

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИДОННОЙ ВОЛНЫ В ДИФРАКЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРСКОГО ДНА

Б.А. Касаткин, В.В. Золотарёв

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН

Анализируются результаты теоретических и экспериментальных исследований проблемы аномальной подсветки донного полупространства при закритических углах падения, которые завершились разработкой новых методов и средств обнаружения объектов, находящихся в верхнем слое морского дна. В качестве нового метода предлагается совместное применение гидролокатора бокового обзора и акустического томографа, работа которого принципиально основана на систематическом использовании придонной волны как нового типа пограничного волнового движения. Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных авторами в натуральных условиях залива Петра Великого, и опубликованных результатов глобального эксперимента SAX-99, выполненного в условиях измерительного полигона у берегов Флориды, позволяет сделать вывод о доминирующей роли придонной волны при детектировании находящихся в грунте объектов.

При локационном обследовании поверхности морского дна и его верхнего слоя традиционно и вполне успешно используются два класса гидролокаторов, работа которых основана на совершенно разных принципах.

Приборы первого класса, такие как гидролокатор бокового обзора (ГБО), принципиально работают при закритических углах падения, когда реализуется механизм полного внутреннего отражения. Такие приборы нашли широкое применение при гидролокационной съёмке морского дна с целью определения характерных элементов его рельефа, а также при поиске объектов, находящихся непосредственно на его поверхности, но не в его толще. Объясняется это тем, что в соответствии с классической теорией полного внутреннего отражения проникновение звуковой волны из водной среды в донное полупространство при закритических углах падения ограничено верхним слоем толщиной порядка длины волны. Так,

при скользких углах падения амплитуда неоднородной волны в морском дне осадочного или песчаного типа убывает по закону (20-25) дБ на длину волны, что практически исключает её проникновение в морское дно на рабочих частотах ГБО.

Производительность поисковых работ, выполняемых с помощью ГБО при ширине полосы обзора (1,0-1,5) 10^3 м и скорости движения носителя локатора 1 м/с, составляет (1,0-1,5) 10^3 м²/с и является максимальной в сравнении с другими способами.

Разработки последних лет, основанные на использовании алгоритмов синтеза апертуры, батиметрии и динамической фокусировки, существенно расширили возможности гидролокаторов такого класса, улучшили их технические характеристики и, в первую очередь, разрешающую способность при проведении осмотровых и поисковых работ. Наиболее полно эти алгоритмы реализованы в приборах типа SAS (synthetic aperture sonars)

и BBSAS (broad band synthetic aperture sonars), описанных, например, в [1], [2].

Гидролокаторы второго класса, такие как акустический профилограф (АП), принципиально работают при докритических углах падения, когда граница раздела вода-морское дно сохраняет значительную акустическую прозрачность. Такие приборы могут иметь достаточную глубину прозвучивания, но малую ширину обзора при проведении поисковых работ с целью обнаружения находящихся в толще морского дна объектов, которые остаются невидимыми для приборов первого класса. С учётом того, что ширина полосы обзора при профилировании составляет всего лишь 10-15м, производительность поисковых работ с применением гидролокаторов класса АП реально на два порядка меньше, чем у гидролокаторов класса ГБО. Разработки последних лет, основанные на использовании широкополосного излучения, многоэлементных приёмных антенн и алгоритмов

формирования направленного приёма с электронным сканированием существенно расширили возможности таких приборов и улучшили их разрешающую способность. Наиболее полно эти алгоритмы реализованы в гидролокаторах типа BOSS (buried object scanning sonar), описанных в [3], [4].

Гидролокаторы обоих классов составляют основу технических средств, предназначенных для поиска объектов, находящихся либо на поверхности морского дна, либо в его толще, и в первую очередь средств миноискания ВМН (buried minehunting systems). Само направление работ активно поддерживается и финансируется соответствующими подразделениями типа ONR (Office of Naval Research) как достаточно актуальное и перспективное с учётом того, что на морском дне можно искать не только донные мины прошедших войн и военных конфликтов.

С учётом сказанного выше представляется чрезвычайно заманчивой идея разработки гидролокатора нового типа, который смог бы решать задачу обнаружения объектов, находящихся как на поверхности морского дна, так и в его толще с высокой производительностью поисковых работ, свойственной гидролокаторам типа ГБО. Эта идея оказалась вполне реализуемой физически после того, как в 1979 г. был обнаружен экспериментально эффект аномальной подсветки донного полупространства при закритических углах падения (Muir T.G., Horton C.W., Thomson L.A.), описанный первоначально в работе [5] и многочисленных последующих работах, посвящённых этой интереснейшей проблеме, краткий обзор которых дан в работе [6]. Суть эффекта заключается в том, что амплитуда прошедшей в грунт волны в диапазоне углов полного внут-

реннего отражения существенно превышает расчётную, аномалия амплитуды растёт с ростом частоты, с уменьшением угла скольжения и увеличением до некоторого предела глубины приёмного гидрофона в грунте. Все особенности аномальной подсветки свидетельствуют о наличии в грунте волновой составляющей, способствующей обнаружению находящихся в грунте объектов гидролокационными средствами типа ГБО, т.е. высокопроизводительными методами гидролокационной съёмки морского дна.

Для оценки масштабности проблемы аномальной подсветки можно указать на тот факт, что для детального исследования всех вопросов, связанных с отражением, рассеянием и прохождением направленных звуковых пучков на границе раздела вода-морское дно, был оборудован специализированный полигон в Центре подводных исследований НАТО (Италия, Специя) и полигон у берегов Флориды, где был проведён глобальный эксперимент SAX-99 (Sediment acoustic experiment), в котором приняли участие практически все известные коллективы зарубежных акустиков. Фактически во всех работах, посвящённых этой проблеме, отмечается, что при докритических углах падения экспериментальные результаты хорошо соответствуют теории, а аномальные особенности возникают только в области углов полного внутреннего отражения.

Первая попытка объяснить аномальные явления была предпринята N.Chotiros в 1989 г. в работе [7]. Согласно гипотезе автора и в соответствии с теорией распространения звука в двухфазных средах, сформулированной ранее Био, в морском дне песчаного типа возможно существование кроме обычных продольной и поперечной волн

низкоскоростной продольной волны, скорость распространения которой должна составлять 1000-1200 м/с. Поскольку для низкоскоростной волны явление полного внутреннего отражения не имеет места, её амплитуда в реальном эксперименте должна убывать в нижнем полупространстве по сферическому закону, чем и объясняется, по мнению автора гипотезы, аномалия амплитуды в поле прошедших волн. Однако прямые измерения скорости звука в песчаном грунте, выполненные в условиях натурального эксперимента (in situ), не подтвердили существования низкоскоростной продольной волны.

Вторая гипотеза была сформулирована в работе [8]. В соответствии с этой гипотезой аномальная подсветка донного полупространства объясняется дифракцией звуковой волны на неровной поверхности морского дна. Действительно, дифракционная составляющая, имея сферическую расходимость в донном полупространстве, может быть доминирующей в сравнении с неоднородной волной, амплитуда которой убывает экспоненциально быстро. Однако при отработке этой гипотезы следует иметь в виду, что уровень дифракционной составляющей пропорционален уровню суммарного поля на рассеивающей поверхности, который убывает с квадратом расстояния, и углу скольжения, т.е. убывает с кубом расстояния. Это предопределяет малый уровень дифракционной составляющей при малых углах скольжения и неэффективность самой подсветки.

Третья гипотеза была сформулирована в первоначальном варианте в работе [9], теоретические основы этой гипотезы изложены в последующих работах [10], [11]. В соответствии с этой гипотезой общей причиной всех аномальных особен-

ностей в поле преломлённых и отражённых волн является некорректность описания явления полного внутреннего отражения в рамках классической теории, подразумевающая существование альтернативных решений целого ряда граничных задач акустики слоистых сред. В простейшем случае граничной задачи на отражение и преломление произвольных звуковых пучков на границе раздела вода–морское дно искомое решение находится как сумма двух сопряжённых решений исходной несамосопряжённой задачи, для каждого из которых имеет место полное внутреннее отражение. Интерференция двух сопряжённых волн, соответствующих двум знакам реактивного входного импеданса донного полупространства, приводит к формированию интерференционного минимума в поле отражённых волн в диапазоне углов скольжения $12-15^\circ$ с эффективным значением коэффициента отражения $|V|=0,5$, что хорошо подтверждается экспериментом [11]. В этом же диапазоне углов в поле прошедших волн формируется интерференционный максимум, который реализуется затеканием энергии звукового поля в донное полупространство в диапазоне углов полного внутреннего отражения и его аномально большой подсветкой [9].

В полном соответствии с гипотезой Ньютона затекание энергии звукового поля на горизонт полного внутреннего отражения приводит к её локализации в виде обобщённой придонной волны, амплитуда которой становится максимальной на горизонте полного внутреннего отражения, а не на границе раздела. Существование обобщённой придонной волны, локализованной вблизи горизонта полного внутреннего отражения, означает подсветку придонного слоя снизу за счёт

дифракционного рассеяния на неоднородностях грунта. Эта подсветка является более эффективной, чем дифракционная подсветка сверху за счёт рассеяния на неровностях самой границы раздела, т.к. амплитуда обобщённой придонной волны, локализованной в придонном слое, убывает с расстоянием всего лишь по цилиндрическому закону.

Обобщённая придонная волна оказалась ключевым явлением в понимании всех аномальных особенностей в поле отражённых и преломлённых волн, отмеченных в обзорном плане в работах [6], [11], а также в физической реализации гипотезы Ньютона о полном внутреннем отражении, которая, являясь общепризнанной, не получила за прошедшие триста лет ни физического, ни математического обоснования. Однако, как показали дальнейшие исследования, обобщённая придонная волна не может существовать независимо от регулярной составляющей, а минимальная комбинация, названная нами придонной волной, содержит три парциальные составляющие, образующие единый волновой процесс. В качестве таких составляющих в работе [12] названы водная волна, локализованная в основном в водной среде, обобщённая придонная волна, соответствующая

ючая полюсу коэффициента отражения, локализованная в основном вблизи горизонта полного внутреннего отражения в нижнем полупространстве, и боковая волна. Эта тройка волн, распространяясь вдоль границы раздела вода–морское дно с разными фазовыми скоростями, образует крупномасштабные интерференционные структуры, хорошо наблюдаемые экспериментально при локационной съёмке морского дна гидролокатором бокового обзора при малых углах скольжения [6]. Групповая скорость распространения придонной волны как единого волнового процесса, определённая в [12], оказалась очень близкой к скорости звука в воде в придонном слое, что и послужило основой для её идентификации в натурном эксперименте. Лучевая трактовка придонной волны и её структура поясняются рис.1 для неоднородного волновода, нагруженного на жидкое полупространство (модельного волновода Пекериса, но с учётом неоднородности водного слоя).

В этой более реальной ситуации, характерной для мелкого моря, роль обобщённой придонной волны играет первая обобщённая нормальная волна 1(2), затекающая на горизонт полного внутреннего отражения, а роль водной волны играет вторая (регулярная) нормальная

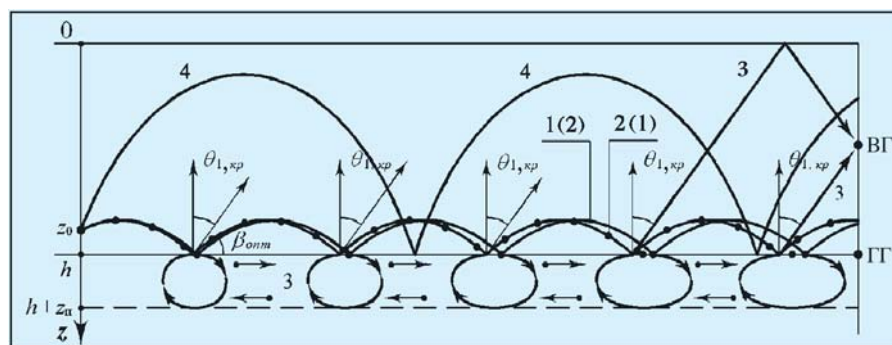


Рис. 1. Лучевая трактовка придонной волны: 1(2) – первая обобщённая нормальная волна, 2(1) – вторая регулярная нормальная волна, 3 – боковая (грунтовая) волна, 4 – высокоскоростной луч придонного звукового канала, ВГ, ГГ – водный и грунтовый гидрофоны

волна 2(1), локализованная в основном в водном слое.

Несмотря на близкое соответствие скоростей распространения, придонная волна принципиально отличается от водной волны. Водная волна в классическом описании вырождается при малых углах скольжения вследствие эффекта мягкого экрана и противофазного отражения, а её амплитуда должна убывать с квадратом расстояния. Придонная волна, распространяясь под нулевыми углами скольжения, сохраняет цилиндрическую расходимость, поскольку внутреннее отражение парировует эффект мягкого экрана, а отражение становится не противофазным, а каустическим со сдвигом фазы на 90° . Кроме того, наличие в составе придонной волны боковой составляющей, которая излучается в водную среду под критическим углом скольжения, позволяет реализовать её селективный приём направленной приёмной антенной, находящейся в водной среде, при произвольном её удалении от дна. Экспериментальные исследования придонной волны, выполненные в мелком море при различных гидрологических условиях, позволили надёжно идентифицировать её по скорости распространения, которая хорошо соответствует минимальной скорости звука на профиле вертикального распределения, и отделить её от быстрой волны рефракционного типа, скорость распространения которой на 1-2% выше [12]. Более того, эти эксперименты показали, что придонная волна является доминирующей в звуковом поле, создаваемом придонным излучателем, а более быстрые рефракционные составляющие, распространяющиеся под крутыми углами скольжения в придонном звуковом канале, быстро вырождаются с расстоянием.

Обратимся к экспериментальным результатам по детектированию мишеней, находящихся в верхнем слое морского дна, в которых придонная волна присутствует в качестве основной волновой составляющей.

Первые обнадёживающие результаты были получены в эксперименте SAX-99 при детектировании мишени типа заполненного цементом металлического цилиндра с размерами $0,5 \times 1,5$ м, закопанного в песчаный грунт на глубину 0,15-0,5 м. В качестве локатора использовался SAS с рабочей частотой 20 кГц, буксируемый на расстоянии 25-57 м, высота буксировки сонара над грунтом составляла 3,8 м. Детали эксперимента подробно описаны в работе [1]. Как оказалось, мишень, закопанная в грунт на глубину 0,15 м, была обнаружена на расстоянии 25 м (при угле скольжения $8-10^\circ$) только в одном тесте из пяти выполненных. Однако мишень, закопанная на глубину 0,5 м, была обнаружена в пяти тестах из пяти выполненных, и не только на расстоянии 25 м, но и при увеличении расстояния до 57 м, чему соответствует угол скольжения 4° (критический угол скольжения составляет 30°).

Результаты экспериментов оказались прямо противоположными ожидаемым, т.к. авторы экспериментов являются сторонниками гипотезы о дифракционной подсветке морского дна сверху через механизм рассеяния волны на неровной поверхности дна. Действительно, в этом случае эффективность подсветки и вероятность обнаружения мишени должны уменьшаться при увеличении глубины её залегания и расстояния до мишени, что не соответствует эксперименту.

Однако результаты экспериментов вполне объяснимы, если учесть существование первой обобщённой нормальной волны

на горизонте полного внутреннего отражения, который составляет в этих экспериментах 1,9 м. При приближении мишени к горизонту локализации обобщённой придонной волны увеличивается её дифракционная подсветка снизу и вероятность её обнаружения вплоть до расстояния 57 м, хотя дополнительные потери на распространение в этом случае возросли почти на 20 дБ. Как следует из экспериментов, именно первая обобщённая нормальная волна является основной причиной аномальной подсветки верхнего слоя морского дна снизу, тогда как дифракционная подсветка сверху за счёт рассеяния волны на неровностях поверхности играет лишь второстепенную роль.

Этот вывод подтверждается и второй серией экспериментов, описанных в работе [1], выполненных с мишенью типа сферической маслозаполненной оболочки диаметром 0,25 м, закопанной в грунт на различные глубины в диапазоне 0-0,58 м. Эти мишени успешно детектировались при докритических углах падения (при угле скольжения 50°) как достаточно яркие, но не были обнаружены в многочисленных тестах при закритических углах падения (при углах скольжения $7-17^\circ$), когда работал в чистом виде механизм дифракционной подсветки сверху. Высота над дном сонара в этих экспериментах составляла 14 м, соответствующий ей горизонт локализации первой обобщённой нормальной волны составлял 7 м, что практически исключало дифракционную подсветку мишени снизу.

Для выяснения возможности использования придонной волны для детектирования мишеней, находящихся в верхнем слое морского дна, нами были организованы две серии экспериментов с использованием

штатного ГБО с рабочей частотой 80 кГц, дополненного селективной приёмной антенной. Максимум характеристики направленности такой антенны в вертикальной плоскости строго соответствовал критическому углу скольжения, который для песчаных грунтов составляет 30° , а угловая ширина не превышала 2° . Малая угловая ширина характеристики направленности приёмной антенны обеспечивала селективный приём грунтовой волны, которая возникает при отражении первой обобщённой нормальной волны от любой мишени, находящейся в грунте вблизи горизонта её локализации, т.е. вблизи горизонта полного внутреннего отражения. По существу такой локализатор реализует акустический морской томограф (АМТ), выполняющий локационное зондирование поверхности морского дна в штатном режиме ГБО и синхронно с этим зондирование верхнего слоя морского дна на заданном горизонте в режиме дифракционного томографирования.

В первой серии экспериментов, которые проводились в мелководных бухтах с песчаным дном зал. Петра Великого, в качестве мишени использовалась шпунтовая стенка пирса, уходящая в грунт на глубину порядка 2 м. При буксировке АМТ на фиксированной глубине мимо пирса после соответствующей обработки сигналов мы получали ГБО-изображение поверхности морского дна акватории, прилегающей к пирсу, и его горизонтальный разрез на заданном горизонте томографирования (томограмму). Результаты эксперимента поясняются рис. 2.

На рис. 2, а хорошо видно изображение шпунтовой стенки пирса на траверсном расстоянии 190 м. Значительные и весьма характерные геометрические искажения изображения

стенки пирса объясняются слабой направленностью приёмной антенны АМТ в горизонтальной плоскости.

На рис. 2, б хорошо видно изображение той же стенки пирса на том же расстоянии, полученное с помощью ГБО, однако геометрические искажения изображения стенки пирса практически отсутствуют. Это объясняется большей направленностью антенны ГБО в горизонтальной плоскости в сравнении с антенной АМТ. На эхограмме ГБО хорошо видны также теневое изображение пирса, зона углублённого фарватера на подходах к пирсу, обрамлённая грунтовой отсыпкой, и береговая черта бух. Патрокл. Хорошее соответствие времени распространения акустического сигнала до шпунтовой стенки и обратно, зафиксированное на томограмме с использованием придонной волны и на ГБО-изображении, полученном с использованием водной волны, свидетельствует о близком соответствии скоростей распространения этих двух различных волновых процессов, предсказанном теоретически и подтверждённом эксперимен-

тально в различных гидрологических условиях в работе [12].

Во второй серии экспериментов в качестве мишени использовался полый металлический цилиндр с размерами $0,4 \times 1,0$ м, закопанный в грунт на глубину 1 м. Акустический морской томограф опускался с борта судна, стоящего на якоре, при этом высота антенны над дном составляла 2 м, а горизонт лоцирования грунта обобщённой придонной волной соответствовал глубине нахождения мишени в грунте. Координаты мишени были определены с помощью GPS при её установке, положение судна относительно мишени изменялось в пределах 30-100 м. Схема проведения эксперимента и взаимное расположение мишени, судна и двух пирсов в бухте поясняются рис. 3. При вращении антенны на 360° одновременно отображались поверхность морского дна на эхограмме ГБО и разрез морского дна на томограмме на горизонте расположения мишени. Результаты эксперимента поясняются рис. 4, 5.

При круговом вращении антенны в качестве яркого ориентира на эхограмме ГБО и на

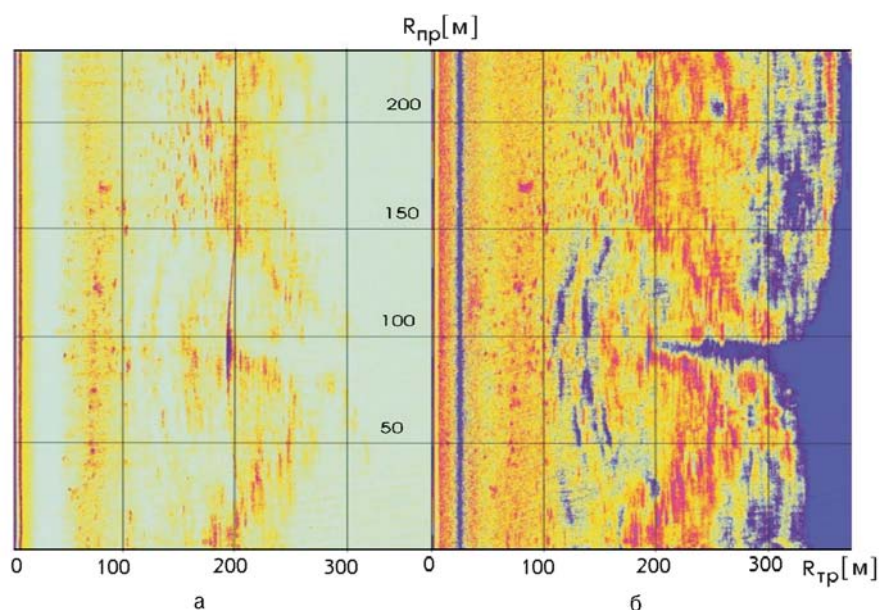


Рис. 2. Горизонтальный разрез морского дна (томограмма) на глубине 2 м (а) и ГБО-изображение поверхности дна (б)

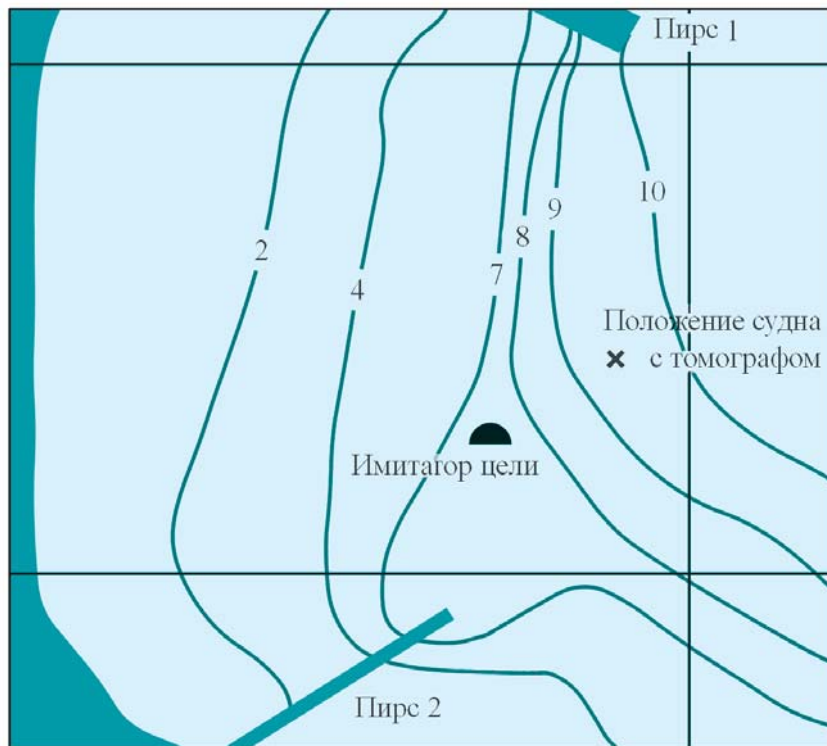


Рис. 3. Схема проведения эксперимента в бух. Патрокл

томограмме хорошо видно периодическое изображение пирса 2. Оба рисунка соответствуют одному и тому же участку дна и отличаются только направлением вращения антенны и не-

большим дрейфом судна на якоре во время гидроакустической съёмки. Хорошая корреляция изображений на эхограмме ГБО и на томограмме говорит о том, что большинство рассеивателей

являются не столько поверхностными, сколько объёмными. Отсюда следует, что томографическое изображение всегда является только частью ГБО-изображения, но на томограмме присутствуют только объекты, находящиеся в грунте.

Фоновые рассеиватели, присутствующие в грунте в виде его объёмных неоднородностей, видны на томограмме в виде ярких пятен малого размера и почти всегда дублируются на ГБО-грамме. Яркие рассеиватели в виде инородных включений изображаются на томограмме с большими геометрическими искажениями в виде протяжённых хвостов. Изображение мишени в виде протяжённой линии повышенной яркости присутствует только на томограммах. Изображение малого по размерам, но яркого рассеивателя, каким является мишень, в виде прерывистой линии повышенной яркости объясняется слабой направленностью в горизонтальной плоскости приёмной антенны томографа и значительным уширением бокового поля излучающей антенны ГБО, работающей в существенно нелинейном режиме, поскольку уровень излучения намного превышает предел кавитационной прочности воды.

Подобные геометрические искажения формы и размеров мишени при её отображении на томограмме затрудняют, естественно, определение истинных размеров мишени и саму задачу классификации цели. С другой стороны, они служат дополнительным идентификационным признаком при выделении сильных рассеивателей, соответствующих искусственным мишеням, на фоне объёмных рассеивателей, соответствующих неоднородностям грунта, по их характерному изображению на томограмме. Однако

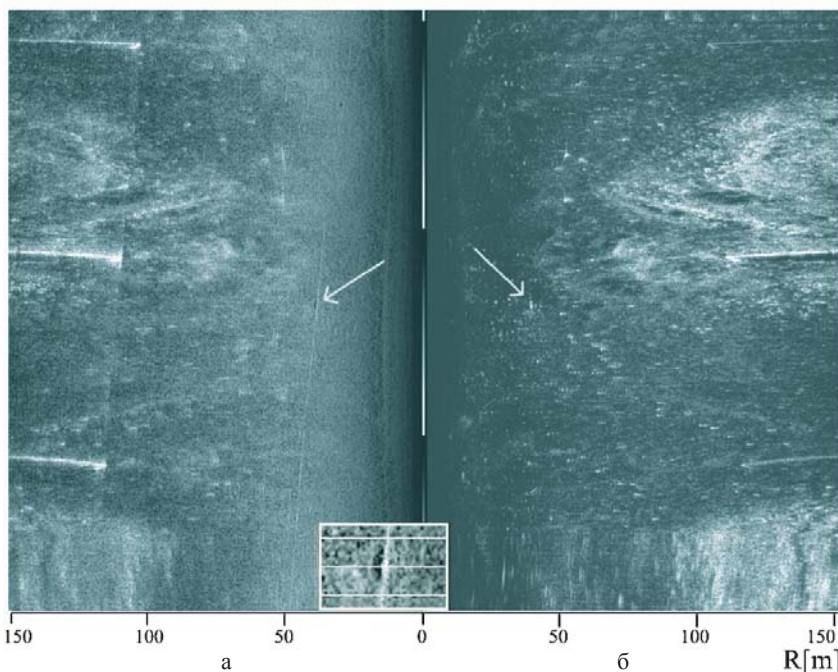


Рис. 4. Горизонтальный разрез морского дна (томограмма) на глубине 1 м (а) и ГБО-изображение поверхности морского дна (б). Антенна вращается по часовой стрелке

синхронное отображение мишени на эхограмме ГБО, т.е. без существенных геометрических искажений, и на томограмме, т.е. с дополнительными идентификационными признаками на фоне естественных помех, снимает все проблемы, связанные с правильной идентификацией и классификацией цели.

Положение мишени на томограмме, соответствующее максимуму характеристики направленности излучающей антенны и соответственно максимуму амплитуды рассеянного в обратном направлении сигнала, помечено на рисунках стрелками.

Расстояние до мишени за время гидролокационной съёмки изменялось за счёт дрейфа судна в пределах 35-50 м. На рис. 6 приведены осциллограммы сигналов, принятых акустическим томографом при трёх различных положениях приёмной антенны, соответствующих направлению на мишень (средняя осциллограмма) и симметрично смещённым от него положениям. Три сечения томограммы, соответствующие этим осциллограммам, показаны на увеличенном фрагменте в нижней части рис. 4. На всех трёх осциллограммах уровень полезного сигнала, отражённого от мишени, превышает уровень фоновой помехи примерно на 6-10 дБ. Можно отметить также следующий за максимумом глубокий минимум сигнала, соответствующий акустической тени, образующейся за мишенью.

Максимальная дальность обнаружения томографом такого отражателя, как шпунтовая стенка пирса 1, которая видна на томограмме и на ГБО-грамме на расстоянии 300 м, поясняется рис. 7. Гидролокационная съёмка выполнена при нахождении судна с томографом у пирса 2 при вращении антенны на 360°. Высота антенны над дном составляла 4 м. Можно

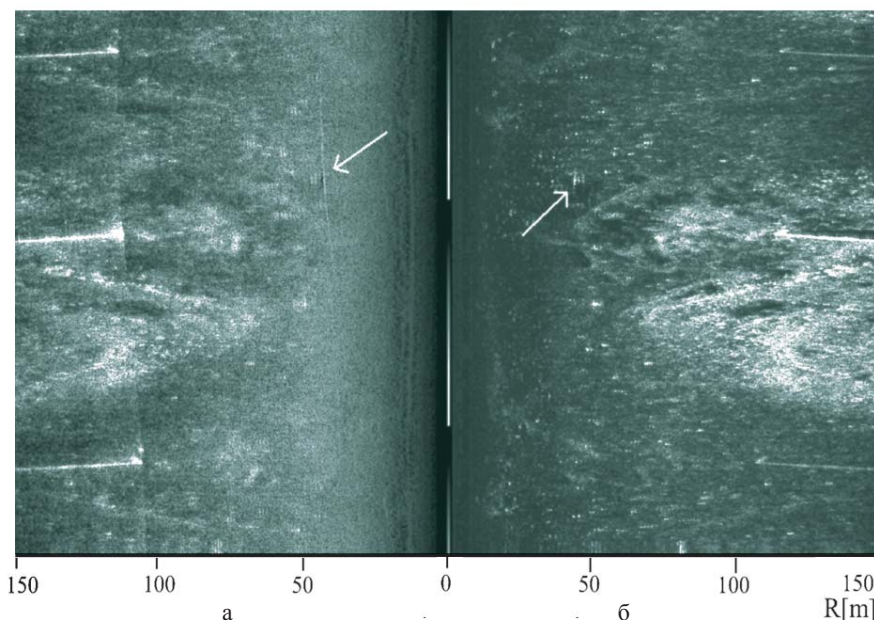


Рис. 5. Горизонтальный разрез морского дна (томограмма) на глубине 1 м (а) и ГБО-изображение поверхности морского дна (б). Антенна вращается против часовой стрелки

также отметить, что изображение шпунтовой стенки пирса 2 видно только на ГБО-грамме (на её начальном участке), т.к. водная волна заведомо отражается от неё. Однако её изображение отсутствует на томограмме. Это означает, что первая обобщённая нормальная волна не отразилась от шпунтовой стенки пирса, т.к. горизонт её локализации, определяемый в соответствии с теорией высотой антенны над дном, оказался ниже нижней границы шпунтовой стенки в грунте, и волна

прошла под неё без отражения.

Понятно, что подобные особенности локализации первой обобщённой нормальной волны в придонном слое грунта следует учитывать при правильном выборе горизонта лоцирования объектов в морском дне. Вместе с тем при организации послойного зондирования придонного слоя грунта путём изменения высоты антенны над дном вполне возможно получение 3D-изображения находящихся в нём объектов путём сшивки отдельных 2D разрезов.

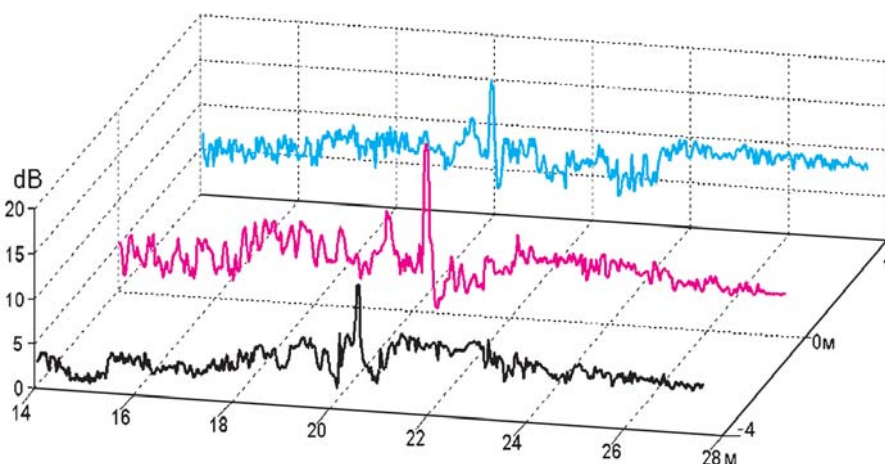


Рис. 6. Осциллограммы акустических сигналов, отражённых от мишени

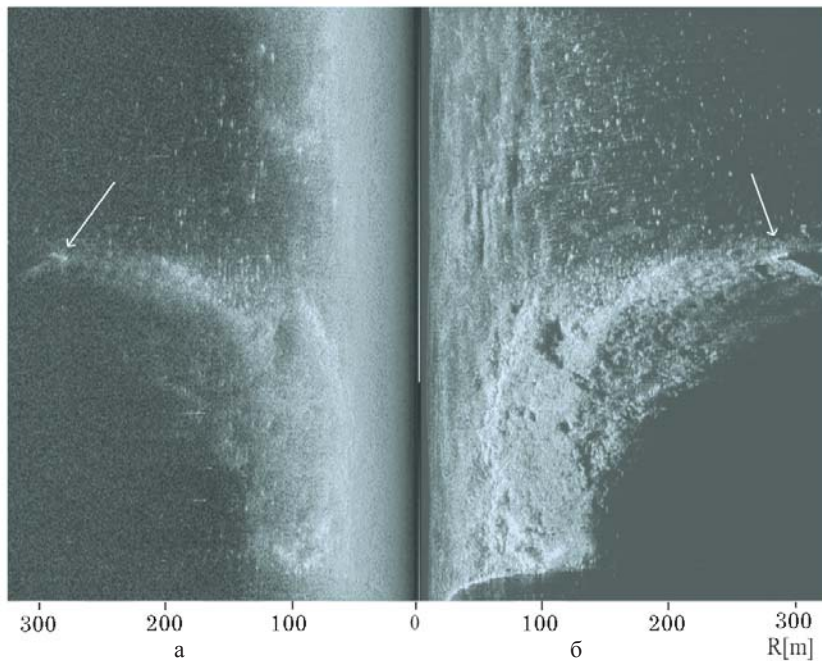


Рис. 7. Томографическое изображение шпунтовой стенки пирса 1 (а) и ее ГБО-изображение (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткий анализ проблемы миноискания (ВМН) в условиях морских прибрежных акваторий показывает её чрезвычайную актуальность и техническую реализуемость с помощью современных методов и гидроакустических средств. Особую

привлекательность при её решении, на наш взгляд, представляют гидролокационные средства, принцип работы которых основан на использовании нового физического явления, связанного с затеканием и локализацией звуковой энергии на горизонте полного внутреннего отражения в верхнем слое мор-

ского дна при закритических углах падения. Это явление было обнаружено экспериментально почти 30 лет назад, но получило обоснование только в последние годы [13]. Для обоснования всех особенностей экспериментальных данных аномального характера нами разработана обобщённая теория отражения звуковых волн на импедансных границах раздела, предсказавшая существование придонной волны на границе раздела вода-морское дно как новой формы пограничного волнового движения, локализованного на горизонте полного внутреннего отражения и сопровождающегося излучением боковой волны. Использование придонной волны для целей ВМН реализовано в акустическом морском томографе, натурные испытания которого описаны в настоящей работе в сравнении с другими аналогичными данными. Натурные испытания акустического томографа подтверждают его высокую эффективность и перспективность использования при площадной съёмке морского дна с высокой производительностью поисковых работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Piper J.E., Commander K.W., Thorsos E.I., and Williams K.L. Detection of Buried Targets Using a Synthetic Aperture Sonar IEEE // J. of oceanic engineering. July 2002. Vol. 27, № 3. P. 495-504.
2. Jackson D.R., Williams K.L., Thorsos E.I., and Kargl S.G. High-Frequency Subcritical Acoustic Penetration Into a Sandy Sediment IEEE // J. of oceanic engineering. July 2002. Vol. 27, № 3. P. 346-361.
3. Schock S.G., Wulf J. Buried Object Scanning Sonar for AUVs // Proceedings of Oceans. 2003. P. 494-499.
4. Clem T.R. and Lopes J.L. Progress in the Development of Buried Minehunting Systems // Proceeding of Oceans. 2003. P. 500-511.
5. Muir T.G., Horton C.W., Thomson L.A. The penetration of highly directional acoustic beams into sediments // J. Sound Vib. 1979. V. 64, № 4. P. 539-551.
6. Касаткин Б.А. Аномальные явления при распространении звуковых волн вблизи морского дна // Акуст.ж. 2002. Т. 48, № 3. С.437-446.
7. Chotiros N.P. High frequency acoustic bottom penetration // Theory and experiment Proceeding of Oceans 89. V. 3. P. 1158-1162.
8. Jackson D.R., Ivakin A.N. Scattering from elastic sea beds: First order theory // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103, № 1. P. 336-345.
9. Касаткин Б.А. Аномальные эффекты при прохождении звуковых волн через границу раздела вода-морской песок // Сб. тр. VII школы-семинара акад. Л.М.Бреховских. М.: ГЕОС, 1998. С. 112-116.
10. Касаткин Б.А. Альтернативные решения задачи Пекериса // Доклады X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана». М.: ГЕОС, 2004. Т. С. 98-101.
11. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Аномальные особенности отражения сферических волн от слоистого морского дна // Докл. X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2004. С. 251-255.
12. Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н. Физические основы и метрологическое обеспечение гидроакустической дальнометрии в мелком море // Приборы. 2006. № 11. С. 55-60.
13. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Некорректные задачи и обобщённые волны в акустике слоистых сред. Владивосток: Дальнаука, 2005. 406 с.