



# Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9  
İyun  
June 2005  
Июнь

səhifə  
page 657-662  
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

## К ВОПРОСУ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНОЙ СРЕДЫ

НИЗАМОВ Т.И.

*Азербайджанская Национальная Авиационная Академия*  
e-mail: [telmaninayat@yahoo.com](mailto:telmaninayat@yahoo.com)

В статье рассматривается методика организации гидроакустического мониторинга шельфовой зоны, приводится математическая модель процесса распространения акустической волны в водной толще, показана необходимость проведения амплитудной и геометрической коррекции изображений дна и объектов на нем для устранения искажений, вносимых специфическими особенностями водной толщи и строением дна, приводится методика автоматического определения угла наклона дна к горизонту и определения скорости судна – буксировщика. Также обоснована и экспериментально проверена методика коррекции искажений изображений структуры и состава осадочного слоя в реальном масштабе времени.

В настоящее время изучение проблем водных ресурсов Земли и бурное развитие морской нефтедобычи настоятельно требует совершенствования и развития соответствующей инфраструктуры, то есть проведения все большего объема работ непосредственно в водной толще, в том числе по изучению морского дна. К таким работам относятся площадные съемки участков дна, выявление сооружений и коммуникаций на этих участках, обнаружение геологических аномалий, определение параметров донных грунтов, нижележащих слоев, работы по обеспечению безопасной навигации, аттестации дна, инженерной геологии, экономики народного хозяйства, рыбного хозяйства, экологии моря и т.д.

Освоение морского дна ведется с надводных платформ, иногда связанных эстакадами, подводными водо-, газо-, нефтепроводами, силовыми электрическими кабелями. Строительство платформ и эстакад, прокладку всех подводных коммуникаций нельзя осуществлять без тщательного изучения осваиваемого участка, его рельефа, структуры и глубины осадочных пород, морских течений и т.д. Особый интерес представляет определение мест выхода коренных пород при проведении разведочного бурения. Не менее важно обследование уже построенных сооружений в ходе их эксплуатации - это в первую очередь оценка состояния трубопроводных коммуникаций, обнаружение оголенных участков труб, утечки транспортируемого продукта, оценка размеров провисания трубопроводов, их сдвига от первоначального положения и т.п.

Поскольку многие процессы на поверхности моря напрямую зависят от рельефа дна, то всестороннее изучение рельефа, в том числе состава верхней осадочной толщи грунта дна – не менее актуальная задача. Особую значимость все эти задачи приобретают на Каспии, принимая во внимание уникальность его флоры и фауны. Выполнение всех перечисленных выше задач обуславливает разработку и создание информационной системы для мониторинга водной среды.

Наибольшее распространение в мировой практике получило проведение обследования морского дна и водной толщи зондированием их акустическими (звуковыми и ультразвуковыми) волнами. Это связано с тем, что из всех видов известных излучений (оптического, электромагнитного и т.д. диапазонов) акустическое обладает наибольшей дальностью распространения и наименьшим затуханием (потерями) в водной среде.

Синхронное применение гидроакустического зондирования и космической съемки позволяет совершенствовать не только алгоритмы дешифровки получаемых данных, но и первичную аппаратуру дистанционного зондирования, используемую в аэрокосмических наблюдениях. Важную роль приобретают при этом морские тестовые участки, которые создаются в местах с наиболее характерными признаками как природного, так и искусственного происхождения. Это могут быть выходы на поверхность дна полезных ископаемых, грифоны, подводные вулканы, геологические аномалии, водо-, нефте-, газотрубопроводы, силовые кабели, свалки строительного мусора и т.п. Четкая и

однозначная дешифровка данных объектов на морских тестовых участках позволяет трансформировать накопленный опыт на все ранее перечисленные задачи, а также осуществлять наладку новых систем дистанционного наблюдения.

Извлечение достоверной информации вне зависимости от отражающей способности объектов наблюдения и их дальности от источника излучения является одной из важнейших характеристик. При этом следует учитывать значительную помехозависимость уровня принимаемого эхо-сигнала от специфического изменения физико-химических характеристик водной среды, а также необходимость проведения периодически повторяющегося мониторинга (особенно при контроле за эксплуатируемыми подводными сооружениями) на значительных площадях. Все это предполагает наличие мобильного компактного гидроакустического информационно-вычислительного комплекса (ГАИВК), обеспечивающего маневренность и эффективность съемки на участках моря с близко расположенными нефтегазодобывающими платформами. В состав комплекса включены гидролокатор бокового обзора, предназначенный как для снятия рельефа морского дна, так и для обнаружения и контроля состояния подводных объектов, и профилограф, предназначенный для получения информации о структуре верхней осадочной толщи дна, а также обнаружения заиленных объектов и прочих аномалий как естественного так и техногенного происхождения.

Специфические особенности водной толщи — это изменения физико-химических характеристик (плотность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения, растворимость и т.д.) в зависимости от температуры и давления. Этим определяется образование аномальных зон в толще воды. При прохождении границы раздела зон с различными свойствами акустический луч может менять направление за счет преломления, может меняться его интенсивность за счет рассеяния, поглощения и т.д. Другими словами - водная толща представляет собой среду, в которой границы изменения характеристик распределены по случайному закону и поэтому решение задачи распространения луча является математическим ожиданием решения стохастической задачи. Из-за своей сложности эта задача в общем виде не решена. В мировой практике имеется ряд частных решений, полученных при введении тех или иных допущений и приближений. Водная среда может быть представлена как среда с распределенными параметрами, а распространение акустической волны в водной среде - в виде передачи электрического напряжения по линии с распределенными параметрами.

Для решения этой задачи необходимо проведение следующих операций:

- Нахождение электрической аналогии процесса распространения звука в водной среде;
- Моделирование распределения звука по глубине с учетом регулярных параметров, а также случайных явлений;

- Выбор или разработка численного метода решения задачи, который обеспечивает оптимальную передачу напряжения по электрической линии с распределенными параметрами в эквивалентной неоднородно слоистой среде;
- Исследование на разработанной модели распространения различных форм сигнала с целью выбора оптимальной формы для системы гидролокации.

Эквивалентная электрическая схема для среды с распределенными параметрами может быть представлена в виде рис 1.

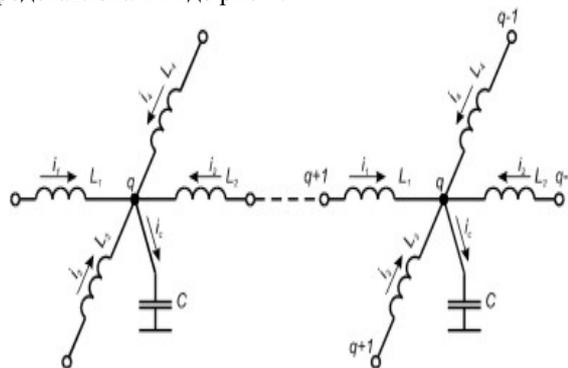


Рис.1 Эквивалентная электрическая схема среды с распределенными параметрами.

Используя закон Кирхгофа, можно составить систему уравнений изменения напряжения в изучаемой цепи с учетом допущений:

- морская среда состоит из ряда слоев, которые не перемешиваются, не перемещаются, отражение акустической волны и диффузия между ними отсутствуют;
- скорость звука в каждом отдельном слое постоянна;
- соленость и температура воды в зависимости от глубины меняются по экспоненциальному закону [1]

$$S = 8 + 35(1 - e^{\ln 0,2286 - H/z}) \quad (1)$$

$$T = 30e^{\ln 0,1333H/z}$$

Решение данной системы имеет вид:

$$\frac{d^2 U_q}{d\tau^2} = U_{q+1} - 2U_q + U_{q-1} \quad (2)$$

где  $q$  – номер слоя. Тогда для колебательной скорости звука  $v_q$  в водной среде:

$$\frac{d^2 v_q}{d\tau^2} = v_{q+1} - 2v_q + v_{q-1} \quad (3)$$

Математическая модель процесса распространения акустической волны в водной среде позволяет рассчитать траекторию луча, провести исследование оптимальной формы импульса зондирующей посылки, его интенсивности, частоты и длительности.

При расшифровке отраженного сигнала модель дна рассматривается в виде статистических неровностей границы раздела двух сред: вода – грунт. В связи

с большим разнообразием и сложным характером неровностей при обработке используются приближенные методы, одним из которых является метод малых возмущений. При выборе модели дна, на основании которой производится расчет рассеянного поля, весьма важна идентификация грунта жидкой или твердой средой. Решению этой задачи в значительной степени способствует предлагаемая классификация осадочного слоя в реальном масштабе времени по таблице 1, в которой первые три класса можно считать жидкой средой с распространением только продольной волны падающего акустического колебания. Остальные классы следует рассматривать как твердую среду, в которой имеют место как продольные, так и поперечные волны. В этом случае мощность излучения определяется исходя из основного уравнения гидролокации [2, 3]:

$$P = \frac{4\pi R^4 e^{2\beta R} U_{\Pi} \eta}{m_s S M D^2 V^2} \quad (4)$$

где R- наклонная дальность до рассеивающего участка, S- площадь сечения участка,  $\beta$ - коэффициент поглощения в воде,  $U_{\Pi}$  - напряжение шума на выходе антенны, M - чувствительность антенны в режиме приема,  $m_s$  - коэффициент обратного рассеяния, D - характеристика направленности антенны, V - коэффициент концентрации,  $\eta$  - отношение сигнал/шум.

Табл.1 Классификация грунтов

№ грунта	Плотность осадков, кг/м <sup>3</sup>	Пористость, Ф	Компоненты осадка	Фракции
1	1020-1420	0,98-0,9	Ил, глина	Ø0,01мм - 65%
2	1420-1780	0,9-0,8	ил, глина	Ø0,05мм - 41,6% Ø0,01мм - 38,7%
3	1780-2050	0,8-0,7	ил, глина, песок	Ø0,01мм - 15,3% Ø0,05мм - 46,7% Ø0,1мм - 38%
4	2050-2240	0,7-0,6	ил, глина, песок	Ø0,01мм - 8,1% Ø0,05мм - 37,3% Ø0,1мм - 54%
5	2240-2390	0,6-0,5	глина, песок	Ø0,05мм - 22,4% Ø0,1мм - 73%
6	2390-2510	0,5-0,4	глина, песок	Ø0,05мм - 7,5% Ø0,1мм - 50,1% Ø1,0мм - 32,8%
7	2510-2600	0,4-0,3	глина, песок	Ø0,05мм - 2,4% Ø0,1мм - 59,6% Ø1,0мм - 36%
8	2600-2660	0,3-0,2	глина, песок	Ø0,05мм - 1,7% Ø1,0мм - 63%
9	2660-2690	0,2-0,1	песок	Ø0,1мм - 37% Ø1,0мм - 58%
10	2690-2720	0,1-0,05	песок	Ø0,1мм - 22,4% Ø1,0мм - 73%

Интенсивность обратного рассеяния (см. рис.2) в точке приема определяется из выражения для эхосигнала:

$$I_S = \frac{P_A D V m_s S}{4\pi R^4 e^{2\beta R}} \quad (5)$$

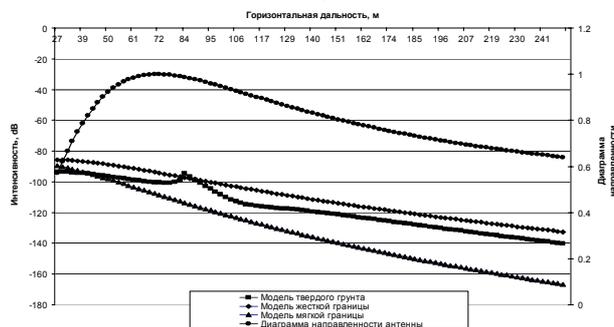


Рис. 2. Интенсивность обратного рассеяния и диаграмма направленности

Разработанный и изготовленный комплекс включает в себя:

- гидролокатор бокового обзора (ГБО), обеспечивающий использование как посредством буксировки за кормой судна, так и с помощью выносного устройства с носа или с любого из бортов судна;
- буксируемый за судном профилограф.

Комплекс позволяет обеспечить нормальную эксплуатацию его как в автономном режиме, так и в составе подспутниковой автоматизированной системы сбора, обработки и передачи данных. В комплексе реализовано сохранение на жестком и лазерном дисках принятых эхо-сигналов в цифровой форме, что позволяет в дальнейшем произвести обработку данных в центре обработки данных, а при необходимости передать их по каналам связи. Комплекс, в отличие от известных позволяет получать достоверную информацию о поверхности дна, наличии и состоянии естественных и техногенных аномалий в водной среде. В табл.2 приведены технические характеристики ГАИВК.

Табл.2 Характеристики ГАИВК.

Параметр	ГБО	Профи лограф
Длина полосы обзора, м	600	—
Глубина проникновения, м	—	30
Рабочая частота, кГц	130	20
Разрешающая способность, м	0,5	0,1
Угол обзора в горизонтальной плоскости, град.	1,0	7
Угол обзора в вертикальной плоскости, град.	45	7
Глубина погружения носителя, м	10±100	10±100
Скорость буксировки, узлы	3÷6	3÷6
Потребляемая электрическая мощность, ВА	500	1500
Вес, кг	20	50

Для повышения маневренности при повороте судна предусмотрено заглубление носителя гидроакустических антенн при помощи выносного устройства с одного из бортов судна. Это же позволяет менять угол наклона оси диаграммы направленности антенны относительно вертикали. Антенна выполнена в виде линейной решетки, состоящей из параллельно соединенных пьезокерамических элементов. Длина линейки определяется целевым назначением системы в целом, разрешающей способностью и полосой обзора. При конструировании антенны расстояние между элементами было рассчитано с целью уменьшения амплитуды боковых лепестков. Для заливки пьезоэлектрических элементов используется оригинальный состав заливочного компаунда [4], обеспечивающего повышение удельного сопротивления, понижение диэлектрической проницаемости, расширение интервала рабочих температур, повышение антикоррозионной стойкости, улучшающего герметизацию и изоляцию антенн. Помимо этого, составляющие компаунда легкодоступны и экономичны.

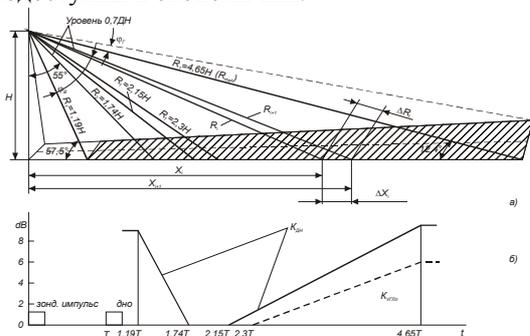


Рис. 3. Участок дна и временные диаграммы программ коррекции

В отраженном сигнале вследствие неравномерности диаграммы направленности антенны и изменения силы обратного рассеяния при изменении угла скольжения акустического луча возникают амплитудные искажения. Это, в свою очередь, приводит к геометрическим искажениям при составлении плана поверхности дна по имеющимся эхограммам. Поэтому в принимаемый сигнал на входе приемного тракта вводится изменяющаяся по времени коррекция. Величина коррекции, как уже отмечалось выше, определяется высотой носителя над уровнем дна. На рис.3 приведены участок дна и временные диаграммы программ коррекции, где  $K_{угл}$  и  $K_{дн}$  - соответственно, поправочные коэффициенты при угловой коррекции и при коррекции по диаграмме направленности,  $T$  - интервал времени между зондирующим и донным импульсами,  $R$  - наклонная дальность. Интервал времени  $1,19T$  характеризует начало зоны обзора гидролокатора,  $4,65T$  - конец этой зоны,  $1,74T$  и  $2,15T$  - начало и конец зоны, соответственно, где чувствительность антенны максимальна.

Для коррекции геометрических искажений каждый элемент любой строки входного изображения

должен выводиться на регистраторе в определенной позиции. Участок отображения  $i$ -го отсчета на изображении шириной  $W$  рассчитывается по выражению

$$X_i = \frac{W}{N \cos \alpha_{\min}} \sqrt{i^2 (1 - \sin^2 \alpha_{\min}) + 2iN \sin \alpha_{\min} (1 - \sin \alpha_{\min})} \quad (6)$$

где  $N$  - число отсчетов в строке,  $\alpha_{\min}$  - минимальный угол скольжения.

Приведенное соотношение справедливо при ровном дне, параллельном горизонту. Если же дно имеет наклон к горизонту, то для определения параметров коррекции необходимо найти реальные значения угла наклона  $\beta$ , горизонтальной дальности  $L$  и наклонной дальности  $R$  для соответствующей точки дна [5].

Следует отметить, что при движении судна вдоль направления уклона сигналы с обоих бортов примерно равны. Если же судно движется поперек направления уклона, то сигнал по одному борту больше, а по другому меньше. Т.е., один угол можно считать положительным, а другой - отрицательным. В этом случае полосы обзора с разных бортов будут различной величины

Схема последовательного образования зон обзора представлена на рис.4, где система координат расположена так, чтобы ось  $x$  была параллельна горизонту, ось  $y$  совпадала с направлением движения судна, а ось  $z$  - с высотой буксируемого аппарата над уровнем дна.

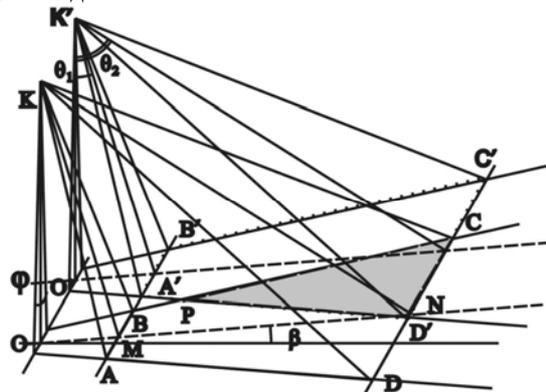


Рис. 4. Схема образования зон обзора при движении носителя антенн

Очевидно, что зона обзора имеет форму трапеции. Обозначив координаты точки  $M(x_M, y_M, z_M)$ , а точки  $N(x_N, y_N, z_N)$ , достаточно просто получить величину площади обзора  $S$  (площади трапеции):

$$S = \frac{h^2 \varphi (tg \theta_{\max} tg \theta_{\min}) [(\sin \theta_{\min} + \sin \theta_{\max}) tg \beta + \cos \theta_{\min} + \cos \theta_{\max}]}{2 \cos \beta (1 + tg \theta_{\max} tg \beta)^2 (1 + tg \theta_{\min} tg \beta)^2 \cos \theta_{\min} \cos \theta_{\max}} \quad (7)$$

где  $\theta_{\min}$  и  $\theta_{\max}$  - соответственно начальный и конечный углы полосы обзора ГБО. Зондирование дна можно осуществить по двум вариантам. В первом случае антенны разных бортов имеют различные частоты, и излучение по обоим бортам производится одновременно; во втором случае антенны по бортам имеют одинаковые частоты, а излучение производится попеременно с соответствующей коммутацией входов и выходов. На рис.5 представлены зоны обзора при зондировании дна по обоим вариантам (а-вариант, б-вариант 2).

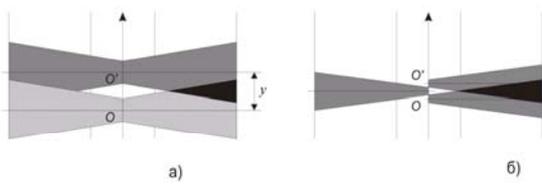


Рис. 5. Зоны обзора при разных вариантах зондирования

Величина  $y$  – расстояние, которое проходит судно-носитель между двумя циклами зондирования. Период зондирования  $T$  заканчивается с приходом отраженного сигнала от конца зоны обзора. Величина этого периода не меньше:

$$T \geq \frac{2R_{\max}}{c} = \frac{2h}{c \cos \theta_{\max}} \quad (8)$$

Тогда скорость корабля при одновременных измерениях по обоим бортам будет:

$$v_k = \frac{c \varphi \cos \theta_{\max}}{2 \cos \theta_{\min}} \quad (9)$$

а при последовательных (попеременных) измерениях:

$$v_k = \frac{c \varphi \cos \theta_{\max}}{4 \cos \theta_{\min}} \quad (10)$$

При движении корабля со скоростью, отличающейся от рассчитанной, будут возникать либо перекрытия (при малой скорости движения), либо пропуски зоны (при большей скорости). Поэтому автором предлагается при планировании мониторинга принять следующую последовательность действий:

- определить координаты точек  $P, M, N, A', B, C, D'$  (рис.4);
- сравнить величины координат с целью выявления зон перекрытия и пропуска;
- просчитать величины площадей перекрытия и пропуска;
- найти оптимальную (энергосберегающую) скорость судна, при которой площади перекрытия и пропуска минимальны (скорость движения судна-буксировщика корректируется в ходе проведения мониторинга).

Определение координат и длин отрезков по координатам точек производится общепринятыми методами аналитической геометрии. По найденным величинам рассчитываются площади образующихся треугольников и трапеций.

Следует иметь в виду, что если дно имеет наклон к горизонту, то при соответствующих галсах судна площади засветки с левого и правого борта могут различаться. Поэтому выявление априори наличия уклона весьма важно. Если же такой информации нет, то ее следует получить в начале мониторинга и осуществлять оптимизацию последующих галсов, используя рассчитанные данные о зонах перекрытия и пропуска.

Для определения величин  $h_1$  и  $h_2$  может быть использован эхолот или профилограф. В ходе

мониторинга величина угла наклона может быть найдена, исходя из выражения:

$$\beta = \arctg \left\{ -(tg \theta_1 - tg \theta_2) + \sqrt{(tg \theta_1 - tg \theta_2)^2 - 4 \left[ 1 - \frac{h}{\Delta L} (tg \theta_1 - tg \theta_2) \right]} \right\} \quad (11)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – соответственно начальный и конечный углы полосы обзора ГБО,  $\Delta L$  – длина засвеченной полосы.

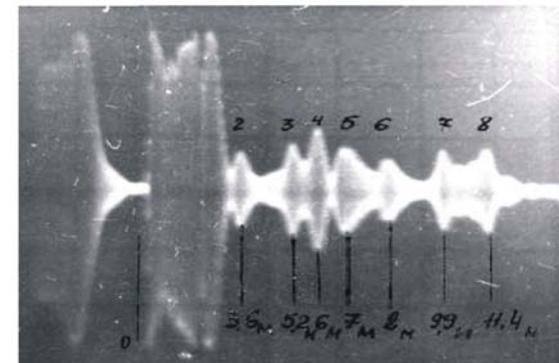
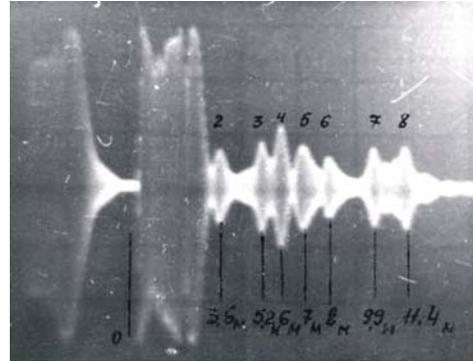


Рис.6. Эхограммы входного сигнала профилографа до и после коррекции

Для получения дополнительной информации об осадочном слое в гидроакустический комплекс включен профилограф. При обработке изображений профиля исследуемого участка дна необходимо провести коррекцию амплитудных и геометрических искажений входного сигнала профилографа [6]. Амплитудные искажения возникают вследствие того, что отраженные от разных слоев сигналы подвергаются неодинаковому поглощению в различных слоях, поэтому получаемая яркость различных слоев изображения не пропорциональна действительным значениям коэффициентов отражения этих слоев. Геометрические же искажения возникают вследствие различных скоростей распространения звуковой волны в различных слоях. В результате на эхограммах наблюдается нелинейность во взаимном расположении сигналов отражения от различных слоев грунта. На рис. 6 приводятся эхограммы входного сигнала до и после применения обработки.

## ВЫВОДЫ:

1. обоснована, экспериментально апробирована и предлагается для использования методика оптимальной энергосберегающей организации

- гидроакустического мониторинга шельфовой зоны;
2. получена математическая модель процесса распространения акустической волны в водной толще, которой присущи специфические особенности физико-химических характеристик. Модель позволяет обосновать расчет траектории акустического луча и выбор формы, интенсивности, частоты, длительности зондирующих посылок акустических колебаний;
  3. установлено и экспериментально проверено, что для достижения наибольшей достоверности в расшифровке отраженного сигнала на входе приемного тракта гидроакустического комплекса должна осуществляться амплитудная и геометрическая коррекция, устраняющая искажения, вносимые специфическими особенностями водной толщи и строением дна;
  4. разработаны, апробированы и предложены для применения методика автоматического определения параметров амплитудной и геометрической коррекции в каждом цикле зондирования;
  5. разработаны и экспериментально проверены методика автоматического определения угла наклона дна к горизонту
  6. обоснована методика определения скорости судна – буксировщика, позволяющая снизить величину площади перекрытия зондируемых участков дна и величину площади незондируемых участков с подачей сигнала коррекции скорости в реальном масштабе времени;
  7. обоснована и экспериментально проверена методика ориентировочной оценки структуры и состава осадочного слоя в реальном масштабе времени.

- 
- [1]. Акустика океана // Под ред. Л.М.Бреховских. – М.: Наука, 1974.
  - [2]. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978.
  - [3]. Низамов Т.И. Использование гидроакустической системы для дешифрирования аэрокосмических снимков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – №4. – с.42 - 45.
  - [4]. Низамов Т.И. Гидроакустические средства для изучения верхней толщи морского дна // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2003. - №11. – с.35 – 41.
  - [5]. Низамов Т.И. Организация гидроакустического мониторинга водной среды // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2004. - №10. – с.51 – 56, 67.
  - [6]. Низамов Т.И., Кулизаде Р.К., Исаев Э.И. Коррекция геометрических искажений изображений разреза дна. Труды Международной Научно-Технической конференции «Информационные и электронные технологии в дистанционном зондировании», Баку, 2004, с.67-70.