

УДК 534.231

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОСАДОЧНЫХ СЛОЕВ МОРСКОГО ДНА МЕЛКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

© 2013 г. А. В. Гринюк*, В. Н. Кравченко*, В. А. Лазарев**, А. И. Малеханов**,
Ю. В. Петухов**, В. И. Романова**, А. И. Хилько**

*ФГУП НИИ "Атолл"

**Институт прикладной физики РАН

603950 Н.Новгород, ул. Ульянова 46

Тел.: 8 (831) 436-84-90; Факс: (831) 436-60-86

E-mail: A.khil@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 03.08.2012 г.

Исследуются возможности реконструкции параметров осадочных слоев мелкого моря по интерференционным паттернам, возникающим при зондировании дна широкополосными сейсмоакустическими источниками при бистатической схеме зондирования морского дна, адаптивном приеме сигналов горизонтальной приемной решеткой и согласованной фильтрации взаимодействующих с морским дном низкочастотных сейсмоакустических импульсов, возбуждаемых пневмопушкой, а также сейсмоакустического шума корабля в мелком море. Путем использования метода статистической проверки гипотез о значениях параметров динамических спектров, полученных с помощью параметрических моделей, осуществляется реконструкция параметров осадочных слоев морского дна. Обсуждаются сравнительные возможности реконструкции параметров морского дна при бистатических и моностатических схемах наблюдения.

Ключевые слова: мелкое море, сейсмоакустические источники, морское дно.

DOI: 10.7868/S0320791913030052

При сейсмоакустическом профилировании морского дна шельфа и окраинных мелководных, в частности арктических, морей, осуществляемом в целях поиска морских месторождений полезных ископаемых, широко используются мощные сейсмоакустические источники взрывного типа, в частности, пневмопушки. Обычно излучаемые такими источниками широкополосные низкочастотные (НЧ) сейсмоакустические (СА) импульсы с хорошим отношением сигнала к шуму регистрируются на больших, вплоть до нескольких сотен километров, дистанциях [1]. Измеренные на таких расстояниях данные могут быть использованы для оценки параметров дна путем сравнения измеренных распределений интенсивностей с расчетными зависимостями при использовании специальных критериев близости таких зависимостей [2–7]. При распространении в условиях мелкого моря такие импульсы расплываются из-за частотнозависимого затухания и влияния внутри- и межмодовой дисперсии, которые определяются, прежде всего, строением дна [8–12]. Импульсы, деформированные при распространении в мелком море, содержат информацию, которая может быть использована для реконструкции

строения дна. Эффективность реконструкции в существенной мере зависит от априорной информации о строении дна, а также от степени достоверности получаемых данных. Повышение эффективности СА зондирования дна в случае, когда источник и приемная система расположены на достаточно большом расстоянии (бистатическая схема), может быть достигнуто при адаптивном выборе направленности приемной системы и частотного спектра зондирующих импульсов. Синтез таких оптимальных СА сигналов может быть осуществлен, исходя из анализа особенностей распространения НЧ СА импульсов в мелком море [4, 6, 7].

Использование сейсмоакустических импульсов взрывных источников не является единственным возможным при решении задачи зондирования морского дна с использованием бистатической схемы. В работах [2, 5] рассматривалась и возможность реконструкции параметров донных слоев посредством приема излучения движущегося корабля при помощи автономной донной сейсмоакустической станции. Аналогичный подход, но при приеме шума буксируемой решеткой, рассматривался в [6]. Преимуществом использова-

ния такого рода методов является то, что нет необходимости использовать специальные излучатели. Определение параметров донных структур при использовании корабельного шума делает реконструкцию более простой и дешевой. Однако шумовые источники указанного типа имеют относительно малые мощности и когерентность, что снижает точность и чувствительность реконструкции. В этой ситуации существенную роль могло бы сыграть накопление полезных сигналов, что привело бы к повышению точности при измерении параметров сигналов. Поскольку источник шумов (корабль) перемещается, шумовые сигналы являются нестационарными. При их накоплении необходимо это учитывать, что усложняет методы обработки СА сигналов.

Кроме упомянутых выше бистатистических схем сейсмоакустического зондирования морского дна, когда источник и приемная система расположены на достаточно большом расстоянии друг от друга (бистатистическая схема лоцирования), используют также и моностатистические схемы, при которых источник и приемная система располагаются практически в одной точке [1, 2, 6, 13, 14]. При этом используются источники взрывного типа (спаркеры, пневмопушки). Следует отметить, что при использовании таких источников для реконструкции донных слоев, возникает проблема, связанная с недостаточным уровнем полезных сигналов, в частности, формируемых донными неоднородностями, расположенными на глубинах 500–100 м. При этом повышение мощности источников ограничивается экологическими требованиями, а для спаркеров и техническими возможностями.

Перспективным методом сейсмоакустического зондирования морского дна является подход, основанный на использовании в качестве источников когерентных излучателей, возбуждающих сложномодулированные импульсы [14–18]. Использование когерентных НЧ СА излучателей позволяет повысить точность и чувствительность при реконструкции параметров донных слоев за счет согласованного сжатия импульсов и межимпульсного накопления [16–18].

В настоящей работе более детально исследуются возможности и особенности реконструкции параметров донных слоев при экспериментальных измерениях, осуществленных по бистатистической схеме наблюдения, в случае, когда прием импульсных и шумовых сигналов осуществлялся при помощи горизонтальной антенны, расположенной на дне.

Реконструкция параметров донных подстилающих слоев может быть осуществлена с большей эффективностью в случае, когда при приеме возбуждаемых пневмопушкой в мелком море СА импульсов используются согласованная фильтрация и адаптивные методы приема. Рассмотрим эф-

фективность таких методов с использованием экспериментальных данных, полученных при регистрации сигналов горизонтальной решеткой из 60 расположенных вблизи дна на расстоянии двадцати метров друг от друга гидрофонов в мелком море глубиной 300 м [19]. Результирующий отклик приемной решеткой формировался путем ее фазирования на источник. Такое согласованное пространственное накопление СА импульсов позволило существенно, на 10–12 дБ, повысить отношение сигнала к шуму, что привело к повышению достоверности при оценке параметров дна, в частности, позволило измерить параметры, малые по уровню, взаимодействующие с дном волновые структуры, что без использования протяженной решетки невозможно было бы сделать. Для решения обратной задачи по реконструкции акустических характеристик дна в рассматриваемом эксперименте использовался алгоритм статистической проверки гипотез. В качестве решения о значении параметров дна принималась оценка, соответствующая глобальному экстремуму невязки между измеряемыми данными и формируемыми с использованием априорной информации гипотезами в виде модели структуры наблюдаемых СА импульсов [20–22]. Для удовлетворения требований по достоверности решений осуществлялась основанная на априорной информации регуляризация, при которой в гипотезы формировались с учетом только волновых компонент с высоким отношением сигнала к шуму, что обеспечивалось при обработке экспериментальных данных соответствующей пространственной частотной и временной согласованной фильтрацией СА поля [24–27]. При реконструкции использовались адаптивно настраиваемые решающие правила и пороги, формируемые на основе априорного построения статистических моделей измеряемых сигналов, шумов и помех [21–23]. Предварительная обработка экспериментальных данных заключалась в фильтрации помех и построении динамического спектра $\Omega(t, \omega)$ измеряемых данных ($\omega = 2\pi f$, где f – частота). Это позволило регуляризовать данные эксперимента, отбрасывая недостоверные данные, что возможно на основе использования априорной информации о структуре излучаемых импульсов и строении гидроакустического (ГА) волновода. При этом оптимальные временные апертуры Δt при текущих спектральных преобразованиях выбирались таким образом, чтобы обеспечивалось разрешение модовых структур. На следующем этапе обработки выполнялось сравнение координат модовых максимумов $q_n = \{t_n, \omega_n\}$ с координатами тех же максимумов $q_n^p = \{t_n^p, \omega_n^p\}$, полученных при расчетах динамических спектров $\Omega^p(t, \omega)$, выполненных для модельного волновода с параметрами p_i (i – число параметров, описывающих мо-

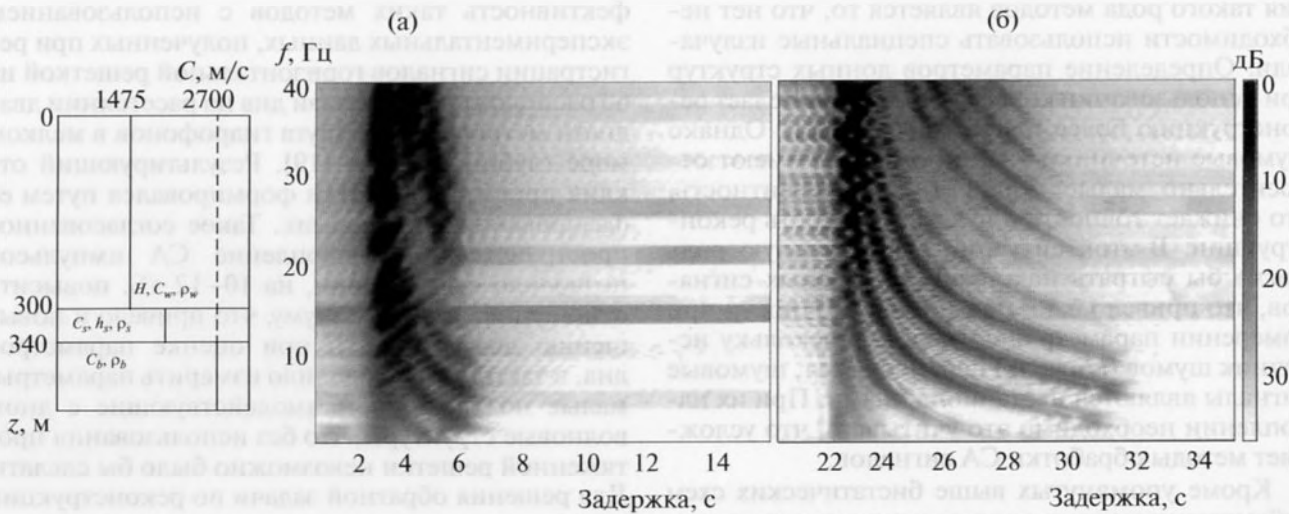


Рис. 1. Характеристики мелководного волновода в районе проведения измерений (а) и частотно-временные распределения интенсивности акустического излучения пневматического источника (б) на расстояниях от приемников 14.0 км (слева) и 44.4 км (справа).

дельный волновод). В качестве решения при оценке значений истинных параметров волновода p_i^0 принимались те значения, которые удовлетворяли статистическому критерию максимального правдоподобия [21–23]. В качестве решающей статистики использовалась в общем случае L_p – норма, которая пригодна и при принятии решений в случае произвольной статистики сигналов и помех, что предполагает правильный выбор параметра p . Алгоритм решения задачи в конкретном случае сводился к поиску экстремума, согласованной с шумами с нормальной статистикой квадратичной невязки $\delta(\mathbf{p}) \equiv \|\mathbf{q} - \mathbf{q}^{(p)}\|^2 \rightarrow \text{extr}$, $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}_0$

где векторы \mathbf{p} и \mathbf{q} определяют соответственно совокупность параметров волновода и набор координат модовых откликов в плоскости $\Omega(t, \omega)$. Формирование и перебор гипотез при поиске решения оптимизировался с использованием априорной информации о строении гидроакустического волновода в условиях эксперимента. Измерения сейсмоакустических импульсов осуществлялись в мелком море с типичной гидрологией, наблюдаемой в начале лета, когда слой воды можно приближенно считать изоскоростным. С учетом анализа расчетов и наблюдаемых экспериментальных данных, при проведении рассматриваемых экспериментов адекватной моделью волновода в районе наблюдений является модель изоскоростного волновода с жидким слоем осадков [24–27]. Исходя из данных о строении осадочного слоя в районах проведения измерений, а также из измерений скорости звука в морской среде, в качестве исходной модели в настоящем исследовании примем трехслойную среду с изоскоростным слоем жидкости, толщиной H , и слоем осадков тол-

щиной h . В качестве исходных параметров волновода примем их значения в интервале, показанном на рис. 1а. Для повышения эффективности поиска решения важно осуществить выбор начальных значений гипотез вблизи истинных значений, где статистика решающих значений будет приближаться к нормальному распределению, пороги будут относительно низкими, а оцениваемые значения невязок будут более достоверными. Для такого выбора исследуем особенности структуры динамического спектра импульсов, а также влияния на нее оцениваемых параметров морского дна.

Динамические спектры измеренных на различных расстояниях в эксперименте СА импульсов, полученные при полосовой фильтрации с шагом 0.1 Гц при полосе фильтра 1 Гц и фазировании приемной решетки на источник, усреднении по 60-ти приемникам и нормировке на максимум, приведены в логарифмическом масштабе на рис. 1б. Как видно из полученных распределений, в диапазоне частот от 5 до 20 Гц структура модовых компонент на различных дистанциях практически не изменяется. Увеличивается из-за влияния внутримодовой дисперсии лишь протяженность модовых максимумов в плоскости $\{t, \omega\}$. На частотах выше 20 Гц при малых (до 15 км) дистанциях отдельные моды плохо разрешаются. На расстояниях выше 30 км уже разрешаются все моды вплоть до восьмой. Обращает на себя внимание слабая интенсивность седьмой и особенно восьмой мод на всех дистанциях. Как показывает анализ моделей волновода, указанное поведение динамического спектра можно объяснить лишь в предположении, что в пределах точности измерений исследуемый волновод на рас-

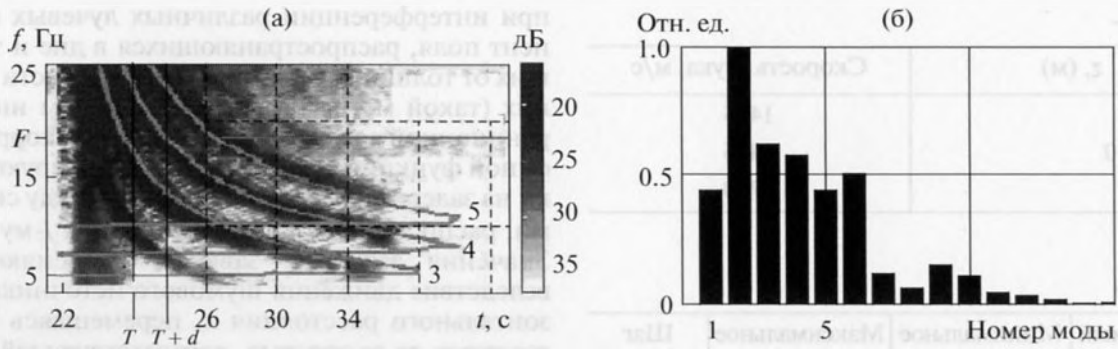


Рис. 2. Коэффициенты возбуждения в зависимости от номера моды на частоте 20 Гц (а) и совмещение результатов измерения и расчета дисперсии нормальных волн с номерами 3, 4, 5 в волноводе сравнения (б).

смотренных дистанциях можно считать близким к изоскоростному волноводу, что соответствует, как уже указывалось, реальным условиям при измерениях, наблюдаемым в начале лета. На рис. 2а показан увеличенный фрагмент одного из распределений (рис. 1б). По этому фрагменту были определены необходимые для выбора оптимальных гипотез значения критических частот мод (см. табл. 1) и значения групповых скоростей на различных частотах. Задержка между третьей и четвертой модами на частоте $f = 20$ Гц составила 1.2 с. Анализ структуры СА сигналов показывает, что при $H = 300$ м такая задержка может соответствовать скорости звука в дне $C_b = 2700$ м/с и скорости звука в водном слое $C_w = 1475$ м/с. Полученные оценки совпадают с результатами измерений скорости звука в слое жидкости, осуществленными с борта НИС. Как видно из анализа экспериментальных данных (рис. 2а), при расположении источника и приемников соответственно на глубине $z_s = 50$ и $z_r = 300$ м (вблизи дна), мода с номером $l = 8$ на частоте 20 Гц имеет малый коэффициент возбуждения. Учитывая это обстоятельство, будем выбирать параметры модельного волновода так, чтобы моды с номерами $l = 7, 8$ были ослаблены вследствие расположения либо источника, либо приемника, либо и того, и другого в “узлах” этих мод. Кроме этого учтем, что запаздывание на заданной частоте (см. рис. 2а) для моды с номером l относительно моды с номером $l - 1$ должно составлять величину d , также соответствующую эксперименту. При этих условиях при генерации гипотез будем варьировать значения толщины слоев, из которых составлен волновод, скорости звука в слоях и коэффициенты поглощения в них в волноводе, принимая в качестве исходных параметры волновода, приведенные на рис. 1а. Для такого волновода на глубинах источника и приемника эффективно возбуждаются моды с номерами $1 < l < 10$ (см. рис. 2б), причем мода с $l = 8$ заметно ослаблена, что соответствует данным эксперимента. Используем далее оценку средней скоро-

сти в верхнем слое дна в приближении модели волновода Пекериса [8]:

$$C_b = C_w \{1 - [C_w(l + 0.5)(2Hf_l)^{-1}]^2\}^{-1/2}, \quad (1)$$

где H – эффективная (средняя по трассе распространения) толщина водного слоя, а критическая частота моды с номером l определяется следующим выражением:

$$f_l = C_w(l + 0.5)[2H\sqrt{1 - n^2}]^{-1}, \quad (2)$$

где показатель преломления n на границе вода–осадки ($n = C_w/C_b$). Рассчитанные по формуле (2) значения критических частот оказались в среднем на 25% ниже измеренных (табл. 1). При следующей итерации при поиске решения, в соответствии с (2), в первую очередь уменьшим толщину водного слоя (такое изменение составляло 25.5%). Наилучшее с точки зрения совпадения с экспериментом распределение скорости звука по глубине для модельного волновода приведено в табл. 2. На рис. 2б (светлые линии) приведены зависимости расположения максимумов модовых импульсов в плоскости $\{t, \omega\}$ для мод с номерами 4–6, которые рассчитывались с использованием выражения с использованием их групповых скоростей в модельном волноводе при найденных значениях скорости звука в слое жидкости:

$$V_l = k_l \left(\rho_w \int_0^H |U_l(z)|^2 dz + \rho_b \int_H^\infty |U_l(z)|^2 dz \right) \times \left\{ \omega \left[\rho_w \int_0^H \frac{|U_l(z)|^2}{C_w^2(z)} dz + \frac{\rho_b}{C_b^2} \int_H^\infty |U_l(z)|^2 dz \right]^{-1} \right\}, \quad (3)$$

Таблица 1.

Номер моды	4	5	6
Эксперимент – f_l , Гц	7.2	10.6	14.0
Расчет – f_l , Гц	6	8	10

Таблица 2.

z , (м)	Скорость звука, м/с
$z = 0$	1475
$z = h = 330$	1475
$z > h$	2700

Таблица 3.

Измеряемый параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг итераций
H , м	300	400	5
C_w , м/с	1455	1480	1
C_b , м/с	2600	2800	10

где k_l – собственное значение, а U_l – собственная функция волновода, z – вертикальная координата (глубина), ρ_w , ρ_b – плотности воды и донного осадочного слоя соответственно, $C_w(z)$ – вертикальный профиль скорости звука в воде [25]. Последующей серией итераций с изменением параметров модельного волновода были оценены значения параметров волновода (табл. 3), соответствующие глобальному экстремуму невязки $\delta(\mathbf{p})$ рассчитанных и измеренных значений положений модовых максимумов динамического спектра (рис. 2а). Как показали оценки и расчеты, в рамках используемых моделей в качестве оценок параметров волновода можно взять следующие их значения:

$H^* = 350$ м; $C_b^* = 2700$ м/с и $C_w^* = 1455$ м/с, при глубинах приемника $Z_r = 300$ м и источника $Z_s = 50$ м, которые соответствуют оценкам коэффициентов возбуждения мод (рис. 2б). Заметим, что в условиях экспериментов, при которых получены показанные на рис. 1б динамические спектры, наименьшим возбуждением характеризуется седьмая мода. В реконструированном волноводе такими характеристиками обладает восьмая мода. Указанное различие может объясняться ошибкой при оценке значения глубины источника.

Как уже указывалось, реконструкцию параметров дна можно осуществить и с использованием широкополосного шума, генерируемого кораблем [2–5]. Излучаемое таким источником ГА поле при наблюдении в относительно узких частотных областях можно рассматривать как частично когерентное поле. Формирующаяся при распространении в ГА волноводе интерференционная структура такого поля содержит информацию о характеристиках морского дна. Методика реконструкции информации о строении дна при таком зондировании основывается на оценке временной модуляции функции автокорреляции широкополосного шума корабля, возникающей

при интерференции различных лучевых компонент поля, распространяющихся в дне и зависящих от толщины донных слоев и скорости звука в них (такой метод называется методом интерференционной томографии [20]). В автокорреляционной функции такого сигнала формируются пики на задержках $\Delta_{ij}(x) = t_i(x) - t_j(x)$ между сигналами, распространяющимися по i -му и j -му лучам. Значения задержек зависят от меняющегося вследствие движения шумового источника горизонтального расстояния x , перемещаясь по оси задержек со скоростью, соответствующей значениям производных от задержек по горизонтальной координате $\Delta'_{ij}(x) = \partial[\Delta_{ij}(x)]/\partial x$. В рамках рассматриваемой в настоящей работе упрощенной модели, значения задержек $\Delta_{ij}(x)$ и их производных $\Delta'_{ij}(x)$ связаны простыми соотношениями с параметрами движения источника и параметрами донного слоя. Это позволяет по результатам измерений таких величин оценить среднюю скорость звука в слое и его толщину.

Проанализируем возможности такого интерференционного метода с использованием данных, измеренных в натуральных экспериментах, которые осуществлялись в том же районе мелкого моря. В экспериментах шумы корабля измерялись с помощью приемной решетки длиной 460 м, включающей в себя 23 гидрофона, сигналы от которых, как и в предыдущем случае, фазировались на источник. Как показывают результаты измерений, по мере движения корабля уровень шума в полосе анализа (от 5 до 50 Гц) превышал шумы моря более чем на 10 дБ на временном интервале более двух минут (рис. 3). В спектре шума наблюдались интенсивные дискретные компоненты на частотах 42, 20 и 30 Гц на протяжении всей анализируемой записи. Осцилляции на каждой частоте имели квазипериодический характер. Поскольку изменение дистанции до источника со временем было достаточно равномерно, осцилляции уровней дискретных компонент обуславливались в основном биениями волновых компонент, отраженных от дна и границы слоя осадков. При более точном определении частот дискретных линий в спектре корабельного шума (за счет накопления по всей реализации длиной 20 мин) и периодов осцилляций акустического поля (при накоплении сигнала в интервале 60 с) было установлено, что период биений спектральных компонент уменьшался с увеличением частоты излучения. Для построения модели формирования модуляционных компонент, отраженных от дна и слоя осадков в ГА волноводе в районе измерений, рассмотрим в качестве границ донную поверхность и нижнюю границу донных осадков. В условиях эксперимента источник и точка наблюдения располагались вблизи поверхности мелкого моря ($z_s = z_r = H$). При этом зависимо-

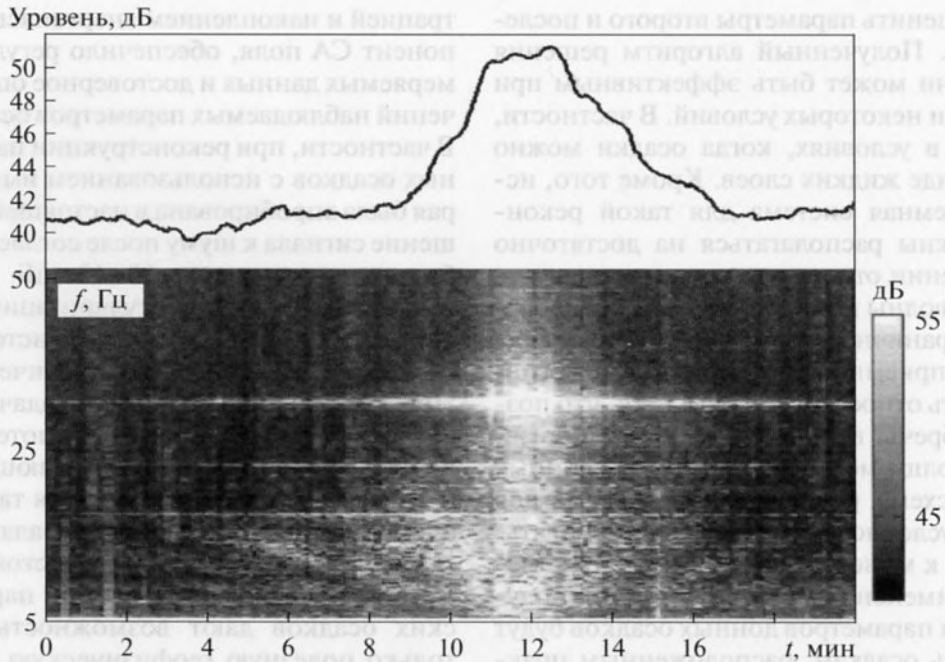


Рис. 3. Проходная характеристика (а) и текущий спектр мощности (интерференционная картина) корабельного шума (б).

сти задержек $\Delta_{12}(x)$ между компонентой, отраженной от донной поверхности (траектория 1), и волновой компонентой, отраженной от нижней границы слоя осадков (траектория 2), и производной $\Delta'_{12}(x)$ от параметров осадочного слоя определяются выражениями:

$$\Delta_{12}(x) = \frac{2H}{C_w \sin \alpha} + \frac{2h_1}{C_1 \sin \alpha_1} - \frac{\sqrt{x^2 + 4H^2}}{C_w}, \quad (4)$$

$$x = \frac{2H}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{2h_1}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad (5)$$

$$\frac{C_w}{C_1} = \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_1}. \quad (6)$$

В (4)–(6) в верхнем слое осадков толщиной $h_s = h_1$ скорость звука $C_s = C_1$. Углы падения α и преломления α_1 отсчитываются от нормали к границам и определяются положением источника и приемного элемента, а также скоростью звука в слое осадков. Скорость изменения задержки между сигналами, идущими по траекториям 1 и 2, определяются выражением

$$\frac{\partial \Delta_{12}}{\partial x} = \frac{\cos \alpha}{C_w} - \frac{x}{C_w \sqrt{x^2 + 4H^2}}. \quad (7)$$

Полагая параметры водного слоя известными, разрешая систему (4)–(7) относительно C_1 и h_1 , получим алгоритм оценки параметров слоя осадков:

$$\begin{cases} C_1(x) = C_w (x/\cos \alpha - b(x, \alpha))^{1/2} \times \\ \times (\Delta_{12}(x)C_w - b(x, \alpha) + a(x, H))^{-1/2}, \\ h_1(x) = 0.5(\Delta_{12}(x)C_w - x \cos \alpha + a(x, H) - b(x, \alpha))^{1/2} \times \\ + (x/\cos \alpha b(x, \alpha))^{1/2}, \\ \cos \alpha = C_w \frac{\partial \Delta_{12}}{\partial x} - \frac{x}{a(x, H)}, \\ a(x, H) = \sqrt{x^2 + 4H^2}, \\ b(x, \alpha) = 2H/\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}. \end{cases} \quad (8)$$

Используя результаты измерений (рис. 3) для интенсивных спектральных компонент, для реконструкции параметров слоя осадков были оценены значения необходимых величин $\Delta^* = 0.7$ с, $(\partial \Delta / \partial x)^* = 3 \times 10^{-4}$ с/м и $(\cos \alpha)^* = 0.7$. В этом случае, из (8), для скорости звука в слое осадков получим оценку $C_1^* = 2720$ м/с при $h_1^* = 30$ м. Эти оценки близки значениям, полученным при использовании импульсного источника. Отметим, что оценка параметров донных осадков при использовании интерференционного метода с шумовым источником становится возможной лишь при использовании антенны, которая обеспечивает достижение необходимого отношения сигнала к помехе. После нахождения параметров первого слоя, аналогичным образом, учитывая результаты реконструкции первого осадочного

слоя, можно оценить параметры второго и последующих слоев. Полученный алгоритм решения обратной задачи может быть эффективным при удовлетворении некоторых условий. В частности, он применим в условиях, когда осадки можно описывать в виде жидких слоев. Кроме того, источник и приемная система для такой реконструкции должны располагаться на достаточно большом удалении от дна, что позволяет считать зондирующие волны квазиплоскими и пренебрегать вкладом граничных волн. Расстояния между источником и приемной системой по горизонтали должны быть относительно невелики, что позволяет пренебречь волноводными эффектами, как в водной толще мелкого моря, так и в донных слоях. Такая схема реконструкции параметров морского дна условно может классифицироваться как близкая к моностатической. С учетом требуемой для применения метода геометрии, полученные оценки параметров донных осадков будут соответствовать осадкам, расположенным практически под источником и приемником, то есть будут по горизонтали соответствовать положению зондирующей системы. По мере удаления приемной системы от источника при формировании сейсмоакустических полей все в большей степени проявляются волноводные эффекты. В этих условиях интерференционный метод также можно использовать, однако необходимо использовать модовое описание и измерять интерференционные компоненты, соответствующие различным модам волновода. Необходимо отметить, что при измерении сигналов антенной интерференционная структура может подавляться, особенно в области малых длин волн. Указанные эффекты наблюдались и при анализе используемых выше экспериментальных данных. В частности, в проходной характеристике шумоизлучения корабля, измеренной антенной, отношение сигнала к шуму повысилось лишь 6 дБ вместо ожидаемых 13 дБ. Это можно объяснить природой помехи, которая формируется, в основном, шумами дальнего судоходства, имеющей, во многих случаях, пространственные интервалы когерентности, сравнимые с размерами антенны. Пространственное усреднение по апертуре антенны привело к ослаблению интерференционной модуляции, в частности, в области частот 30–45 Гц (рис. 3).

Особенностями экспериментов, данные которых использовались при реконструкции донных характеристик, заключались в том, что измерения СА сигналов осуществлялись с помощью многоэлементной горизонтальной решетки. Именно это, наряду с адаптивной согласованной со структурой сигналов пространственно-частотной филь-

трацией и накоплением энергонасыщенных компонент СА поля, обеспечило регуляризацию измеряемых данных и достоверное оценивание значений наблюдаемых параметров осадочного слоя. В частности, при реконструкции параметров донных осадков с использованием импульсов, которая была апробирована в настоящей работе, отношение сигнала к шуму после согласованной обработки выросло на 10–12 дБ. Однако для выполнения такой регуляризации необходима априорная информация как об источнике, так и о ГА волноводе в виде параметрических моделей. При этом решение обратной задачи заключается в статистической проверке гипотез о значениях наблюдаемых параметров. Решающие статистики и критерии должны выбираться также исходя их априорной информации о сигналах и шумах. Заметим, что рассмотренные в настоящем исследовании способы реконструкции параметров морских осадков дают возможность получать не только полезную геофизическую информацию, необходимую при уточнении эмпирических моделей мелкого моря, но и позволяют осуществлять адаптацию зондирующих сигналов при реализации схем активной ГА локации [15, 16].

Приемлемое разрешение модовых дисперсионных кривых при использовании импульсов взрывного типа может быть получено лишь на больших дистанциях между источником и приемником [24, 25]. Однако в этом случае на принятый сигнал заметно влияет только верхний осадочный слой, то есть информация о структуре морского дна ограничивается лишь данными об осадочных слоях, расположенных на относительно небольших глубинах. Кроме того, характеристики морского дна будут усредненными вдоль акустической трассы между источником и приемной системой. Такая информация может учитываться при формировании согласованных со средой сигналов при фиксированных положениях источника и приемника [20–23]. Ее можно использовать и при приблизительном районировании морских осадков, выполняемом в интересах поиска полезных ископаемых, а также для решения инженерных задач [1, 14, 15]. Эффективность использования интерференционных явлений в возбуждаемых кораблем шумовых, частично-когерентных сигналах для реконструкции параметров морского дна на меньших дистанциях между источником и приемной системой, где более существенно проявляются компоненты СА поля, имеющие большие глубины проникновения звука в грунт, невелика. Причиной этого является ограниченность интервалов когерентного накопления, а также относительно низкая интенсивность зон-

дирующих сигналов. Преодоление указанных трудностей СА зондирования морского дна может заключаться в использовании широкополосных когерентных СА излучателей. Как показали измерения в мелком море с помощью относительно маломощного СА излучателя, буксируемого вместе с горизонтальной приемной решеткой (использовалась моностатическая схема наблюдения), реконструкция структуры морского дна оказалась возможной вплоть до глубин 1000–1500 м. Это было обеспечено эффективным когерентным согласованным со средой пространственным, частотным и временным накоплением отраженных от дна СА импульсов [16–18]. Однако для практической реализации когерентного СА зондирования морского дна необходимо разработать и создать эффективный, приспособленный для буксировки в подводном положении, широкополосный СА излучатель, что является непростой технической проблемой.

Работа выполнена при поддержке Программы ОФН РАН “Фундаментальные проблемы когерентной и нелинейной сейсмоакустики шельфовой зоны океана”, РФФИ (проект № 12-02-00543), ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (Контракт № 02.740.11.0565) и Гранта государственной поддержки ведущих научных школ НШ-3700.2010.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерклин Л.Р. Основные технологические тенденции в морской сейсморазведке // Докл. IX школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XII сессией РАО. М.: ГЕОС, 2002. С. 351.
2. Веденев А.И., Гончаров В.В., Курьянов Б.Ф. Оценка акустических параметров морского дна по интерференции широкополосного звука // Акустические волны в океане / Под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой. М.: Наука, 1987. С. 162–173.
3. Yang, C., Yates T. Geo-acoustic inversion of bottom reflection coefficients and sound speed profiles in shallow water // IEEE J. Ocean. Eng. 1996. V. 21. P. 367–376.
4. Siderius M., Nielsen P.L., Gerstoft P. Performance comparison between vertical and horizontal arrays for geoacoustic inversion // IEEE J. Ocean. Eng. 2003. V. 28. P. 424–431.
5. Koch R.A., Knobles D.P. Geoacoustic inversion with ships as sources // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 117. № 2. P. 626.
6. Yung T.C., Yoo K., Fialkovski L.T. Subbottom profiling using a ship towed line array and geoacoustic inversion // J. Acoust. Soc. Am. 2007. V. 122. № 6. P. 3338–3352.
7. Zhou J.X., Zhang X.Z., Knobles D.P. Low-frequency geoacoustic model for the effective properties of sandy seabottoms // J. Acoust. Soc. Am. 2009. V. 125. № 5. P. 2847.
8. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
9. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана. М.: Мир, 1969. 300 с.
10. Бункин Ф.В., Кацнельсон Б.Г., Кравцов Ю.А. и др. Усредненные характеристики поглощения звука в океанических волноводах малой глубины // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 1. С. 1–16.
11. Интерференция широкополосного звука в океане / Под ред. В.А. Зверева, Е.Ф. Орлова. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. С. 93.
12. Белов А.И. О влиянии поперечных волн в осадочном слое на звуковом поле в мелком море // Тр. XI Всес. Акуст. конф. Секция Д. М.: АКИН, 1991. С. 79.
13. Askeland B., Ruud B.O., Hobak H., Mjelde R.A. Seismic field test with a low-level acoustic combustion source and pseudo-noise codes // J. Appl. Geophys. 2008. V. 22. № 9. P. 1224.
14. Мерклин Л.Р., Левченко О.В. Сейсмоакустические исследования с параметрическим профилографом (1988–2001 гг.) // Акустические океанологические исследования и экспедиции / Под ред. В.П. Кузнецова, Б.Г. Мюрдвинова и В.И. Тимошенко. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2002. С. 396.
15. Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н. и др. Перспективные методы и технические средства сейсмоакустического зондирования шельфа и береговой зоны океана // Фундаментальные исследования океанов и морей. Т. 2. М.: Наука, 2006. С. 491.
16. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р. и др. Экспериментальные исследования возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными низкочастотными импульсами // Фундаментальные исследования океанов и морей. М.: Наука, 2009. С. 126.
17. Романова В.И., Мерклин Л.Р., Хилько А.И. и др. Экспериментальное исследование эффективности сейсмоакустического зондирования морского дна в зависимости от спектральных и статистических характеристик шумов и помех / Сб. тр. XXII сессии РАО и сессии Научного совета по акустике РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 301–305.
18. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р. и др. Экспериментальное исследование возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными импульсными сигналами // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 227–236.
19. Гринюк А.В., Бурдуковская В.Г., Кравченко В.Н. и др. Экспериментальные исследования возможностей оптимизации зондирующих сигналов при низкочастотной акустической томографии мелкого моря // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 316–329.
20. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртенов В.М. и др. Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997. 254 с.

21. Хилько А.И. Физические основы наблюдения пространственно локализованных неоднородностей с помощью частично-когерентных полей в плоско-слоистых волноводах // Дисс. ... д.ф.-м.н. Н. Новгород: ННГУ, 2006. 316 с.
22. Лучинин А.Г., Хилько А.И. Маломодовая акустика мелкого моря // УФН. 2011. Т. 181. № 11. С. 22–28.
23. Коваленко В.В., Хилько А.И., Романова В.И. Описание данных, получаемых от пространственно распределенных акустических сенсоров, моделью тренда с ошибкой // Докл. XIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXIII сессией РАО. М.: ГЕОС, 2011. С. 346–249.
24. Бородина Е.Л., Малеханов А.И., Хилько А.И. Пространственно-временная структура широкополосных акустических импульсов в мелком море // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 4. С. 260.
25. Borodina E.L., Petukhov Yu.V. Restoration of the bottom characteristics by the interference structure of the wide-band sound // Acoust. Lett. 1996. V. 19. № 8. P. 159.
26. Чупров С.Д. Селекция мод и лучей в подводном звуковом канале // Акустика океанской среды. М.: Наука, 1982. С. 132–141.
27. Frederick A.B. Observations on attenuation and shear-wave velocity in fine-grained, marine sediments // J. Acoust. Soc. Am. 1997. V. 101. № 6. P. 3385–3397.