

УДК 681.883; 534.222

# ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБСЛЕДОВАНИЯ МОРСКОГО ДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Ю.В. Матвиенко

В.А. Воронин, С.П. Тарасов

А.В. Скнаря, Е.В. Тутынин

Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup>

Технологический институт Южного федерального университета<sup>2</sup>

Научно-исследовательский институт приборостроения, г. Жуковский

Обсуждаются пути совершенствования и принципы построения гидроакустического комплекса, обеспечивающего panoramic обзор поверхности морского дна, поиск объектов, исследование верхней части вертикального разреза донного грунта с высокой степенью разрешения. Комплекс специализирован для применения в составе автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Проанализирована возможность использования методов нелинейной акустики, линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов и интерферометрической обработки для увеличения точности, разрешения и достоверности измерений. Рассматриваются потенциальные возможности аппаратуры, результаты расчетов и приводятся результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие перспективы создания комплекса с высокими точностными параметрами и минимальными массогабаритными характеристиками.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание технологий комплексного обследования обширных участков морского дна, включая состояние поверхности, структуру толщи, поиск неоднородностей и объектов как на дне, так и в слое грунта, реализуемых с использованием гидроакустической техники, - одно из основных направлений исследования океана.

Традиционные средства поиска – гидролокаторы бокового обзора (ГБО), многолучевые эхолоты (МЛЭ), линейные профилографы грунта - широко используются в морской практике, однако растущие требования к качеству обследований требуют совершенствовать эту технику. Гидроакустическая аппаратура для исследования морского дна должна не только фиксировать с высоким разрешением со-

стояние, структуру, рельеф дна водоемов, но и получать дополнительные данные о свойствах, физических характеристиках и составе донного грунта.

Перспективным средством изучения рельефа дна является интерферометрический гидролокатор бокового обзора (ИГБО) для объемного изображения дна и объектов. Во-первых, ИГБО позволяет производить съемку рельефа дна в существенно большей полосе обзора, чем МЛЭ, что снижает время ее проведения. Во-вторых, детальность съемки при использовании ИГБО также существенно выше. В-третьих, ИГБО по конструкции намного проще МЛЭ, а значит, обладает лучшими параметрами по надежности и массогабаритным характеристикам.

Для исследования донных осадочных структур и поиска

заиленных объектов перспективно использование методов нелинейной гидроакустики, реализуемых с помощью так называемых параметрических гидроакустических систем [1,2].

Тонкая структура придонных осадков традиционно изучается с помощью технологий одноканального и многоканального сейсмопрофилирования. Общим принципиальным недостатком обычных широкополосных профилографов является то, что на разных частотах они «озвучивают» различный объем среды, в результате чего любые физические характеристики грунтов, определяемые по отраженным сигналам на разных частотах, соответству-

<sup>1</sup> 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (4232)432416, e-mail: ymat@marine.febras.ru

<sup>2</sup> 347928, Таганрог, Ростовская обл., Некрасовский пер., 44, тел./факс: (8634) 310-635, e-mail: tarasov@fep.tsure.ru

ют различным объемам осадков и, в общем смысле, несопоставимы. Другим недостатком является невозможность получения сверхвысокого разрешения в приповерхностном слое вертикального разреза, т.к. здесь принципиально необходима высокая направленность на достаточно низких частотах. Что касается проблемы классификации типов донных грунтов и определения составов морских донных осадков и иловых насосов, то для ее решения также требуется разработка специального инструментария.

Поэтому применение параметрических антенн, принцип действия которых основан на эффекте нелинейного взаимодействия акустических волн, является привлекательным по целому ряду показателей. К таким показателям относятся:

- высокая разрешающая способность по углу за счет узкой характеристики направленности в режиме излучения;
- высокая разрешающая способность по дистанции за счет возможности излучения коротких импульсов и сложных сигналов вследствие широкой полосы излучающего тракта;
- помехоустойчивость за счет чрезвычайно низкого уровня бокового излучения;
- помехоустойчивость за счет увеличения отношения сигнал/помеха при использовании сложных сигналов с большой базой;
- постоянство эхо-контакта с одним и тем же рассеивающим объемом при изменении рабочей частоты в широком диапазоне за счет частотно-независимой характеристики направленности параметрической антенны;
- возможность классификации объектов локации путем получения дополнительной информации с помощью широкополосных сигналов; малые габариты и вес антенной системы и др.

Для эффективного применения поисковой аппаратуры серьезные требования предъявляются к носителям этой аппаратуры. Носитель должен обеспечить прецизионную навигационную привязку, высокую стабильность пространственного движения, низкий уровень помех. Таким требованиям отвечают автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [3]. На наш взгляд, для решения задач мониторинга с помощью АНПА наиболее перспективным по многим критериям представляется гидроакустический комплекс в составе АНПА, состоящий из интерферометрического гидролокатора бокового обзора и параметрического донного профилографа. Синхронное комплексное исследование структуры верхних слоев донных осадков и рельефа донной поверхности позволяет в значительной степени устраниТЬ неоднозначность в интерпретации акустического изображения морского дна, что достигается сопоставлением результатов измерений, полученных гидролокатором и профилографом.

## ■ Теоретические предпосылки реализации гидроакустического комплекса

### *Параметрический профилограф*

Широкополосный параметрический гидролокатор вертикального действия, или эхолот-профилограф, позволяет успешно решать задачи прецизионного эхолотирования дна и профилирования донных отложений, т.е. записи непрерывного вертикального разреза донного грунта с высокой разрешающей способностью.

С помощью параметрического профилографа в принципе можно “прозвучивать” донные осадки на значительную

глубину, однако наиболее привлекательным является стратификация именно верхней кромки осадочного чехла с высоким разрешением. Вследствие широкой полосы излучающего сигнала параметрический профилограф способен адаптивно решать задачу профилирования донных отложений, позволяя выбрать оптимальную рабочую частоту в зависимости от вида и типа донного грунта. При этом “озвученный” объем на разных частотах будет одинаковым благодаря свойству постоянства характеристики направленности параметрической антенны в широком частотном диапазоне.

Рассмотрим методику расчета энергетических характеристик параметрического профилографа донных осадочных структур с учетом потерь на прохождение и затухание в донном грунте. Основой для расчета является уравнение гидролокации

$$I_c = \delta^2 I_n, \text{ или } P_c = \delta P_n, \quad (1)$$

где  $I_c$ ,  $P_c$  - интенсивность и звуковое давление эхо-сигнала в точке приема;  $I_n$ ,  $P_n$  - интенсивность и звуковое давление помех;  $\delta$  - коэффициент распознавания, определяющий отношение сигнал/помеха на входе тракта обработки, которое обеспечивает регистрацию сигнала с заданными значениями вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

Уровень помех  $P_n$  складывается из шумовой и реверберационной. Для профилографа можно принять, что уровень помех определяется только шумовой помехой, так как реверберационная помеха в большинстве случаев оказывает значительно меньшее влияние. Причины этого состоят в том, что длительность сигналов, как правило, невелика, рабочие частоты профилографа попадают в диапазон наиболее интенсивных шумов носителя.

Уровень акустического давления помех на рабочей частоте в полосе приемного тракта рассчитывается по формуле

$$P_n = \frac{P_{no}}{F} \sqrt{\frac{\Delta f}{\gamma_{np}}}, \quad (2)$$

где  $F$  - рабочая частота;  $\Delta f$  - полоса пропускания приемно-усилительного тракта;  $\gamma_{np}$  - коэффициент концентрации приемной акустической антенны;  $P_{no}$  - эффективное значение акустического давления помехи при стандартных условиях:  $f = 1$  кГц,  $\Delta f = 1$  Гц,  $\gamma_{np} = 1$ .

Коэффициент распознавания  $\delta$  для гидролокационных систем обычно принимают равным

$$\delta = \frac{\sqrt{2}K_\delta}{\sqrt{\Delta f T}}, \quad (3)$$

где  $K_\delta$  - коэффициент надежности приема, т.е. минимально допустимое отношение сигнала к помехе на входе индикатора;  $T$  - время усреднения сигнала, принимаемое на практике равным длительности импульса посылки.

Член в левой части уравнения (1), представляющий собой давление эхо-сигнала, зависит от уровня давления излучаемого импульса, отражающей способности цели и законов распространения сигнала до цели и обратно с учетом затухания. В случае локации донных осадков отражающая способность цели определяется коэффициентом отражения, длительностью импульса и характеристикой направленности антенны.

Интенсивность эхо-сигнала при эхолотировании дна находят по формуле:

$$J_3 = \frac{W_a \gamma_{np} \tau c k_{12}^2}{8\pi H^3} \cdot 10^{-0.2\beta_H}, \quad (4)$$

где  $k_{12}$  - коэффициент обратного рассеяния звука дном по давлению (коэффициент рассеяния границы раздела вода-дно);  $H$  - глубина, м.

Интенсивность эхо-сигнала от цели с известным значением радиуса эквивалентной сферы  $R_3$  определяется выражением

$$I_c = \frac{W_a \gamma_{uz} \cdot R_3^2}{16\pi x^4} \cdot 10^{-0.2\beta_x}. \quad (5)$$

Приравнивая выражения (4) и (5) и считая, что  $H=x$ , найдем значение  $R_3$ :

$$R_3 = k_{12} \sqrt{2H\tau}. \quad (6)$$

Используя полученное выражение для вычисления акустической мощности по каждой из частот накачки, необходимой для обнаружения известной цели на заданной дистанции в присутствии шумовой помехи, получим:

$$W_a = \frac{2 \cdot 10^3 \delta P_{01} H l_D^2 \cdot 10^{0.05\beta_H} e^{H/L_3}}{k_{12} \sqrt{2H\tau} \cdot F^2 \alpha \cdot L_D I(B, y) \sqrt{\gamma_{np} \tau} \cdot \gamma_{uz} \rho} \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет определить уровень акустической мощности параметрического излучающего тракта, который требуется для эхолокации дна с определенными акустическими характеристиками с заданным отношением сигнал/помеха.

Для определения энергетических характеристик профилографа при локации придонных слоев необходимо учесть коэффициенты отражения и прохождения для каждого слоя грунта и затухание в грунте.

Рассмотрим модель дна водоема, состоящего из однородных слоев с плоскими горизонтальными границами раздела. Длительность зондирующих сигналов меньше времени распространения звука внутри

слоя, и сигналы, отраженные от дна и поверхности слоя, можно селектировать. Предположим, что на границы раздела нормально падает плоская волна. Для каждой границы раздела сред могут быть определены коэффициенты отражения и прохождения.

Для случая двухслойной структуры дна, когда отражение происходит от границ раздела "вода-грунт" и двух типов грунта, общий коэффициент, учитывающий ослабление сигнала при отражении и прохождении, запишется:

$$Q = T_{12} \cdot T_{21} \cdot K_{12} \cdot K_{23}, \quad (8)$$

где  $K_{12}$  - коэффициент отражения от границы раздела ("вода-грунт");  $T_{12}$  и  $T_{21}$  - коэффициенты прохождения через границу раздела "вода-грунт" соответственно по направлению в грунт и обратно;  $K_{23}$  - коэффициент отражения от второй границы раздела (границы раздела двух типов грунтов).

Учет затухания сигнала разностной частоты, произведем введением коэффициента затухания  $\beta_{ep}$ , зависящего от частоты и акустических свойств грунта.

С учетом изложенного выражение для вычисления акустической мощности по каждой из частот накачки, необходимой для регистрации слоя донных осадков, залегающего на глубине  $h$ , будет иметь вид (7) с заменой  $H = h$  и

$$Q = \prod_{m=1}^n T_{m(m+1)} T_{(m+1)m} K_{m(m+1)} K_{(m+1)(m+2)}$$

при стратификации  $n$  донных слоев;

$$\beta_{ep} h_{ep} = \sum_{m=1}^n \beta_m h_m.$$

Полученное выражение позволяет рассчитать мощность по каждой из частот накачки, необходимую для стратификации донных осадков с учетом их

характеристик, или определить отношение сигнал/помеха, которого можно достичь при разных параметрах зондирующего сигнала и акустических характеристиках донных грунтов. Используя методику расчета и данные об акустических свойствах донного грунта, проведем расчет основных характеристик параметрического излучающего тракта профилографа. Диапазон разностных частот выберем на основании данных литературы и накопленного опыта. Из соображений лучшего проникновения в морской грунт диапазон частот определим в пределах (3-30) кГц. Расширение его в сторону низких частот нецелесообразно несмотря на уменьшение коэффициента затухания при снижении частоты, так как это приведет к увеличению длительности импульса и, следовательно, снижению разрешающей способности. Расширение диапазона в сторону более высоких частот повлечет за собой увеличение потерь из-за поглощения в грунте, а кроме того - необходимость повышения частоты накачки, что тем самым приведет к уменьшению коэффициента преобразования по давлению для всего диапазона разностных частот.

На рис. 1 представлены результаты расчетов зависимости требуемой акустической мощности по каждой из частот накачки от величины разностной частоты для обеспечения регистрации донных осадочных слоев на различных глубинах от поверхности дна: 5 м (кривые 7,8,9), 10 м (кривые 4,5,6) и 15 м (кривые 1,2,3). Расчеты проведены для диапазона разностных частот от 3 кГц до 30 кГц. Использовались три варианта параметрических антенн с центральной частотой накачки 100 кГц (кривые 3,6,9), 150 кГц (кривые 2,5,8) и 200 кГц (кривые 1,4,7). При этом параметры преобразователей накачки вы-

бирались такими, чтобы обеспечить ширину характеристики направленности на уровне минус 3 дБ по давлению в пределах 2 градусов. Размеры приемной антенны в каждом случае соответствовали размерам излучающей антенны накачки.

В качестве модели донного грунта выбрана двухслойная структура, первый слой которой представляет собой морские глинистые осадки с величиной плотности  $\rho = 1420 \text{ кг}/\text{м}^3$  и скоростью звука  $c = 1519 \text{ м}/\text{с}$ . В качестве второго слоя, верхнюю границу раздела которого необходимо зарегистрировать, предполагался слой морских песчаных осадков с плотностью  $\rho = 1560 \text{ кг}/\text{м}^3$  и скоростью звука  $c = 1552 \text{ м}/\text{с}$ . В соответствии с указанными параметрами вычислялись коэффициенты отражения и прохождения звука. Глубина места, используемая в расчетах энергетических характеристик, составляла 50 м.

Из приведенных кривых видно, что существует оптимальная область частот, в ко-

торой требуемая акустическая мощность по частотам накачки имеет минимальное значение. Причем в зависимости от глубины залегания донного слоя она находится в различном диапазоне частот. Чем больше глубина залегания слоя, тем на более низких частотах обеспечивается наиболее эффективное с точки зрения величины излучаемой мощности его обнаружение.

Результаты расчетов также показывают, что с целью минимизации излучаемой мощности необходимо снижать частоту накачки. Но поскольку уменьшение требуемой мощности происходит не пропорционально уменьшению частот накачки, то ряд факторов, таких как увеличение размеров и веса антенн, лимитирует снижение частот, ограничивая область оптимальных частот накачки, при которых требуемые характеристики обнаружения обеспечиваются при минимальной мощности.

Уровень необходимой акустической мощности зависит от типа донных осадочных

Рис. 1  
Частотные зависимости акустической мощности, необходимой для регистрации донных осадочных слоев

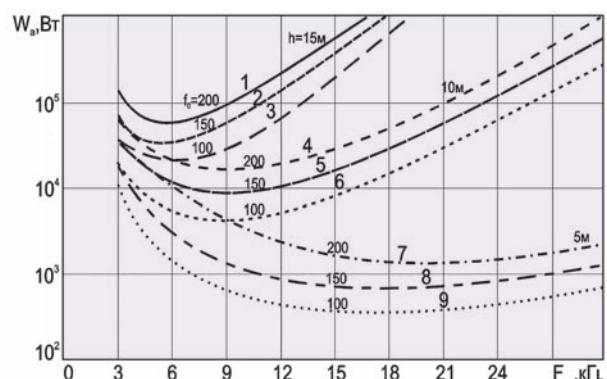
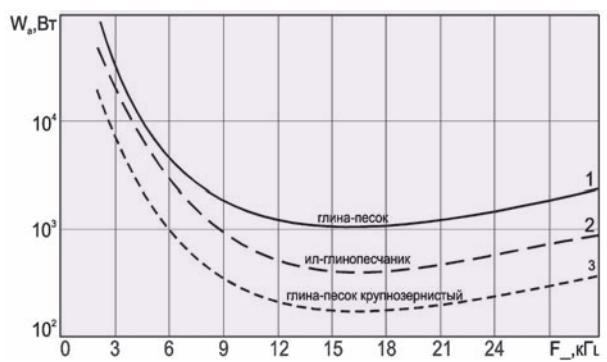


Рис. 2  
Частотные зависимости акустической мощности, необходимой для регистрации различных сочетаний донных осадков



структур, от соотношения их акустических характеристик. На рис.2 представлены частотные зависимости акустической мощности по частотам накачки, необходимой для регистрации границы раздела двух типов грунтов, находящейся на глубине 5 м, для различных сочетаний донных осадков. Кривые 1 и 3 построены при разных коэффициентах отражения и одинаковых коэффициентах затухания в грунте, т.е в предположении, что пятиметровый слой глинистых осадков с  $\rho=1420 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $c=1512 \text{ м}/\text{с}$  лежит над песчаными осадками с  $\rho = 1560 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $c=1552 \text{ м}/\text{с}$  (кривая 1) и над крупнозернистым песком с  $\rho = 2030 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $c=1836 \text{ м}/\text{с}$  (кривая 3). Чем больше коэффициент отражения границы раздела двух типов грунтов, тем меньшая величина акустической мощности требуется для достижения одинаковых характеристик обнаружения. Кривая 2 построена для случая регистрации глубинных океанических донных

структур, а именно - границы раздела между морским илом с  $\rho = 1370 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $c=1507 \text{ м}/\text{с}$  и песчано-глинистыми осадками с  $\rho = 1580 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $c=1578 \text{ м}/\text{с}$ , залегающей на пятиметровой глубине от поверхности дна. Различие в акустических со-противлениях системы донных слоев и изменение коэффициента затухания влияет на энергетические характеристики профилографа и несколько изменяет характер кривой.

Расчетные соотношения позволяют оценить потенциальные возможности профилографа донных осадков. На рис.3 представлены частотные зависимости коэффициента распознавания при стратификации двухслойной донной структуры для различной толщины первого осадочного слоя. Расчеты выполнены для водоема с глубиной 50 м. Параметрическая излучающая антenna, работающая на частотах накачки в районе 150 кГц, излучала сигналы разностной частоты длительностью

1 мс в диапазоне от 3 до 30 кГц. Ширина характеристики направленности на уровне минус 3 дБ составляла 2 град. в диапазоне разностных частот. Для уровня акустической мощности 1000 Вт по каждому каналу получены зависимости отношения сигнала/помеха при глубине слоя глинистых осадков 1-7 м (кривые 1-7 соответственно).

Рост уровня сигнала параметрической антенны с частотой, с одной стороны, и уменьшение сигнала с частотой за счет затухания в донном грунте, с другой, приводят к тому, что на кривых наблюдается оптимум. С увеличением глубины проникновения оптимальная частота, при которой отношение сигнал/помеха имеет наибольшее значение, снижается.

Прогнозировать потенциальные возможности профилографа и оценить диапазон частот, необходимый для работы в конкретной ситуации, позволяют зависимости отношения сигнала/помеха от глубины залегания интересующего слоя донных осадков. На рис.4 представлены зависимости коэффициента распознавания от глубины глинистого осадочного слоя, под которым находится песчаный грунт. Кривые рассчитаны для разностных частот 5, 10, 15, 20 кГц (кривые 1-4 соответственно). При небольших толщинах верхнего слоя (до 4-5 м) более высокие разностные частоты позволяют получить большее отношение сигнал/помеха с учетом амплитудно-частотной характеристики параметрического излучающего тракта. При увеличении глубины залегания границы раздела двух типов грунтов отношение сигнал/помеха снижается, причем более резко - на более высоких частотах.

Представленные зависимости позволяют определить оптимальные характеристики параметрического профилографа для разных типов донных

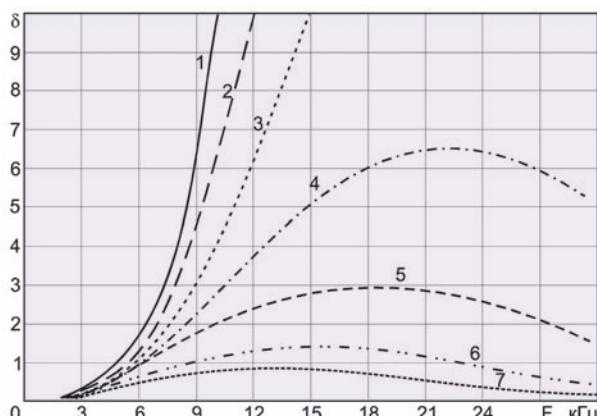


Рис.3  
Частотные зависимости коэффициента распознавания при стратификации двухслойной донной структуры

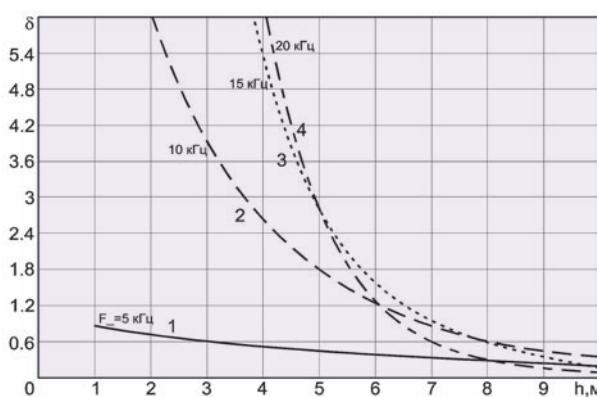


Рис.4  
Зависимость коэффициента распознавания от глубины осадочного слоя

осадочных структур и оценить энергетический потенциал в зависимости от параметров зондирующего сигнала, помеховой обстановки и акустических свойств донного грунта.

Традиционно энергию излучаемого сигнала повышают увеличением длительности излучаемого импульса, что приводит к увеличению соотношения сигнал/помеха на выходе приемной системы при оптимальной обработке сигналов. Это позволяет либо повысить дальность локирования, либо снизить мощность излучаемых сигналов. В параметрической антенне это актуально из-за низкой эффективности преобразования энергии. Однако для систем с параметрической антенной такой путь неприемлем, так как процесс генерации волн разностной частоты является амплитудно зависимым. Амплитудная характеристика параметрической антенны имеет квадратичную зависимость от амплитуды волн накачки, и снижение амплитуд волн накачки вдвое приведет к уменьшению амплитуды волн разностной частоты в четыре раза, в то время как увеличение энергии сигнала за счет длительности импульса приведет к такому же увеличению соотношения сигнал/шум.

При оптимальной обработке в профилографе узкополосных сигналов, например импульсных с тональным заполнением, произведение  $\sqrt{\Delta f \cdot T}$  близко к 1, поэтому соотношение сигнал/шум на выходе приемного тракта незначительно отличается от такого же соотношения на входе системы.

Иное дело – при использовании широкополосных сигналов с последующей их оптимальной обработкой согласованным с сигналом фильтром.

Для анализа энергетических характеристик гидролокационных систем с параметрическими антеннами, использующими

широкополосный излученный сигнал с большой базой, были рассчитаны зависимости отношения глубины локирования параметрической антенной объекта с эквивалентным радиусом цели, равным 0,1 м широкополосным сигналом с базой сигнала  $B = h_B$  и тональным сигналом  $- h_t$  от значения базы сигнала. Средняя разностная частота выбиралась равной 11 кГц, частота накачки – 150 кГц, ширина характеристики направленности антенны накачки – 3,5 градуса.

На рис.5 приведены эти зависимости для двух значений излучаемой мощности по накачке, кривая 1 соответствует мощности волн накачки 1 кВт, а кривая 2 – 2 кВт. Отношение сигнал/помеха на выходе согласованного фильтра принималось равным 3, приведенный уровень шумовой помехи  $P_{\text{ш}} = 0,025 \text{ Па}$ . Эти графики показывают, что с увеличением базы сигнала значительно

растет глубина локирования объектов, что согласуется с приведенной выше теорией. При этом показано, что при узкополосном сигнале (база сигнала равна единице) глубина локирования наименьшая при одном и том же значении мощности.

На рис.6 приведена зависимость отношения сигнал/шум на входе приемной антенны от базы сигнала при постоянном отношении сигнал/шум на выходе согласованного фильтра, которая показывает, что уверенный прием сигналов в эхолоте-профилографе с параметрической антенной со сложными сигналами может осуществляться при соотношении сигнал/шум на входе системы значительно меньшим единицы.

При локировании донных структур и объектов в грунте зависимость затухания акустических волн от частоты не позволяет использовать широкую полосу частот для формирова-

Рис.5  
Зависимость  
отношения глубины  
локирования объекта  
параметрическим  
локатором со сложным  
сигналом от значения  
базы сигнала при малых  
значениях базы

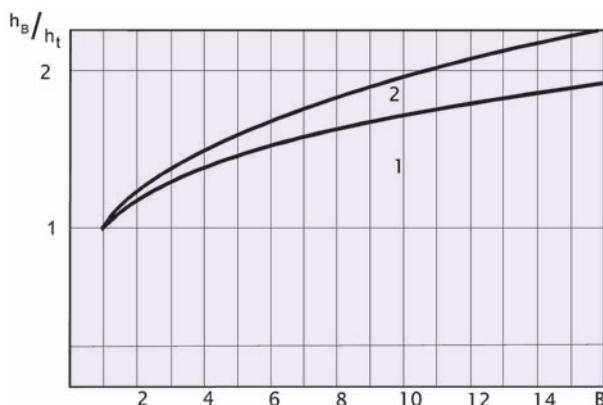
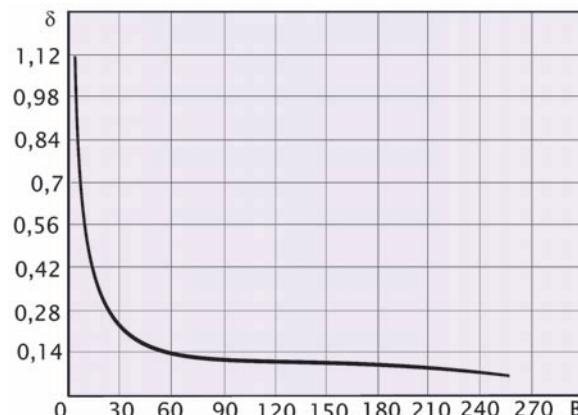


Рис.6  
Зависимость отношения  
сигнал/шум на входе  
приемной антенны  
от базы сигнала при  
постоянном отношении  
сигнал/шум на выходе  
согласованного фильтра



ния сложного сигнала, поэтому увеличение базы сигнала может проводиться путем увеличения длительности импульса при постоянной ширине полосы частот сигнала.

Расчеты показывают, что увеличение базы сигнала приводит к существенному снижению мощности, излучаемой антенной накачки для достижения одной и той же глубины локирования объекта с одинаковыми характеристиками.

### Интерферометрический гидролокатор бокового обзора

Для измерения рельефа дна в гидролокатор бокового обзора (ГБО) включают дополнительные каналы приема посредством дополнительного набора антенн в вертикальной плоскости. При этом обеспечивается измерение интерферометрическим способом дополнительного параметра – угла прихода эхо-сигналов с дальнейшим вычислением глубины. Подобные ГБО получили название «интерферометрический гидролокатор бокового обзора». Как правило, ИГБО имеет не менее трех каналов приема по каждому борту, при этом одна из антенн является приемо-передающей.

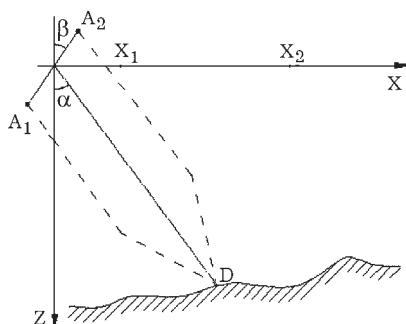


Рис.7. Положение акустического интерферометра при измерении рельефа дна.  $A_1, A_2$  – антенны интерферометра,  $\alpha$  - угол прихода отраженного сигнала,  $\beta$  - угол наклона антенн интерферометра,  $D$  - точка отражения сигнала,  $X_1, X_2$  – полоса съемки в направлении, перпендикулярном направлению движения носителя ГБО

На рис.7 показано в качестве иллюстрации измерение рельефа дна с помощью двух приемных антенн  $A_1$  и  $A_2$ , находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга.

В процессе локации зондирующий сигнал отражается от дна (точка  $D$ ) и принимается обеими антеннами. При этом разность фаз сигналов, регистрируемых в приемных каналах антенн  $A_1$  и  $A_2$ , определяется соотношением

$$\Delta\phi = (2\pi d/\lambda)\cos(\beta+\alpha)+\Delta\phi_0, \quad (9)$$

где  $d$  – база интерферометра (расстояние  $A_1A_2$ );  $\lambda$  – длина волны излучаемого акустического сигнала;  $\Delta\phi_0$  – аппаратная разность фаз сигналов в приемных каналах антенн  $A_1$  и  $A_2$ ;  $\beta$  – угол отклонения интерферометра от вертикали;  $\alpha$  – угол прихода отраженного сигнала, определяемый соотношением

$$\alpha = \arccos(2z/vt), \quad (10)$$

здесь  $z$  – глубина в точке отражения сигнала;  $v$  – скорость звука в воде;  $t$  – время прохождения сигнала от излучателя до морского дна и обратно до приемной антенны.

Вычисление разности фаз эхо-сигналов производится по измерениям фазы коэффициента взаимной корреляции эхо-сигналов с выхода двух каналов приема.

Соотношения (9) и (10) дают возможность определить глубину  $z$  по измерениям разности фаз  $\Delta\phi_i$  и времени прихода  $t_i$  отраженного сигнала.

При независимой записи сигналов, когда для каждой из приемных антенн регистрируются реальная ( $Re$ ) и мнимая ( $Im$ ) компоненты принимаемого сигнала, двухантенный интерферометр реализуется программно. Для мультиплексивного интерферометра (интерферометр с перемноже-

нием сигналов) отсчеты интерферометрической фазы  $\Delta\phi$  могут быть вычислены по формуле

$$\Delta\phi = \text{arctg}[(Re_2 Im_1 - Re_1 Im_2) / (Re_1 Re_2 + Im_1 Im_2)], \quad (11)$$

где  $Re_1, Im_1, Re_2, Im_2$  – реальные и мнимые компоненты сигналов, регистрируемых соответственно антеннами  $A_1$  и  $A_2$ .

Отсчеты времени  $t_i$ , соответствующие принятым сигналам, вычисляются по формуле

$$t_i = T_{\text{излучения}} + T_{\text{паузы}} + \Delta t \cdot i, \quad (i = 0, 1, \dots, N), \quad (12)$$

где  $\Delta t = 1/F_{\text{оцифровки}}$ .

Здесь  $i$  – номер отсчета в строке данных принятого сигнала (строка данных соответствует одному циклу излучения и приема сигнала),  $T_{\text{излучения}}$  – время излучения сигнала,  $T_{\text{паузы}}$  – время паузы,  $F_{\text{оцифровки}}$  – частота оцифровки сигнала.

Качество получаемых данных с помощью ИГБО оценивается разрешением по соответствующим координатам. При этом рассматривается разрешение вдоль линии распространения сигнала (по дальности) и вдоль линии движения носителя антенн гидролокатора.

Как известно, разрешение по наклонной дальности  $\Delta r$  определяется параметрами зондирующего сигнала – его полосой  $\Delta f$ :

$$\Delta r = C/2 \cdot \Delta f,$$

где  $\Delta f$  – полоса сигнала,  $C$  – скорость акустической волны в воде.

При этом следует иметь в виду, что разрешение по горизонтальной дальности  $\Delta x$  (вдоль оси  $X$ ) определяется соотношением  $\Delta x = \Delta r / \sin \alpha$ .

Именно эта величина определяет точность привязки по горизонтальной оси отсчетов яркости и глубин.

Разрешение вдоль линии движения носителя антенн гидролокатора  $\Delta y$  при использовании линейных антенн (или угловое разрешение) определяется углом раскрыва антенны в этой плоскости  $\Theta^0$ :

$$\Delta y = S \cdot \Theta^0 = S \cdot 50,8 \frac{\lambda}{D},$$

где  $D$  – размер апертуры антенн в горизонтальной плоскости,  $S$  – дальность,  $\lambda$  – длина волн.

Как следует из формулы, величина разрешения вдоль линии движения зависит от расстояния до отражающей поверхности. Так, на частоте 250 кГц при диаграмме направленности антенн в горизонтальной плоскости 1 градус разрешение в этой плоскости на расстоянии 100 м составит примерно 1,6 м.

Что касается разрешения в вертикальной плоскости, то, как следует из выше приведенных формул, оно определяется в том числе и величиной базы: чем больше эта величина, тем выше разрешение.

Традиционно в ГБО в качестве зондирующего сигнала применяется короткая тональная посылка. Подобные гидролокаторы составляют на сегодня подавляющее большинство. Однако использование данного сигнала существенно ограничивает характеристики гидролокатора. В первую очередь это касается таких характеристик, как дальность действия и помехоустойчивость. Здесь также следует отметить и повышенные требования к линейности и динамическому диапазону приемного тракта такого гидролокатора.

Для улучшения характеристик гидролокатора в качестве зондирующего сигнала в некоторых моделях гидролокаторов используется и сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Экспериментально показано, что применение данного сигнала позволяет при сохранении разрешения вдоль

линии движения носителя существенно увеличить дальность действия гидролокатора в несколько раз. Так, применение ЛЧМ сигнала позволило увеличить дальность действия ИГБО «Неман» на рабочей частоте 500 кГц в три раза и довести ее до 190 м при разрешении по наклонной дальности 1 см.

Но использование ЛЧМ-сигнала в ИГБО, впрочем как и в ГБО, имеет свои особенности, связанные с особенностями ЛЧМ-сигнала, заключающейся в том, что при появлении в эхо-сигнале доплеровского смещения частоты происходит ошибка в измерении дальности. Поэтому необходимо принимать соответствующие меры для исключения данного эффекта.

В заключение следует сказать еще об одной особенности применения ИГБО, смысл которой состоит в следующем. Согласно принципу бокового обзора в вертикальной плоскости не производится селекция по углу. Эта особенность приводит к тому, что если приходят два эхо-сигнала с одинаковой задержкой, но под разными углами, то они не будут разделены. Такие ситуации приводят к неоднозначности измерения рельефа дна.

Для устранения данного эффекта следует применять как дополнительные технические решения, так и особые алгоритмы обработки эхосигналов.

## ■ Аппаратурная реализация

Поскольку в состав гидроакустической системы поиска входят параметрический донный профилограф высокого разрешения и ИГБО, то задача управления гидроакустической системой с технической точки зрения может быть решена более оптимальным образом, если оба гидролокатора позиционируются как единый модуль.

Структурная схема гидроакустической системы поиска показана на рис. 8.

В состав структурной схемы гидроакустической системы поиска входят:

- блоки антенн ИГБО левого и правого бортов, двухканальная антenna накачки параметрического донного профилографа,
- модули усилителей мощности (МУМ),
- модули приема и формирования сигналов (МПФС),

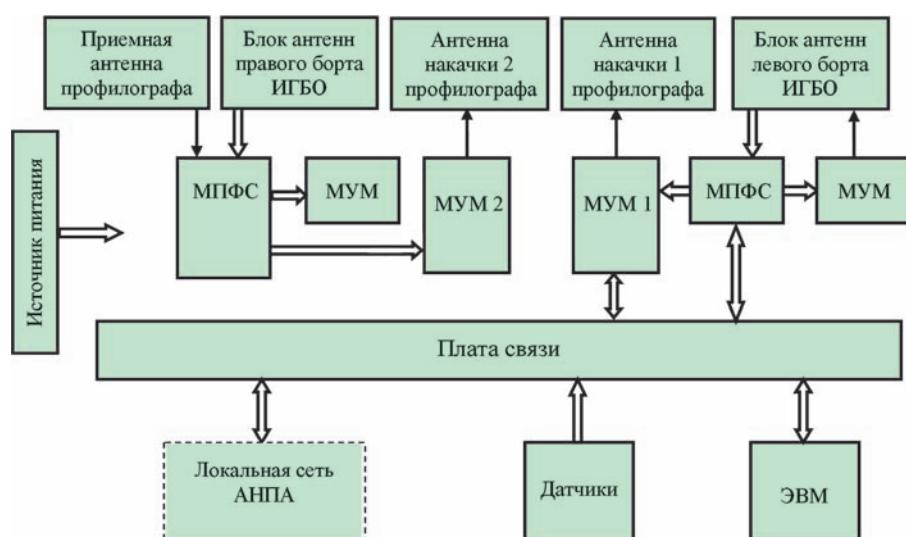


Рис. 8. Структурная схема гидроакустической системы поиска для АНПА в составе параметрического донного профилографа и гидролокатора бокового обзора

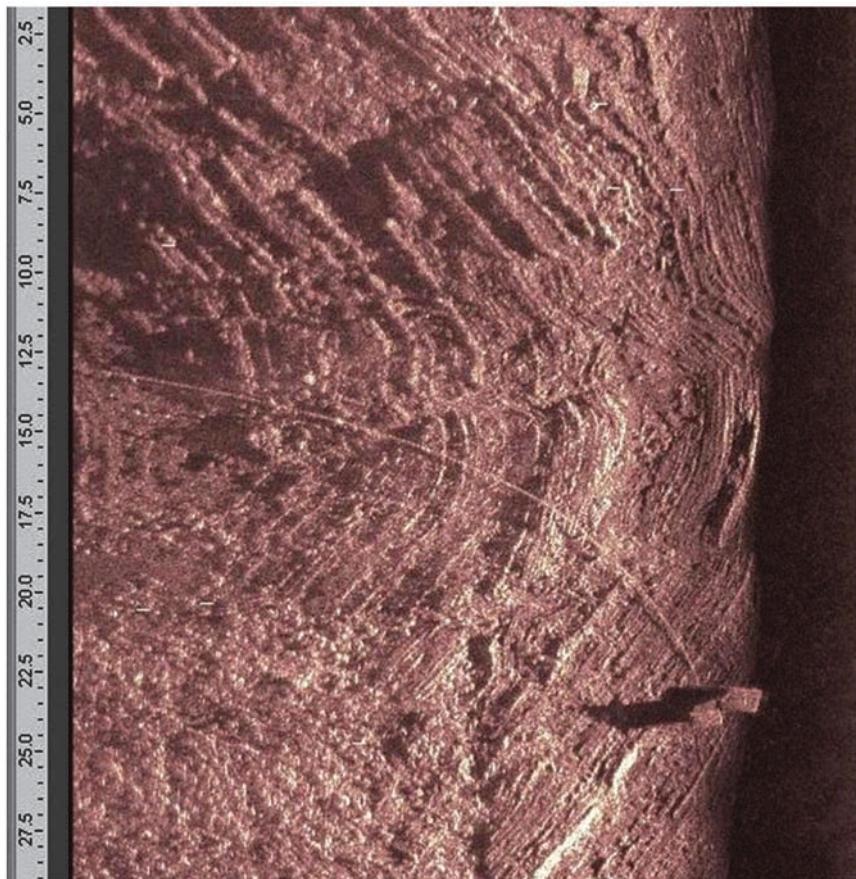


Рис.9. Акустическое изображение поверхности дна с цепью, полученное на частоте 240 кГц

- модуль интерфейса,
- ЭВМ,
- датчики курса, дифферента и GPS,
- источник питания.

крен-

- В состав МПФС входят:
- тракты приема каналов усиления для каждой приемной антенны с преобразованием аналоговых сигналов с помощью АЦП в цифровой вид,

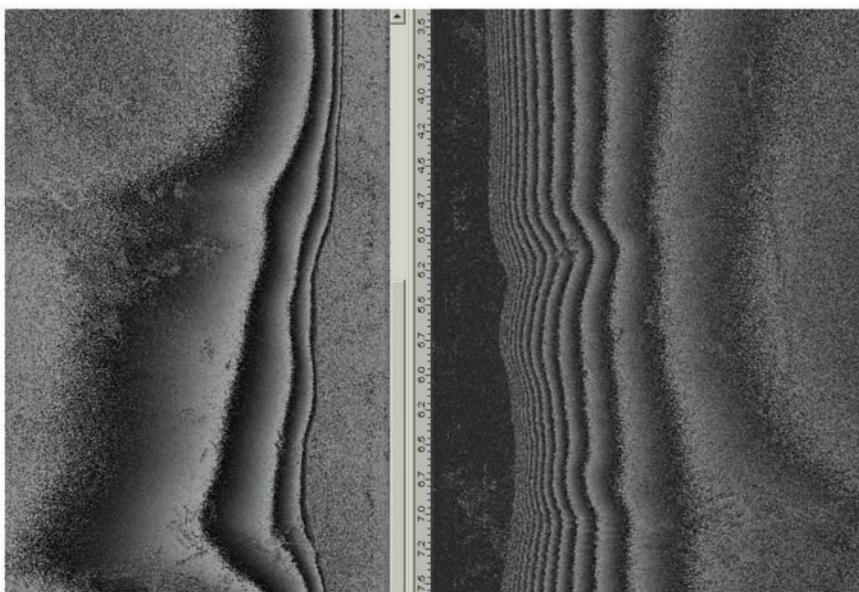


Рис.10. Интерференционные линии для разных баз

- генераторы зондирующих сигналов для ИГБО и донного профилографа,
- формирователи импульсных последовательностей для работы каналов приема,
- схемы упаковки данных с каждого канала в единый поток.

Упакованные данные через модуль интерфейса по цифровой линии связи поступают в ЭВМ, где производятся архивирование данных и их обработка в реальном времени с выводом на экран монитора.

Зондирующие сигналы с выхода МПФС поступают в МУМ соответствующего канала и излучаются излучающей антенной в окружающее пространство. Синхронизация работы обоих бортов в данной схеме достигается выбором одного из МПФС ведомым, а другого – ведущим.

В МПФС генераторы зондирующего сигнала, формирователи импульсных последовательностей для работы каналов приема и упаковка данных с выхода каждого канала приема в единый поток реализованы на ПЛИСе.

Данные с выходов датчиков поступают в ЭВМ, где архивируются вместе с данными с выходов МПФС.

## ■ Экспериментальные исследования

Некоторые результаты исследований, проведенных в натурных условиях, представлены ниже.

На рис.9 приведено акустическое изображение участка дна, полученное с помощью ИГБО на частоте 240 кГц на малых глубинах при использовании в качестве зондирующего сигнала короткой тональной посылки.

Носитель антенн гидролокатора двигался снизу вверх, а условная линия движения судна проходит справа. В верхней части рисунка, по горизонтали,

отложена наклонная дальность. На полученном изображении явно видно (по теням и по изменению глубины в подлокаторной точке), что поверхность дна неровная, а минимальная глубина составляет около 6 м (с учетом заглубления антенны). Акустическое изображение характеризуется высокой детальностью и подтверждает высокое разрешение гидролокатора. Так, на приведенном рисунке отчетливо видна цепь, прикрепленная к блокам.

Применение ИГБО позволяет, используя встроенное в макеты ПО, проводить планшетную интерпретацию результатов и построить трехмерную структуру поверхности дна.

В процессе проведения съемки с помощью ИГБО можно осуществлять в реальном времени контроль работы фазовых каналов посредством вывода на экран монитора интерференционных линий, пример которых для разных баз показан на рис.10.

Точное же построение рельефа дна и трехмерного его изображения производится в процессе вторичной обработки. На начальном этапе с помощью программного обеспечения гидролокатора производятся расчет глубин с использованием данных, полученных на разных галсах, и их объединение в единый массив.

На рис.11 приведено совмещенное акустическое изображение поверхности дна с рельефом

дна, показанным в виде изобат, проведенных через 1м, а на рис.12 – рельеф дна в виде цветового клина и наложенных на него изобат. Данные изображения также получены с помощью штатного программного обеспечения (ПО) гидролокатора.

В процессе вторичной обработки возможны и другие операции, некоторые из которых показаны на рис.13 и 14.

На рис.13 приведен пример выкладки на планшет акустического изображения поверхности дна.

На рис.14 приведено трехмерное изображение поверхности дна, полученное после обработки собранных с помощью штатного ПО массивов программой Surfer.

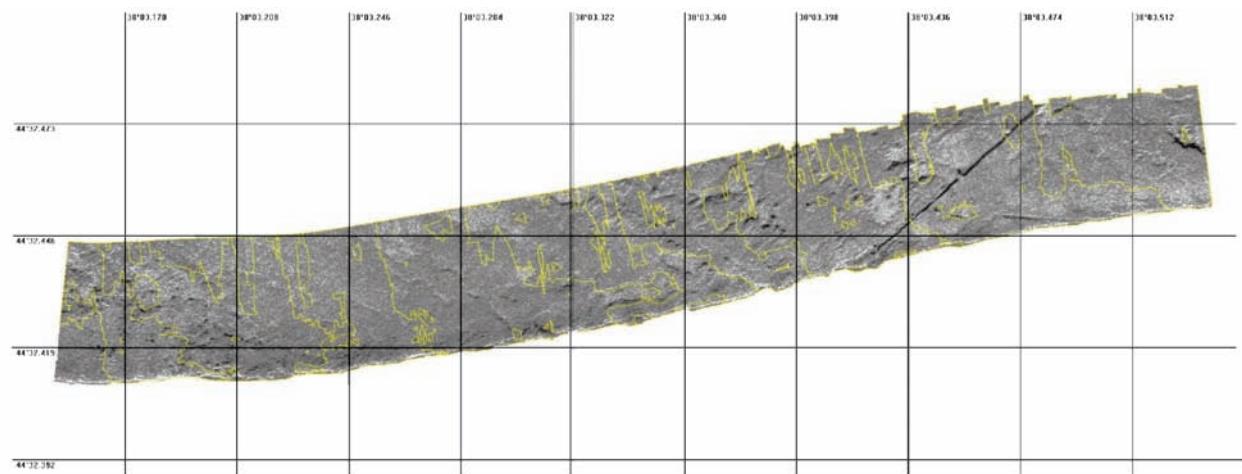


Рис.11. Пример выкладки на планшет совмещенного акустического изображения и батиметрии в виде изобат

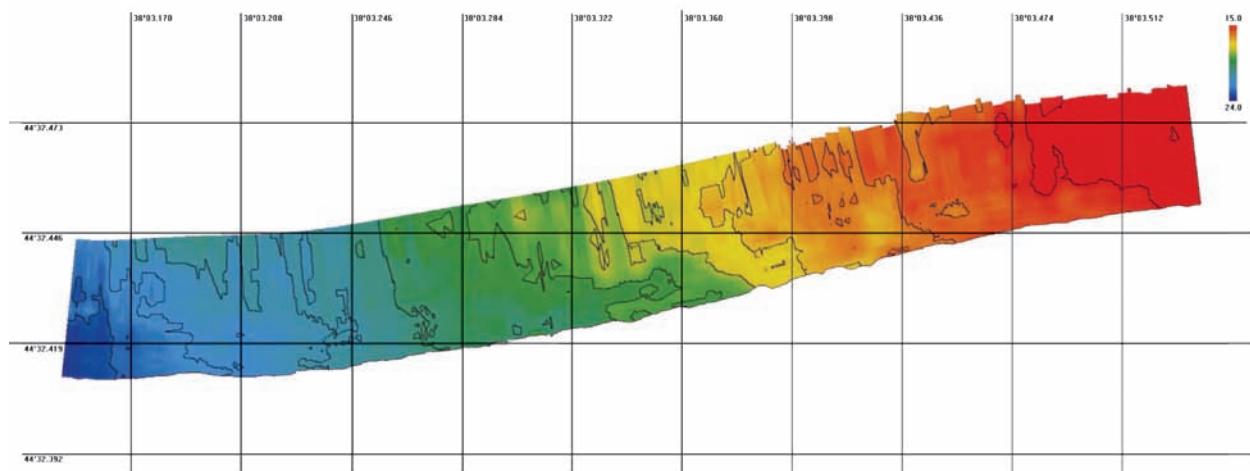
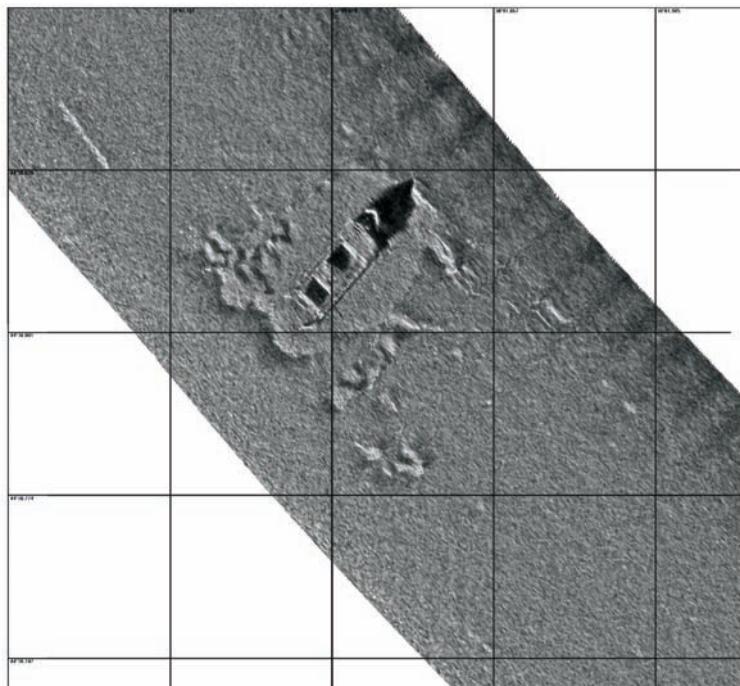
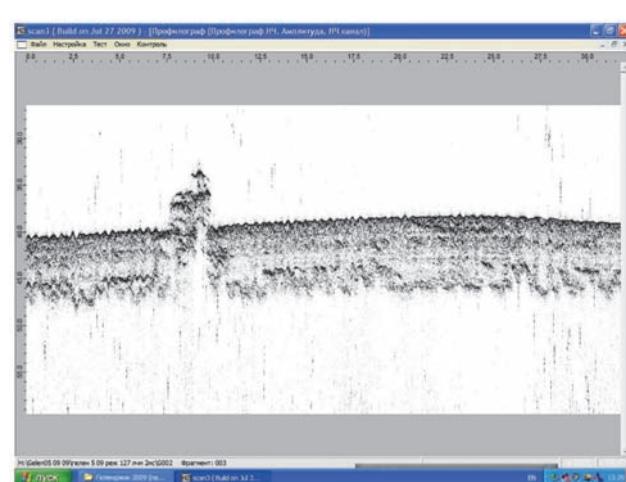
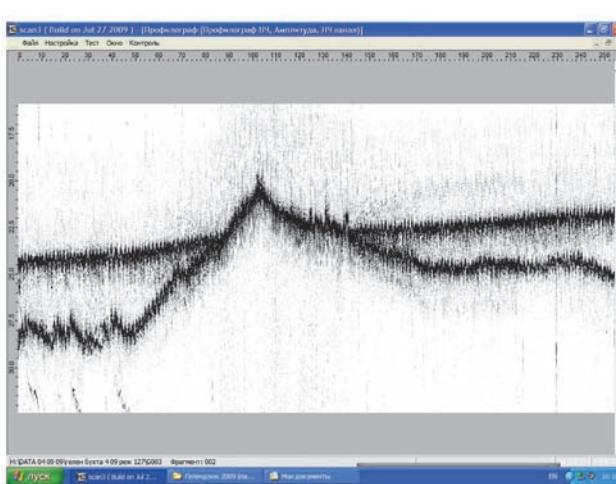
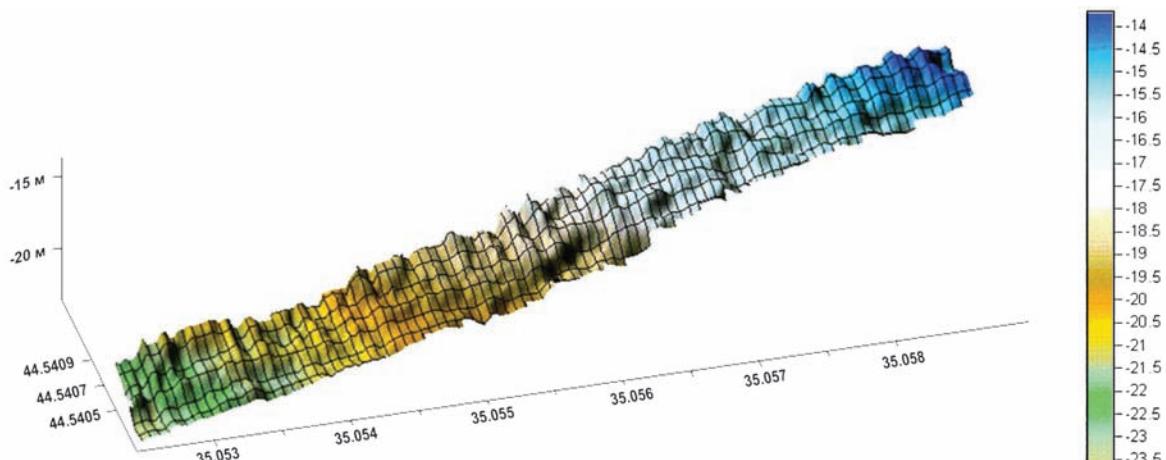


Рис. 12. Пример выкладки на планшет рельефа дна в виде цветового клина и изобат



Для оценки потенциальных возможностей параметрического донного профилографа проводились экспериментальные исследования по профилированию донных осадков параметрическим профилографом в тех же районах.

На рис.15-17 приведены эхограммы дна и донных осадков в районе Геленджика (Черное море), полученные с помощью макета параметрического профилографа с частотой накачки 145 кГц с использованием линейной частотной модуляции разностного сигнала в диапазоне 7–15 кГц. На рисунках приведены: эхограмма участка дна и осадков с выступающей из осадков скалой и эхограмма дна, слоев донных осадков и затонувшего судна, очертания которого показаны на планшете (рис.13).



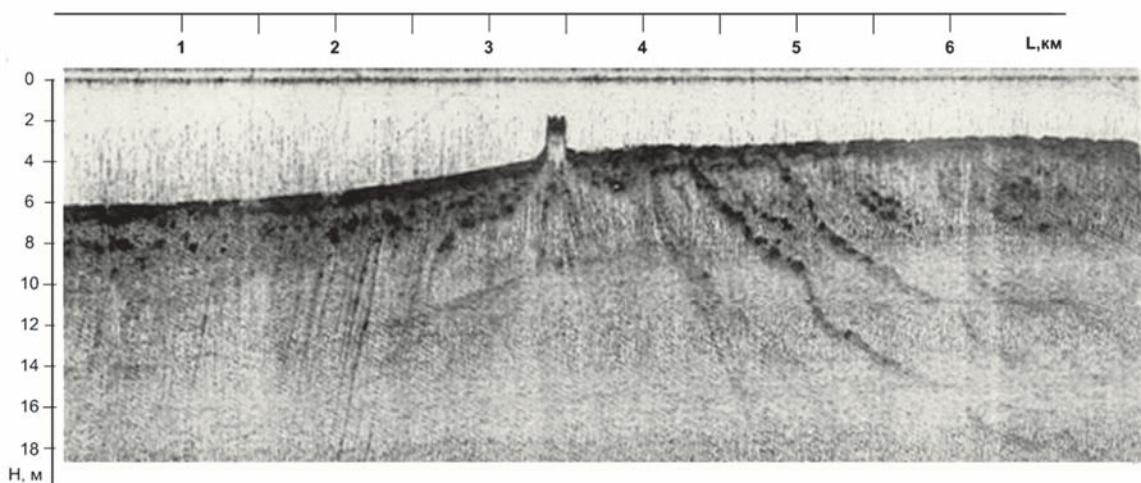


Рис.17. Эхограмма дна и донных осадков. Глубина под антенной от 1,5 до 6 м

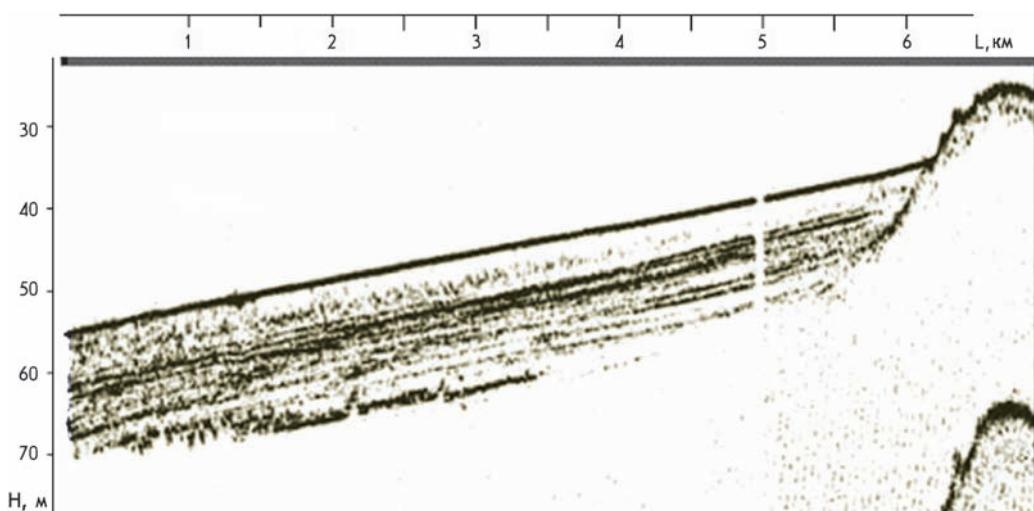


Рис.18. Профилограмма структуры верхнего слоя донных осадков.  
Геленджик. Черное море

При использовании параметрического профилографа в составе АНПА важно, чтобы параметрическая антenna была сформирована на как можно меньшем расстоянии от излучающей антены накачки для работы непосредственно вблизи поверхности морского дна. На рис.15 приведена эхограм-

ма дна и донных осадков, демонстрирующая возможность работы параметрического профилографа в случае, когда дно находится на расстоянии менее 1,5 м от излучающей антены накачки.

Анализ профилограммы (рис.17, 18) показывает, что использованные параметры обе-

спечили разрешение по дистанции 10 см, что существенно для разрешения тонкой структуры верхнего слоя донных осадков и поиска объектов, находящихся в верхнем слое осадков. Глубина профилирования (более 20 м) показывает высокую энергетическую способность профилографа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин В.А., Тараков С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. 400 с.
2. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тараков С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2007. 448 с.
3. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.