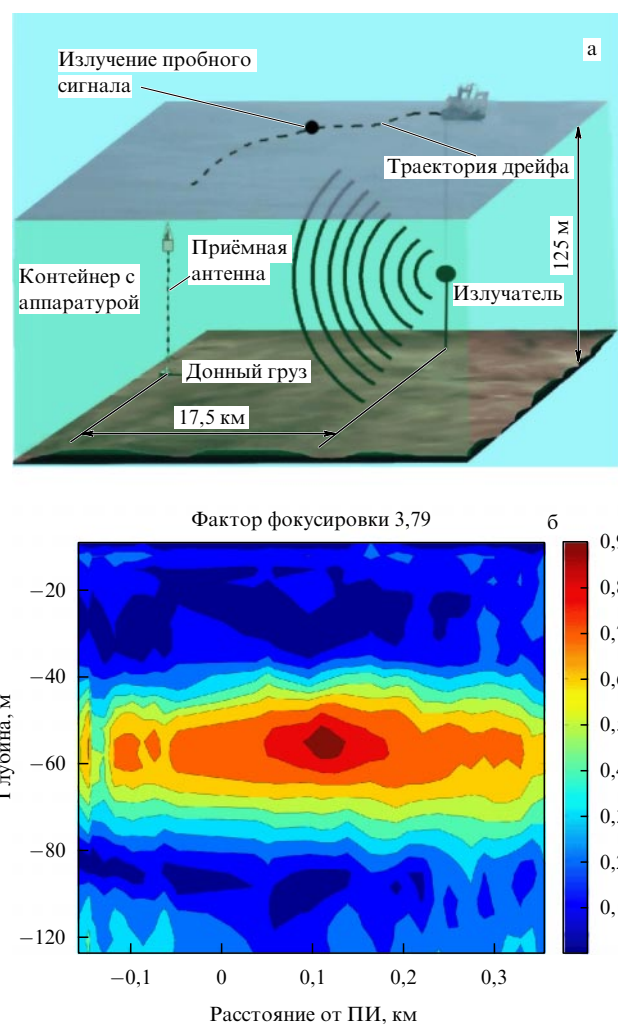


Рис. 2. (а) Схема и параметры натурного эксперимента в Баренцевом море. (б) Фокусировка звукового поля в полосе частот 100–300 Гц.

¹ Таким образом, фокусировка в волноводе аналогична фокусировке с помощью одиночного трансивера в сильно рассеивающей среде [2].

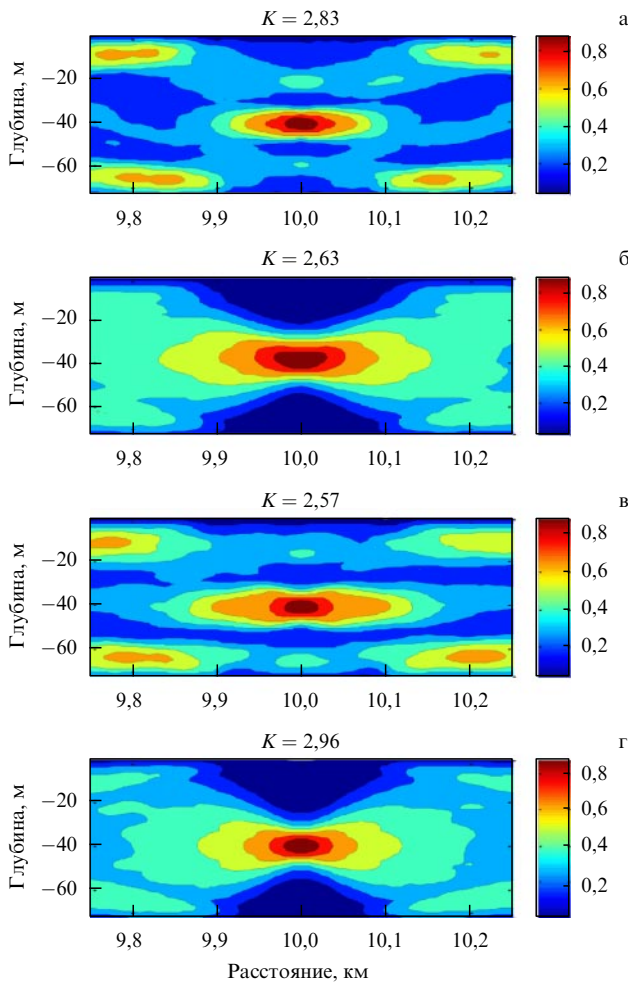


Рис. 3. Фокусировка звукового поля с использованием ВОВ (численное моделирование): одиночный трансивер на глубине (а) 9 м, (б) 40 м, (в) 63 м; (г) фокусирующая вертикальная антенна.

Пример такой фокусировки (здесь и далее рассматривается нормированное на максимальное значение распределение $B(r, z)$) на расстоянии ≈ 10 км приведён на рис. 3. При моделировании предполагалось, что пробный источник излучает сигнал с линейной частотной модуляцией в полосе $f = 100 - 300$ Гц. Для грубой оценки качества фокусировки на рис. 3 приведено также расчётное значение коэффициента $K = \max(B(r, z)) / \langle B(r, z) \rangle$, обычно называемого фактором фокусировки². Здесь под $\max(B(r, z))$ понимается максимальное значение величины $B(r, z)$, определяемой для интервалов r и z , представленных на рис. 3, $\langle B(r, z) \rangle$ — среднее значение в тех же интервалах за исключением точки фокусировки.

Как видно из рис. 3, качество фокусировки при использовании вертикальной антенны лишь немного лучше, чем при использовании одиночного трансивера. Однако величина K не отражает некоторых особенностей фокусировки. Например, характер фокусировки при одиночном трансивере зависит от глубины. При расположении элемента на той же глубине z_0 , что и ПИ, звуковое поле сосредоточено в области фокусного

пятна, хотя размер этого пятна несколько больше, чем в случае применения вертикальной антенны. При расположении трансивера вблизи границ волновода размер фокусного пятна примерно тот же, что и при использовании вертикальной антенны. Однако в этих случаях для распределения поля характерны побочные максимумы, отсутствующие при его расположении на глубине z_0 , а также в случае использования антенны. Эти особенности обусловлены зависимостью спектра возбуждаемых мод от глубины погружения источника звука.

Возможность фокусировки с помощью одиночного трансивера получила подтверждение и при расчётах с использованием передаточных функций, измеренных в натурном эксперименте (см. рис. 2). Полоса частот излучаемых акустических сигналов составляла $f = 100 - 300$ Гц. Расчёты сфокусированного поля проводились по формуле для одиночного трансивера, находящегося на глубине z_j [5]:

$$B(r_q, z_n) = \max_t \left[\frac{1}{T} \left| \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega, r_q, z_n', z_n) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times Z^*(\omega, r_{q'}, z_n', z_j) |s(\omega)|^2 \exp(-i\omega t) d\omega \right| \right], \quad (7)$$

где $n = 1, 2, \dots, J$. Формула (7) совпадает с точным выражением (5) только для точек, лежащих на траектории движения источника звука в натурном эксперименте. В то же время результаты расчётов показали, что эта формула верно описывает фокусировку звука на плоскости (r, z, φ_0) .

Следует также подчеркнуть, что качество фокусировки при одиночном трансивере и ВОВ существенно зависит от относительной полосы частот $\Delta f/f$ звукового поля. Численное моделирование показало, что для типичных условий мелкого моря величина $\Delta f/f$, при которой фактор фокусировки не опускается ниже 2,5, превышает 40 %.

При использовании ОВФ фокусировка с помощью одиночного трансивера невозможна. В этом случае для фокусировки звука необходимо применять развитые вертикальные антенны, перегораживающие весь мелководный волновод. Результаты фокусировки при ОВФ для различных частот гармонических акустических сигналов показаны на рис. 4 (моделирование с использованием формулы (6)). Как и следовало ожидать, качество фокусировки повышается с возрастанием частоты. Сравнение рис. 3 и 4 показывает, что качество фокусировки при ВОВ и ОВФ примерно одинаково при условии использования ОВФ акустических волн с частотой $f = 200$ Гц, т.е. с частотой, равной средней частоте линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов, применяемых при ВОВ³. В то же время оказалось, что качество фокусировки слабо зависит от числа трансиверов при неизменной общей длине фокусирующей антенны (рис. 4б, г). И наоборот, качество фокусировки резко снижается при уменьшении длины антенны и неизменном числе трансиверов. Причём тот факт, что расстояние между трансиверами становится всё меньше и меньше по сравнению с $\lambda/2$ (λ — длина звуковой волны), не оказывает существенного влияния. В частно-

² Отметим, что в случае фокусировки квазигармонических звуковых полей с помощью ОВФ мы можем аналогичным образом записать выражение для K , в котором вместо $B(r, z)$ будет фигурировать $P_a(r, z)$.

³ Здесь проводится сравнение качества фокусировок, реализованных при одной и той же антенне.

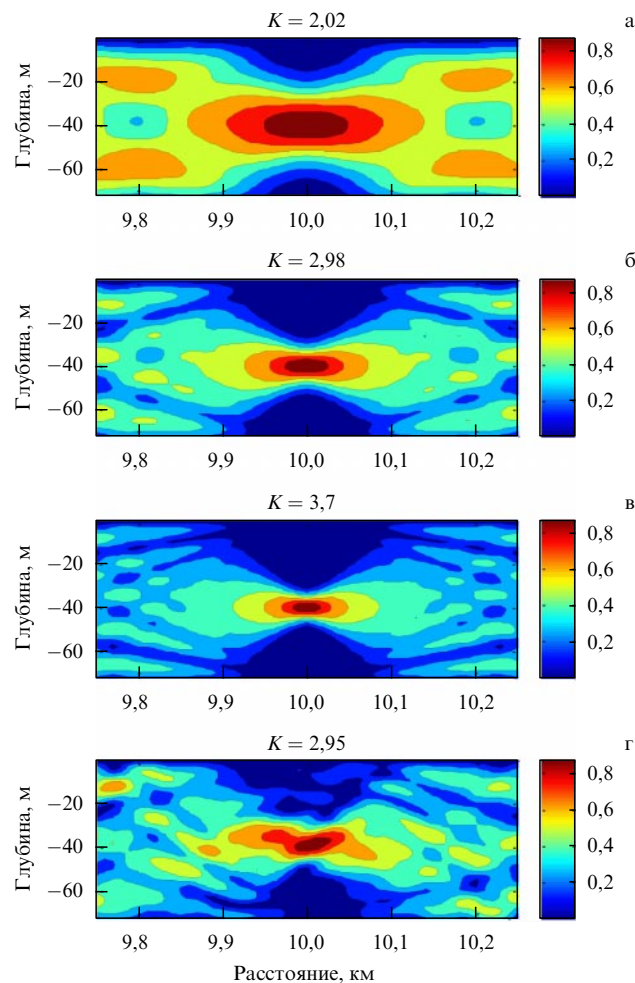


Рис. 4. Фокусировка звукового поля с использованием ОВФ (численное моделирование): (а) $f = 100$ Гц, 24 трансивера; (б) $f = 200$ Гц, 24 трансивера; (в) $f = 300$ Гц, 24 трансивера; (г) $f = 200$ Гц, 5 трансиверов.

сти, результаты расчётов показывают отсутствие какой-либо фокусировки при длине антенны $L \leq 0,2H$ (H — глубина волновода) и в том случае, когда глубина погружения фазового центра антенны значительно отличается от глубины погружения пробного источника. Заметим, что все указанные эффекты обусловлены волноводным распространением звука.

Размеры фокального пятна на плоскости (r, z, φ_0) зависят от расстояния r до фокусирующей системы, однако эта зависимость слаба по сравнению с аналогичной зависимостью для области локализации волнового поля по вертикали в свободном пространстве, обеспечиваемой линейной вертикальной антенной ($D_{\perp} \approx r\lambda/L$). Размеры фокального пятна зависят также от числа M энергонесущих волноводных мод в точке расположения пробного источника звука. Вследствие затухания звука эффективное число мод M уменьшается с увеличением расстояния и размер фокального пятна возрастает. Для волновода, показанного на рис. 1, в таблице приведены размеры фокальных пятен (по уровню 0,7), рассчитанные с помощью формулы (6). Здесь $D_{\perp}$ и $D_{\parallel}$ — вертикальный и горизонтальный размеры фокального пятна соответственно. Частота излучения $f = 200$ Гц.

При фокусировке звуковое поле ведёт себя специфическим образом не только в окрестности ПИ. Фактически

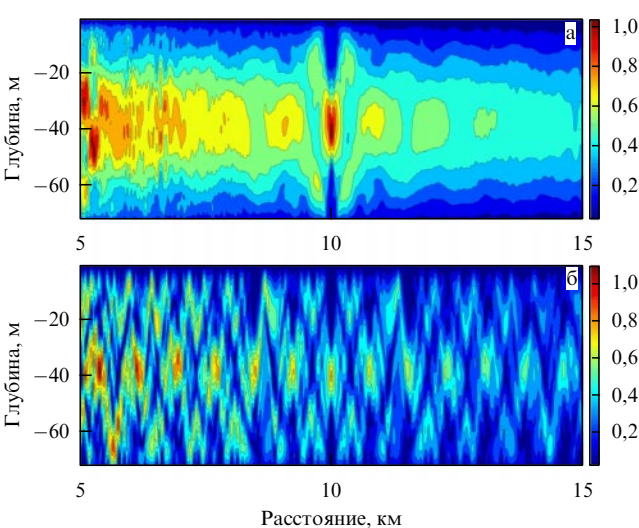


Рис. 5. Интерференционная структура сфокусированного излучения в мелководном волноводе. ПИ на расстоянии 10 км и глубине 40 м. (а) ВОВ с одиночным трансивером в точке $r = 0$ и $z_j = 40$ м. (б) ОВФ с расположенной в начале координат фокусирующей антенной, перегородающей весь волновод.

Таблица

Размер пятна, м	$D_{\perp}$	$D_{\parallel}$
Расстояние r , км		
10	10,3	104
30	18,8	410

фокусировка приводит к перестройке интерференционной картины поля во всём волноводе. Для образующейся при этом интерференционной структуры (в оптике её называют спекл-структурой) характерно образование вторичных фокусных пятен, расположенных как ближе, чем ПИ, к фокусирующей системе, так и дальше. Примеры такой структуры при использовании ВОВ и ОВФ показаны на рис. 5. Как видно из рисунка, эффект появления вторичных фокусных пятен проявляется в наибольшей степени при ОВФ.

В интервале нескольких сотен метров по горизонтали положение фокусного пятна можно изменить, не проводя повторной фокусировки с помощью ПИ. Для этого необходимо лишь на несколько герц изменить частоту излучения фокусирующей антенны без изменения амплитудно-фазового распределения на её апертуре. Заметим, что в этом случае изменяется местоположение не только основного фокусного пятна, но и вторичных фокусных пятен, о которых шла речь выше. Таким образом, появляется возможность сканирования сфокусированным излучением.

С течением времени пространственно-временные возмущения на морском шельфе существенным образом ухудшают первоначальную фокусировку акустического поля. В частности, ветровое поверхностное волнение в зимний период, когда скорость звука в водном слое слабо зависит от глубины (см. рис. 1), не позволяет получить устойчивую фокусировку на расстоянии 10 км даже при умеренной скорости ветра, $V \approx 12$ м с⁻¹ (рис. 6). Однако летом на морском шельфе формируется прогретый верхний слой, приводящий к образованию придон-

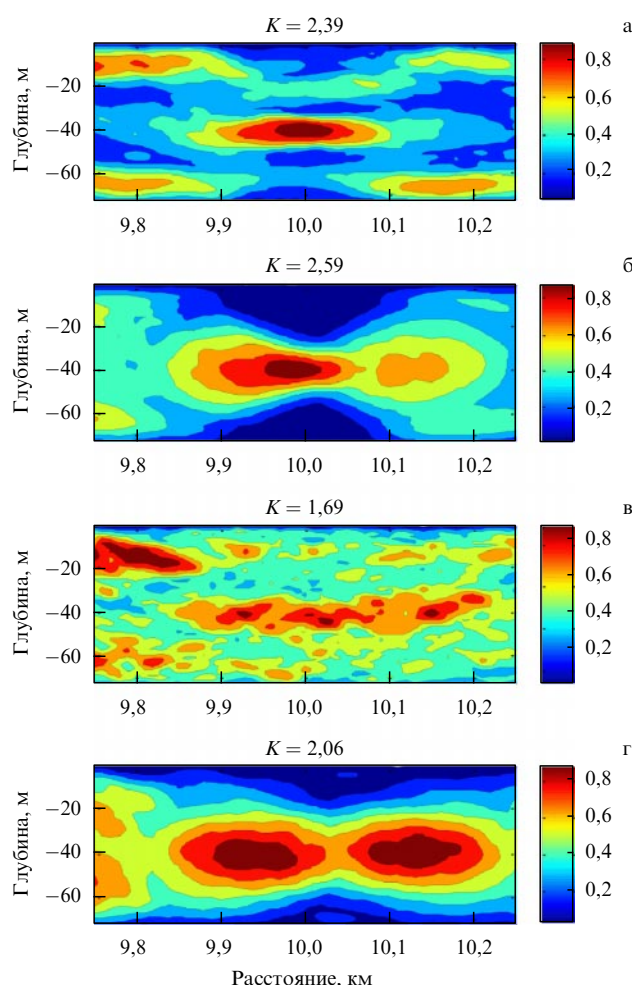


Рис. 6. Фокусировка звука с помощью ВОВ при наличии поверхностного волнения (численное моделирование): (а) $V = 9 \text{ м с}^{-1}$, одиночный трансивер на глубине 9 м; (б) $V = 9 \text{ м с}^{-1}$, фокусирующая вертикальная антенна; (в) $V = 12 \text{ м с}^{-1}$, одиночный трансивер на глубине 9 м; (г) $V = 12 \text{ м с}^{-1}$, фокусирующая вертикальная антенна.

ного звукового канала. Распространяющиеся в таком канале придонные волноводные моды слабо взаимодействуют с морской поверхностью. Численное моделирование показывает, что в этой ситуации устойчивая фокусировка звука возможна на расстоянии в несколько десятков километров при той же скорости ветра, $V \approx 12 \text{ м с}^{-1}$. Для этого с помощью вертикальных антенн необходимо выделить отдельные волноводные моды и использовать для фокусировки звуковое поле с заданным модовым составом.

Фоновые внутренние волны (ВВ), существующие, как правило, в летнее время, также в значительной степени ухудшают качество фокусировки с течением времени. Особенно заметно такое ухудшение в открытых районах океанского шельфа (например, в Атлантическом шельфе США, Тихоокеанском шельфе в районе Камчатки), где интенсивность ВВ достаточно велика. Численные эксперименты с использованием пространственно-временных спектров ВВ, зарегистрированных в этих районах, показали, что уже на расстоянии 20 км фокусное пятно расплывается и "уходит" из места расположения ПИ под действием внутренних волн. Такие изменения в фокусном пятне происходят по истечении времени корреляции поля ВВ, составляющего несколько часов.

4. Заключение

Таким образом, сфокусированное акустическое поле на морском шельфе обладает рядом весьма необычных физических свойств, открывающих широкие возможности для его практического использования. Кратко перечислим сферы возможного применения сфокусированного звука:

- крупномасштабный акустический мониторинг морского шельфа, основанный на измерениях частотных смещений интерференционных максимумов звукового поля (включая максимумы, образующиеся при фокусировке) в частотной области [8];
- дальняя звукоподводная связь, для которой фокусировка не только даёт выигрыш в отношении сигнал/шум в точке приёма, но и является эффективным методом подавления многолучевого приёма [9];
- акустическая томография мелкого моря, в которой за счёт фокусировки оказывается возможным подавить дальнюю реверберацию [10, 11].

Результаты исследований авторов, представленные в настоящем сообщении, получены при поддержке РФФИ (проекты 08-02-00283, 10-02-01019, 11-02-00779).

Список литературы

1. Даргейко М М и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **27** 746 (1984) [Dargeiko M M et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **27** 516 (1984)]
2. Fink M et al. *Rep. Prog. Phys.* **63** 1933 (2000)
3. Зверев В А *Избранные труды* (Н. Новгород: ИПФ РАН, 2004)
4. Kuperman W et al. *J. Acoust. Soc. Am.* **103** 25 (1998)
5. Зверев В А, Коротин П И, Стромков А А *Акуст. журн.* **54** 69 (2008) [Zverev V A, Korotin P I, Stromkov A A *Acoust. Phys.* **54** 58 (2008)]
6. Луньков А А, Петников В Г, Стромков А А *Акуст. журн.* **56** 256 (2010) [Lunkov A A, Petnikov V G, Stromkov A A *Acoust. Phys.* **56** 228 (2010)]
7. Кузькин В М и др. *Акуст. журн.* **52** 74 (2006) [Kuz'kin V M et al. *Acoust. Phys.* **52** 65 (2006)]
8. Кузькин В М, Переселков С А *Акуст. журн.* **53** 833 (2007) [Kuz'kin V M, Pereselkov S A *Acoust. Phys.* **53** 736 (2007)]
9. Edelmann G F et al. *IEEE J. Ocean. Eng.* **27** 602 (2002)
10. Kim S et al. *J. Acoust. Soc. Am.* **115** 1525 (2004)
11. Переселков С А, Петников В Г *Акуст. журн.* **53** 400 (2007) [Pereselkov S A, Petnikov V G *Acoust. Phys.* **53** 348 (2007)]

PACS numbers: **43.20. + g**, **43.30. + m**, 43.60.Pt
DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011111.1222

Маломодовая акустика мелкого моря

А.Г. Лучинин, А.И. Хилько

1. Введение

Освоение ресурсов северного шельфа и мелководных окраинных морей требует создания информационного гидроакустического (ГА) обеспечения, в том числе для решения как задач гидроакустической связи, так и задач подводного наблюдения. Указанные задачи являются традиционными для гидроакустики, однако долгое время они решались в основном для относительно небольших дистанций (1–10 км), при которых

А.Г. Лучинин, А.И. Хилько. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, РФ
E-mail: Luch@hydro.appl.sci-nnov.ru, A.khil@hydro.appl.sci-nnov.ru