

## Раздел I. Радиотехника, связь, гидролокация

УДК 534.23

**Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин, Г.В. Косарев**

### **ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА СВЕРХФОКУСИРОВКИ СЛАБО НАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАБОТУ МОРСКОГО ПРОФИЛОГРАФА**

*Предложена несамосопряженная модельная постановка граничных задач на отражение сферической волны в слоистой среде. На примере волновода Пекериса показано возникновение сходящейся волны отдачи и сопутствующий ей эффект сверхфокусировки поля на оси симметрии в полупространстве. Приведены результаты компьютерного моделирования звукового поля вблизи фокального пятна и экспериментальные результаты по профилированию морского дна, согласующиеся с выводами теории.*

*Волновод Пекериса; точечный источник; волна отдачи; обобщенное решение.*

**B.A. Kasatkin, N.V. Zlobina, S.B. Kasatkin, G.V. Kosarev**

### **INFLUENCE OF SUPERFOCUSING EFFECT OF WEAKLY DIRECTED RADIATION ON SEA PROFILING**

*The not self-conjugated modeling statement of boundary problems on reflection of a spherical wave in the layered medium is offered. On an example of Pekeris waveguide occurrence of a converging wave of feedback and concomitant effect of superfocusing of sound field on axis of symmetry in half-space is shown. Results of computer modeling of sound field near the focal spot and experimental results on sea-bottom profiling corresponding with conclusions of the theory are given.*

*Pekeris waveguide; point source; feedback wave; generalized solution.*

**Введение.** Для профилирования морского дна используются, как правило, низкочастотные слабо направленные акустические излучатели. Улучшение точностных характеристик метода профилирования возможно путем повышения остроты максимума характеристики направленности при использовании нелинейных (параметрических) излучателей, что, однако, приводит к значительному увеличению потребляемой электрической мощности. Новое модельное описание физических процессов в ближней зоне излучателя, связанных с формированием сходящейся волны отдачи на реальной границе раздела вода-морское дно и эффекта сверхфокусировки слабо направленного излучения, дают возможность улучшить работу существующих акустических устройств линейного типа при помощи введения новых способов и алгоритмов обработки информации.

**Две модельные постановки граничной задачи Пекериса.** При нахождении звукового поля ненаправленного точечного источника в слоистой среде, например, в волноводе Пекериса, возможны две принципиально различные модельные постановки – самосопряженная (классическая) и несамосопряженная (обобщенная), впервые представленная в работе [1]. В самосопряженной модельной постановке появляются мнимые источники, распределенные на оси симметрии в полупространстве, которые обеспечивают выполнение условий локальной непрерывности по давлению и нормальной компоненте колебательной скорости (условий  $(p, v_z)$ )

– непрерывности) на импедансной границе раздела. В несамосопряженной постановке условия  $(p, v_z)$  – непрерывности выполняются только в среднем, а на оси симметрии в полупространстве появляется реальная зона фокусировки, играющая роль вторичного распределенного источника. Эти источники, мнимые или вторичные, искажают угловую зависимость коэффициента отражения плоской волны, причем она приобретает частотную зависимость.

В рассматриваемом случае можно назвать две причины, приводящие к несамосопряженности соответствующего оператора. Первая из них достаточно очевидна и связана с излучением через импедансную границу раздела при докритических углах падения. Вторая причина, менее очевидная, связана с возможной взаимной трансформацией сходящихся и расходящихся волн суммарного решения, которые становятся связанными формами волнового движения в системе двух энергетически связанных полупространств. Лучевая трактовка процессов отражения и преломления на границе раздела в классической и обобщенной модельных постановках показана на рис. 1, а, б. Рис. 1, в поясняет процесс фокусировки излучения на оси симметрии в обобщенной модельной постановке. Физическая причина возникновения эффекта фокусировки как раз и связана с трансформацией расходящихся волн сферического источника в сходящуюся волну отдачи на импедансной границе раздела с последующей ее трансформацией в расходящуюся волну при отражении от оси симметрии как от жесткой границы.

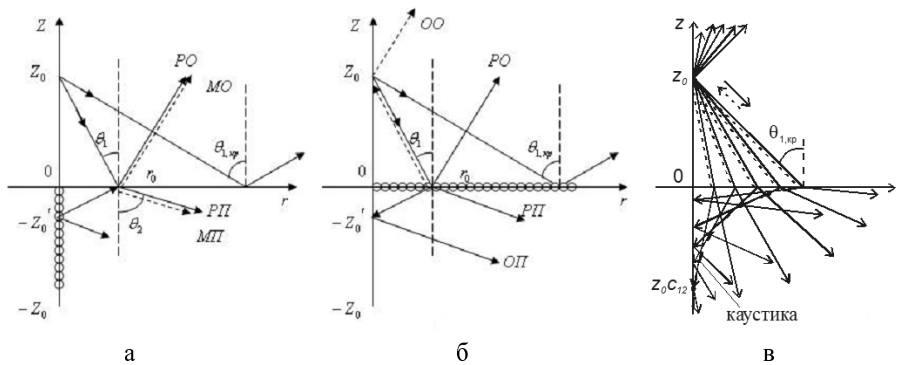


Рис. 1. Лучевая трактовка отражения и преломления сферической волны на импедансной границе раздела: а – классическое решение; б – обобщенное решение; в – фокусировка излучения на оси симметрии в полупространстве. PO, MO, OO, PI, MI, OP – регулярный, мнимый, обобщенный, отраженный и преломленные лучи соответственно,  $c_{12}$  – отношение скоростей звука в воде и морском дне, кружочками обозначены мнимые источники

**Сравнение коэффициентов отражения плоской и сферической волны.** Вследствие различия модельных постановок коэффициент отражения сферической волны для каждой спектральной составляющей в зеркальном направлении отличен от коэффициента отражения плоской волны в том же направлении и в общем случае определяется формулой [1]:

$$V_{сф} = V(1 - \gamma) + \frac{\gamma}{V}, \quad \langle V_{сф} \rangle = \frac{3}{4}V + \frac{1}{4V},$$

где  $V$  – коэффициент отражения плоской волны,  $\gamma$  – весовой коэффициент, определяемый из условия положительной определенности потока мощности через

импедансную границу раздела,  $\langle V_{сф} \rangle$  – его усредненное значение, соответствующее усредненному по спектральному параметру значению  $\gamma = 1/4$ .

Частотная зависимость коэффициента  $\mathcal{V}$  подробно рассмотрена в конкретных ситуациях в работе [2]. Рис. 2 поясняет угловую и частотную зависимость коэффициента отражения сферической волны на границе раздела вода-морское дно осадочного типа.

Как следует из обобщенной теории, коэффициент отражения  $V_{сф} < 1$  в области закритических углов падения и  $V_{сф} > 1$  в области докритических углов падения, а для мягких грунтов осадочного типа это превышение может составлять 10–12 дБ и растет с понижением частоты. ( $V_{сф}^{(нч)} > V_{сф}^{(вч)}$ ). Эти особенности коэффициента отражения прекрасно подтверждаются экспериментальными данными, приведенными в обзорном плане в работе [1], которые не имеют адекватного объяснения в классической теории.

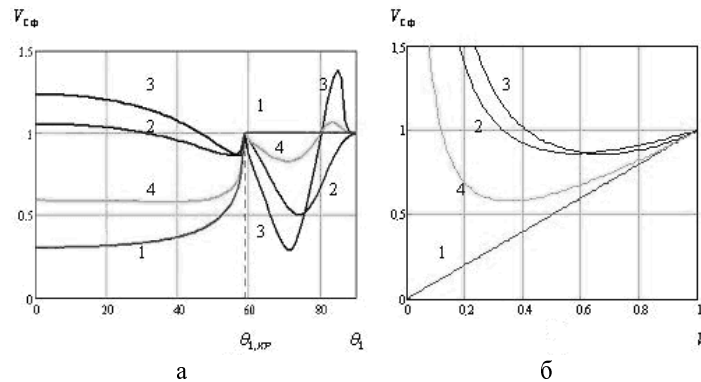


Рис. 2. Угловая зависимость коэффициентов отражения: а – 1 –  $V$ , 2 –  $\langle V_{сф} \rangle$ , 3 –  $V_{сф}^{(нч)}$ , 4 –  $V_{сф}^{(вч)}$ ; соотношение между коэффициентами отражения сферической волны и плоской волны при  $\theta_1 \leq \theta_{1,кр}$ ; б – 1 –  $V_{сф} = V$ , 2 –  $\langle V_{сф} \rangle$ , 3 –  $V_{сф}^{(нч)}$ , 4 –  $V_{сф}^{(вч)}$

На рис. 3 приведены сводные данные [3], полученные в многочисленных экспедициях, по измерению частотной зависимости коэффициента отражения от морского дна осадочного типа при нормальном падении. Увеличение коэффициента отражения при понижении частоты хорошо соответствует выводам обобщенной теории.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные [4] (рис. 4,а), [5] (рис. 4,б) по измерению коэффициента отражения от границы раздела вода-морское дно осадочного типа в глубоком море при малых углах скольжения по двум различным методикам. Существенное уменьшение коэффициента отражения в диапазоне углов скольжения 10–15° также хорошо соответствует обобщенной теории. Экспериментальные данные (см. рис. 4,а) соответствуют приповерхностному расположению низкочастотного излучателя и приемника в глубоком море.

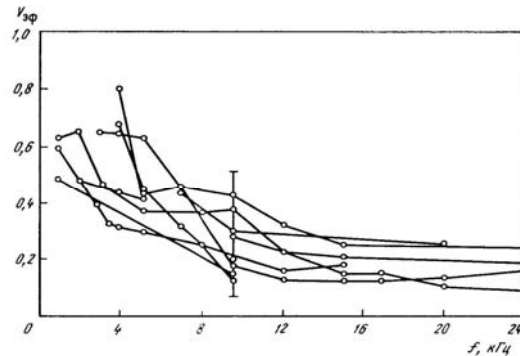


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения от морского дна осадочного типа при нормальном падении в районах абиссальных равнин

Экспериментальные данные (см. рис. 4,б) соответствуют придонному расположению низкочастотного излучателя и приемника, когда сферичность волны выражена сильнее. Оба примера хорошо соответствуют очевидному положению о том, что любая коррекция угловой зависимости коэффициента отражения в области докритических углов падения вызывает соответствующее изменение угловой зависимости в области закритических углов падения, так как коэффициент отражения является аналитической функцией спектрального параметра (угла падения).

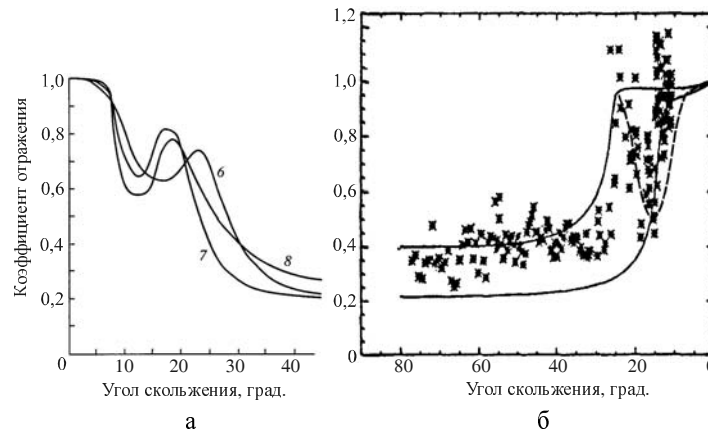


Рис. 4. Экспериментальная зависимость коэффициента отражения от угла скольжения на границе раздела вода-морское дно осадочного типа

**Компьютерное моделирование эффекта фокусировки.** Эффект увеличения отражающей способности границы раздела объясняется эффектом фокусировки ненаправленного излучения на оси симметрии в нижнем полупространстве с образованием вторичного излучателя и, соответственно, вторичного обратного излучения. Если источник ненаправленного излучения находится в волноводе, то на оси симметрии формируются две зоны фокусировки в окрестности горизонтов  $z = 2h \pm z_0$ , где  $h$ ,  $z_0$  – глубина волновода и горизонт излучения соответственно. Эффект формирования фокусированного излучения в волноводе Пекериса поясняется (рис. 5 и рис. 6) для различных горизонтов излучения и значений частотного параметра  $k_1 h = \omega h / c_1$ ,  $z_{01} = z_0 / h$ ,  $z_1 = z / h$ ,  $r_1 = r / h$ .

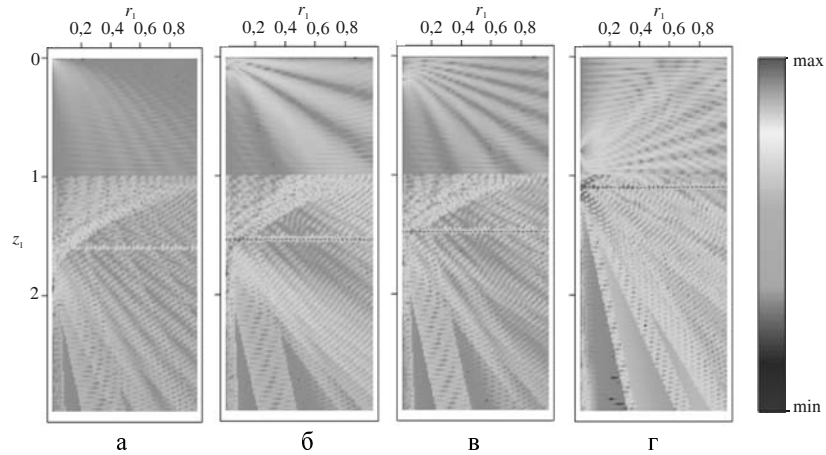


Рис. 5. Структура звукового поля вблизи оси симметрии при различных значениях горизонта излучения,  $k_1 h = 100$ : а –  $z_{01} = 0,001$ ; б –  $z_{01} = 0,1$ ; в –  $z_{01} = 0,2$ ; г –  $z_{01} = 0,8$

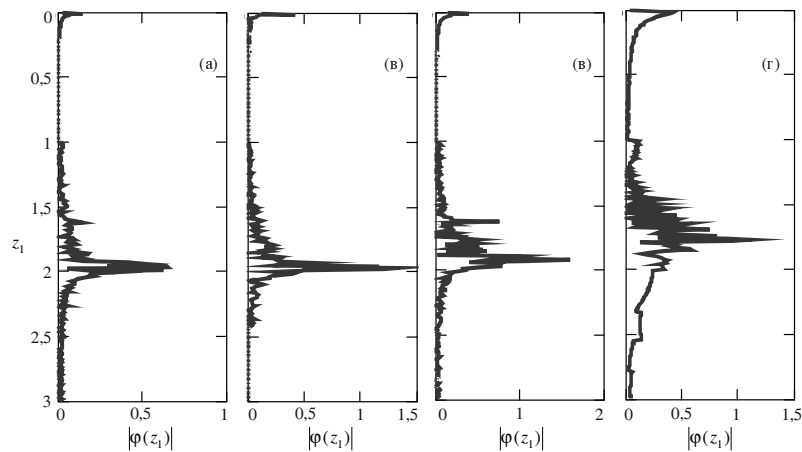


Рис. 6. Вертикальные разрезы звукового поля  $|\varphi(z_1)|$  на оси симметрии при различных значениях частотного параметра;  $z_{01} = 0,001$ : а –  $k_1 h = 50$ ; б –  $k_1 h = 100$ ; в –  $k_1 h = 200$ ; г –  $k_1 h = 400$

Можно отметить, что ширина фокального пятна в зоне фокусировки на уровне  $-3$  дБ имеет порядок длины волны, что и является подтверждением эффекта сверхфокусировки в поле ненаправленного источника. По существу речь идет о формировании своеобразной волны отдачи, которая возникает при возбуждении сферической волной волновых составляющих с иным типом симметрии, т.е. цилиндрических волн.

**Учет эффекта сверхфокусировки при оптимизации работы акустического профилографа.** Эффект сверхфокусировки может иметь вполне реальное применение при профилировании (сейсмопрофилировании) морского дна с повышенной разрешающей способностью на низких частотах, когда обычные способы

формирования направленного излучения оказываются неэффективными. Как отмечалось выше, эффект сверхфокусировки и, соответственно, эффект увеличения отражающей способности границы раздела, проявляются в наибольшей степени для границ раздела с малым коэффициентом отражения плоской волны, например, для илистых грунтов.

На рис. 7 приведены профилограммы морского дна, покрытого слоем глубоководного ила, полученные в районе хребта Ломоносова в Северном Ледовитом океане. Профилограммы получены при расстоянии от антенны профилографа до морского дна 15 м и 30 м. При профилировании морского дна с высоты 15 м зона фокусировки располагается на зеркальном горизонте на глубине 15 м в толще дна. На рис. 7,а хорошо видна подсветка этого горизонта (нижнего горизонта слоистой структуры в диапазоне расстояний  $L = 1000 - 1600$  м), которая увеличивает амплитуду отраженного сигнала в сравнении с сигналами, отраженными от соседних слоев. При увеличении высоты антенны над морским дном до 30 м фокальное пятно смещается на горизонт 30 м в толще дна с соответствующим увеличением амплитуды зондирующего сигнала вблизи этого нового горизонта подсветки.

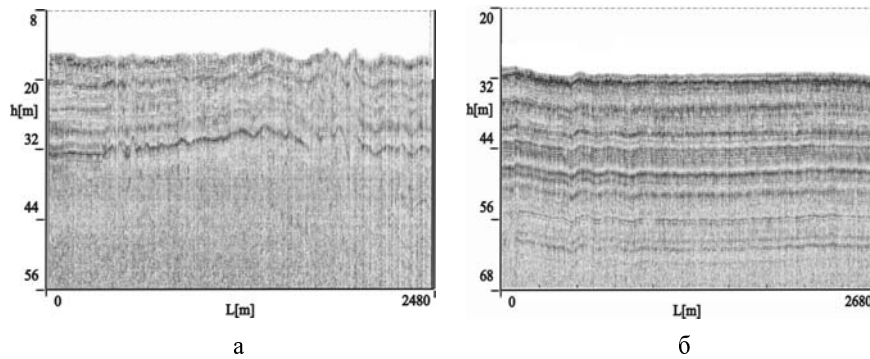


Рис. 7. Профилограммы морского дна, полученные при расстоянии антенны профилографа от морского дна 15 м (а) и 30 м (б) в одном и том же районе профилирования

В этом режиме глубина профилирования уверенно увеличивается до 30 м с заметным увеличением разрешающей способности, несмотря на то, что потери на распространение увеличиваются в сравнении с предыдущим случаем на 25–30 дБ. Отмеченные особенности профилирования морского дна косвенно подтверждают эффект сверхфокусировки. На наш взгляд, именно обратная волна отдачи, распространяющаяся под малыми углами скольжения к слоистой структуре, и сопутствующий ей эффект сверхфокусировки компенсируют дополнительные потери на распространение при увеличении высоты антенны над дном и увеличивают разрешающую способность метода профилирования, которая составляет 0,3–0,4 м в оптимальном случае.

Появление волны отдачи принципиально меняет лучевую трактовку процесса преломления звуковых волн в донном полупространстве, а, следовательно, изменяет алгоритмы оптимальной обработки акустического изображения морского дна на профилограммах типа алгоритмов синтеза апертуры [6]. Лучевая трактовка преломления и отражения звуковых волн от расположенных в морском дне рассеивающих (отражающих) объектов с учетом обратных волн отдачи поясняется (рис. 8).

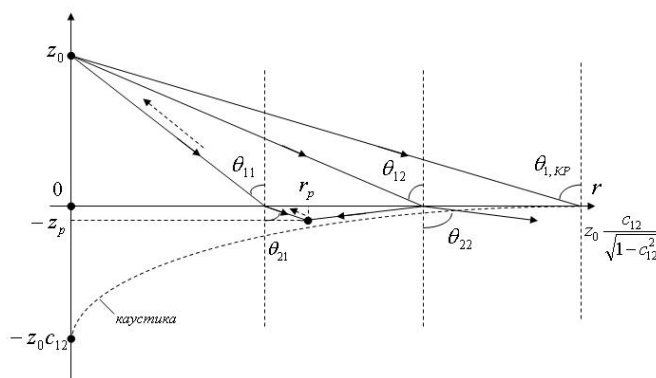


Рис. 8. Лучевая трактовка двойного лучепреломления в донном полупространстве с участием обратной волны отдачи

Двухлучевая схема преломления лучей в донном полупространстве с последующим отражением от рассеивающего (отражающего) объекта, поясняемая (рис. 8), приведет к раздвоению изображения реального объекта. Это раздвоение изображения следует рассматривать как специфическое искажение реальной профилограммы, вызванное наличием обратного отражения в виде волны отдачи. Координаты рассеивающего объекта  $(z_p, r_p)$  связаны с углами падения и преломления соотношениями:

$$r_p = z_0 \operatorname{tg} \theta_{11} + z_p \operatorname{tg} \theta_{21} = \left( \frac{z_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_{11}}} + \frac{z_p}{\sqrt{c_{12}^2 - \sin^2 \theta_{11}}} \right) \sin \theta_{11}, \quad (1)$$

$$z_p = z_0 \operatorname{tg} \theta_{12} - z_p \operatorname{tg} \theta_{22} = \left( \frac{z_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_{12}}} - \frac{z_p}{\sqrt{c_{12}^2 - \sin^2 \theta_{12}}} \right) \sin \theta_{12},$$

которые позволяют выразить углы падения  $\theta_{11}$ ,  $\theta_{12}$  через заданные величины  $(z_p, r_p, z_0)$ . В свою очередь по найденным значениям углов падения можно вычислить временную задержку между лучами, отраженными обратно в сторону антенны профилографа:

$$\Delta t_{12} = t_0 \left[ \frac{\cos \theta_{11} - \cos \theta_{12}}{\cos \theta_{11} \cos \theta_{12}} + c_{12}^2 \frac{\cos \theta_{21} - \cos \theta_{22}}{\cos \theta_{11} \cos \theta_{12}} \frac{\sin(\theta_{12} - \theta_{11})}{\sin \theta_{11} \cos \theta_{22} + \sin \theta_{12} \cos \theta_{21}} \right], \quad (2)$$

$$t_0 = \frac{z_0}{c_1}, \quad c_{12} = \frac{c_1}{c_2},$$

где  $c_1, c_2$  – скорость звука в воде и донном полупространстве.

Можно предположить, что именно каустика играет принципиальную роль при формировании волны отдачи, которая существенно увеличивает коэффициент отражения сферической волны при нормальном падении на низких частотах. Обратное отражение в сторону источника, которое возникает на самой границе раздела, не является синфазным, а соответствующие ему составляющие суммируются

на приёмном гидрофоне при измерении коэффициента отражения только энергетически. Но каустика в рассматриваемом случае также играет роль отражающей границы, для которой луч, с обратным преломлением, является падающим лучом, а луч, с регулярным преломлением по Снелю, является отражённым, причём все отражённые обратно лучи суммируются на приёмнике с минимальным рассогласованием по фазе. С учётом этого понятно, что с понижением частоты эффект рассогласования по фазе будет уменьшаться, а эффективный коэффициент отражения сферической волны при нормальном падении будет увеличиваться именно за счёт синфазного сложения на приёмнике волн отдачи.

**Привлечение волн отдачи для анализа экспериментальных данных.**

Волны отдачи, играющие ключевую роль при формировании фокального пятна в полупространстве, вполне наблюдаемы в акустическом эксперименте. В качестве примера можно указать на работы [7, 8], в которых описаны сходные по методике эксперименты по прохождению звуковых волн через границу раздела вода-морское дно песчаного типа, выполненные в условиях гидроакустического бассейна. В этих экспериментах измерялись импульсные характеристики тракта передачи, содержащего широкополосный ненаправленный излучатель импульсного сигнала, расположенный в воде, и приёмный гидрофон, расположенный в слое песка, уложенного на дно гидроакустического бассейна. При перемещении излучателя на фиксированном горизонте относительно приёмного гидрофона измерялись проходные характеристики, т.е. зависимость амплитуды и времени распространения импульсного акустического сигнала от горизонтального расстояния между излучателем и приёмным гидрофоном.

Пример проходных характеристик приведён на рис. 10, который взят из работы [8]. Длительность излучённого акустического сигнала не превышала периода колебаний на средней частоте спектра сигнала 50 кГц. Это позволило получить достаточно высокое временное разрешение принятых акустических сигналов, приходящих на приёмный гидрофон по различным лучевым траекториям.

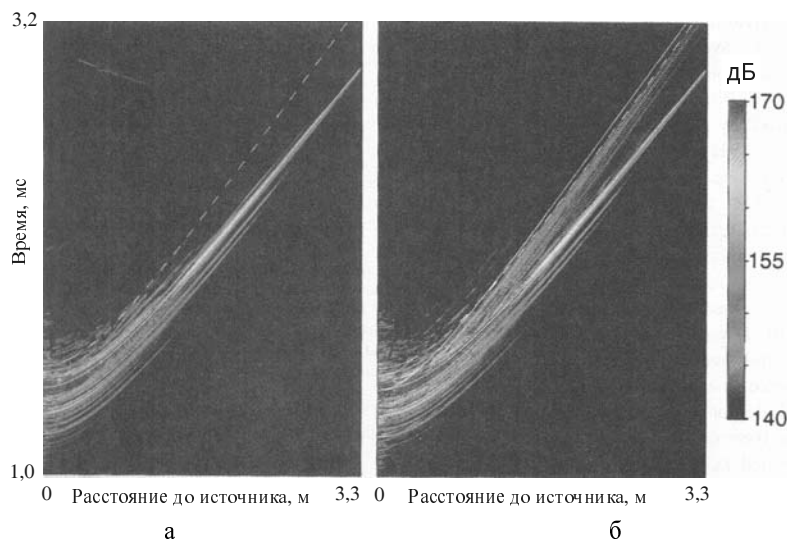


Рис. 10. Проходные характеристики, измеренные при высоте излучателя над дном 0,5 м и глубине приёмного гидрофона 0,45 м: а – при выровненной поверхности дна; б – при взрыхленной поверхности дна



На рисунке хорошо видно, что длительность импульсного отклика превышает длительность самого импульсного сигнала и это превышение максимально в случае, когда приёмный гидрофон находится под излучателем (на оси симметрии системы излучатель – слоистая среда). В этом случае первым приходит на приёмный гидрофон прямой сигнал, распространяющийся по нормали к границе раздела, но его амплитуда меньше максимальной. Затем при увеличении расстояния приходят сигналы (составляющие углового спектра), для которых углы падения изменяются от минимального до критического.

Хорошо видно, как при увеличении расстояния высокоскоростные траектории, соответствующие закону преломления Снеля и принципу Ферма, вымирают и сменяются низкоскоростными траекториями, которые не соответствуют ни закону Снеля, ни принципу Ферма. Соответствующие им лучи могут попасть на приёмный гидрофон только в случае, если они преломляются на границе раздела сходящимися волнами (волнами отдачи) в сторону оси симметрии с последующим отражением от неё, как от абсолютно жёсткой границы. В результате длительность импульсного отклика при расположении гидрофона под излучателем значительно увеличивается по сравнению с длительностью самого импульса. Именно эти волны отдачи формируют на оси симметрии в полупространстве звуковое поле типа стоячей волны, в котором радиальная компонента колебательной скорости обращается в нуль.

По физическому смыслу волны отдачи аналогичны рассеянным в обратном направлении волнам, формирующим донную реверберацию, но существуют и в случае ровной границы, к которому и относится рис. 10,а. На рис. 10,б приведена та же проходная характеристика, но для случая взрыхлённой специальным образом поверхности дна, имитирующей нерегулярную рассеивающую поверхность, для которой высота неровностей соизмерима с длиной волны. Видно, что в этом случае механизм обратного рассеяния несущественно изменяет вид импульсного отклика при малых расстояниях. Это означает, что обратная волна отдачи, возникающая и на ровной границе раздела, является доминирующей в сравнении с реверберационной составляющей, возникающей только при рассеянии на неровной границе. С увеличением расстояния усиливается роль дифракционных составляющих, преломлённых на неровной границе расходящимися волнами (дифракционных спектров), которые соответствуют медленным лучам.

**Заключение.** Эффект сверхфокусировки является результатом суммарного волнового процесса с разнонаправленными фазовой и групповой скоростями, возникающего как следствие несамосопряженной модельной постановки соответствующей граничной задачи. Именно в такой постановке реализуется естественная способность осесимметричных структур к самофокусировке поля на оси симметрии, играющей роль абсолютно жесткой границы, на которой сходящиеся и расходящиеся волны связаны механизмом отражения, в результате которого суммарное поле приобретает характер стоячей волны с нулевым значением радиальной компоненты колебательной скорости.

Увеличения разрешающей способности морского профилографа, принцип работы которого основан на использовании низкочастотного ненаправленного излучения, можно достигнуть разными путями. Один из них – применение параметрических излучателей, позволяющих получить остронаправленное низкочастотное излучение при небольшой апертуре источника накачки. Другим путем может быть учет эффекта сверхфокусировки и введение алгоритмов коррекции, учитывающих влияние волны отдачи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Некорректные задачи и обобщенные волны в акустике слоистых сред. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 407 с.

2. *Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б.* Обобщенные волны Рэлея и Шолте на границах раздела слоистых сред / Ежегодник РАО «Акустика неоднородных сред». Сборник трудов школы-семинара под руководством проф. С.А. Рыбака. – Троицк: Изд-во «Тривант», 2008. – Вып. 9. – С. 146-163.
3. *Воловов В.И.* Отражение звука от дна океана. – М.: Наука, 1993. – 270 с.
4. *Студеничник Н.В.* Исследования коэффициента отражения звука от дна в диапазоне углов полного внутреннего отражения // Акуст. ж. – 2002. – Т. 48, № 4. – С. 539-546.
5. *Heard G.J.* Bottom reflection coefficient measurement and geoacoustic inversion at the continental margin near Vancouver Island with the aid of spiking filters // J. Acoust. Soc. Amer. – 1997. – Vol. 101, № 4. – P. 1953-1960.
6. *Захаров А.И., Каевицер В.И., Разманов В.М., Раскатов В.Н.* Применение методов синтеза апертуры в низкочастотных эхолотах-профилографах / Труды VIII Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2006. – С. 143-147.
7. *Boyle F.A., Chotiros N.P.* Experimental detection of a slow acoustic wave in sediments at shallow grazing angles // J. Acoust. Soc. Amer. – 1992. – Vol. 91, № 5. – P. 2615-2619.
8. *Simpson H.J., Houston B.H.* Synthetic array measurements of acoustical waves propagating into a water-saturated sandy bottom for a smoothed and roughened interface // J. Acoust. Soc. Amer. – 2000. – Vol. 107, № 5. Pt. 1. – P. 2329-2337.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Л.А. Наумов.

**Касаткин Борис Анатольевич**

Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН.

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru.

690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5,а.

Тел.: 84232432578.

Заведующий лабораторией гидроакустических навигационных систем; профессор.

**Злобина Надежда Владимировна**

E-mail: zlobina@marine.febras.ru.

Ученый секретарь.

**Касаткин Сергей Борисович**

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru.

Тел.: 84232432578.

Лаборатория гидроакустических навигационных систем; старший научный сотрудник.

**Косарев Георгий Валерьевич**

E-mail: gor@marine.febras.ru.

Тел.: 84232432578.

Лаборатория гидроакустических навигационных систем; старший научный сотрудник.

**Kasatkin Boris Anatolevich**

Institute of Marine Technology Problems FEB RAS.

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru.

5,а, Sukhanov Street, Vladivostok, 690091, Russia.

Phone: +74232432578.

Head of Laboratory of Hydroacoustic Navigation Systems; Professor.

**Zlobina Nadezhda Vladimirovna**

E-mail: zlobina@marine.febras.ru.

Scientific Secretary.

**Kasatkin Sergey Borisovich**

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru.

Phone: +74232432578.

Laboratory of Hydroacoustic Navigation Systems; Senior Researcher.

**Kosarev Georgy Valeryevich**

E-mail: gor@marine.febras.ru.

Phone: +74232432578.

Laboratory of Hydroacoustic Navigation Systems; Senior Researcher.