

**НЕЛИНЕЙНАЯ ПРОСВЕТНАЯ ГИДРОАКУСТИКА  
И СРЕДСТВА МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
В СОЗДАНИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ  
РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА  
И ЗЕМНОЙ КОРЫ, МОНИТОРИНГА ИХ ПОЛЕЙ  
РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ**

НЕЛИНЕЙНАЯ ПРОСВЕТНАЯ ГИДРОАКУСТИКА И СРЕДСТВА МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В СОЗДАНИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА И ЗЕМНОЙ КОРЫ, МОНИТОРИНГА ИХ ПОЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Владивосток  
2014

ISBN 978-5-906739-22-3



9 785906 739223



Российская академия наук  
Дальневосточное отделение  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Специальное конструкторское бюро  
средств автоматизации морских исследований»

**НЕЛИНЕЙНАЯ ПРОСВЕТНАЯ ГИДРОАКУСТИКА  
И СРЕДСТВА МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
В СОЗДАНИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ  
РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА  
И ЗЕМНОЙ КОРЫ, МОНИТОРИНГА ИХ ПОЛЕЙ  
РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ**

*Монография*

Владивосток  
Издательство Дальневосточного университета  
2014

Утверждено к печати Ученым советом  
Специального конструкторского бюро  
средств автоматизации морских исследований ДВО РАН

Авторы:

*М.В. Мироненко, А.Е. Малашенко,  
А.М. Василенко, Л.Э. Карачун, Р.В. Леоненков*

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор В.И. Короченцев;  
канд. техн. наук А.И. Чудаков

Ответственный редактор канд. техн. наук *Н.Л. Халаев*

- Нелинейная просветная гидроакустика и средства морского приборостроения в создании Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы** : монография / М.В. Мироненко, А.Е. Малашенко, А.М. Василенко, Л.Э. Карачун, Р.В. Леоненков ; [отв. ред. Н.Л. Халаев]. – Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 2014. – 404 с.  
ISBN 978-5-906739-22-3

В монографии представлены научно-технические разработки нелинейной просветной гидроакустики и средств морского приборостроения в решении смежных задач гидрофизики, геофизики и радиофизики, практические пути их реализации в Дальневосточной радиогидроакустической системе мониторинга полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры, как информационного поля Земли. Диапазон измеряемых частот создаваемой системы составляет десятки – единицы килогерц, сотни – десятки – единицы – доли Герца, включая СНЧ колебания движущихся объектов и неоднородностей среды.

Для инженеров и научных работников в областях исследования и освоения океана, может быть полезна для курсантов и студентов высших учебных заведений по специальностям «Морская геофизика», «Гидроакустика», «Гидрофизика», «Радиофизика», «Радиотехника», «Морское приборостроение».

This monograph presents scientific and technical developments in nonlinear prosvet hydro-acoustics and in marine equipment for solving the common tasks in Hydrophysics, Geophysics and Radiophysics, their practical implementation methods in the Far-Eastern radiohydroacoustic system of monitoring of fields of different physical nature. These fields are formed by natural and artificial sources, processes and phenomena of the atmosphere, ocean, and earth's crust and, in their turn, they form the information field of the Earth. The measuring step of the created system is the tens – units kHz, hundreds – tens – units – shares of Hertz. Monograph for engineers and ocean researchers.

УДК 534.222.2  
ББК 32.875

© Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Василенко А.М.,  
Карачун Л.Э., Леоненков Р.В., 2014  
© ФГБУН «СКБ САМИ» ДВО РАН, 2014  
© Оформление. Издательство  
Дальневосточного университета, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Монография посвящена разработкам актуальной научно-технической проблемы – созданию Дальневосточной системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы (акустических, электромагнитных, и гидродинамических), формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и опасными явлениями атмосферы, океана и земной коры. Масштабность и многофункциональность создаваемой системы обуславливает совокупное решение актуальных задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов Российского государства. Система освещения и мониторинга разрабатывается как пространственно развитая радиогидроакустическая и, в этой связи, она формируется на основе закономерностей и измерительных технологий низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, а также научно-технических разработок средств морского приборостроения. В монографии проведены разработки технологий и практических путей применения в системе, быстро разворачиваемых радиогидроакустических комплексов, а так же средств космической системы связи. Такие средства разрабатываются и создаются в Федеральном Государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН) Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН. Научно-техническая новизна и практическая значимость создаваемой радиогидроакустической системы освещения обстановки и мониторинга полей различной физической природы заключается в том, что она обеспечивает комплексное решение функционально связанных задач. К таким задачам следует отнести исследования пространственно-временных амплитудно-фазовых характеристик полей, формируемых техническими и естественными источниками, процессами и явлениями, атмосферы, океана и земной коры. К решаемым задачам относятся также разработки методов и средств исследования и освоения морских ресурсов, технологий их добычи и контроля в рамках освоения и охраны акваторий Морской Экономической Зоны Дальневосточного Региона (МЭЗ ДВР).

Берингово, Охотское и Японское моря, а также северо-западная часть Тихого океана, омывающая Курильскую островную гряду, относятся к зоне, требующей решения сложных задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов. Комплекс таких задач включает: интенсивное использование транспортных коммуникации, традиционное океаническое и прибрежное рыболовство, нефтяную и газовую добычу, а также историческое соперничество главных геополитических оппонентов России за обладание экономической и морской инициативой в Дальневосточном Регионе.

При этом климатическая, гидродинамическая и геодинамическая аномалии морей Дальневосточного региона создают экстремальный характер деятельности человека на море. Аномальная специфика региона проявляется в повышенной периодичности таких природных явлений, как: разрушительные землетрясения, цунами, мощные дождевые и снежные тайфуны, ураганные ветры, интенсивные обледенения морских судов и инженерных сооружений, неожиданные перемещения тяжелых ледовых полей, изменчивые поверхностные и глубинные течения, колебания уровня морей и штормовые нагоны, вызывающие разрушительные наводнения. Совокупность перечисленных, практически непредсказуемых, происшествий и событий должна предвидеть и максимально упреждать создаваемая Дальневосточная радиогидроакустическая система освещения и мониторинга акваторий МЭЗ ДВР.

В связи с дальнейшей активизацией разработок углеводородных месторождений морского шельфа значительно возрастает угроза экологической катастрофы по причине ве-

роятного проявления крупных разливов нефти. Вместе с этим, возрастает вероятность спонтанных выбросов на поверхность метановых газовых скоплений из потревоженных человеком донных пазух. Источником же мощнейшего уничтожающего взрыва объемного газового облака, вырвавшегося из морских глубин, может стать любой малейший источник огня на судне или самолете, которые фатально могут оказаться в этом облаке газа.

В силу известных обстоятельств экономического и политического характера в недалеких 90-х годах теперь уже прошлого столетия была серьезно подорвана система государственного регулирования рыболовного промысла в исключительной морской экономической зоне Дальневосточных морей. При этом, что касается Сахалинского и Курильского сегментов, то следует отметить, что в 1991 году в ходе спонтанной приватизации управления «Сахалин рыба» был ликвидирован механизм строго регламентированной системы ОДСНФ и ДГРФИ, которые обеспечивали достаточно надежную непрерывную связь флота с берегом в интересах безопасности мореплавания, оперативного централизованного управления производственными, научно-исследовательскими и иными специальными задачами. Были также ликвидированы ледовая авиаразведка, морская рыбная разведка. Реорганизация системы судовых метеорологических постов привела к резкому снижению ее эффективности. Отсутствует прежняя регламентированная устойчивая связь рыбопромыслового флота с войсковыми, военно-морскими, пограничными, другими службами и контрольными органами.

Большой экономический ущерб государству наносится массовым браконьерством и контрабандной добычей морской продукции, что к настоящему времени уже привело к угрожающему истощению морских биологических ресурсов Дальневосточного региона, признававшегося ранее как одним из богатейших самостоятельно воспроизводимых океанских кладовых. По достоверным данным российских и зарубежных источников, объемы сырьевой морской продукции, поставляемой на рыбные рынки Японии, Корейского полуострова, Китая, острова Тайвань и других зарубежных стран из экономической зоны Дальнего Востока России, на порядок превышают официальные цифры российских налоговых и таможенных органов. В денежном выражении потери достигают около 5 миллиардов долларов в год, что наносит огромный и неуправляемый экономический ущерб Российскому государству.

С появлением на морском шельфе стационарных технологических сооружений, принадлежащих иностранным владельцам нефтегазовых проектов, возникли дополнительные элементы военно-стратегических угроз морской экономической зоне России. Стационары и обслуживающая их мобильная морская и воздушная инфраструктура насыщены океанологической аппаратурой. В настоящее время нет никаких объективных препятствий тому, чтобы данные приборных измерений, осуществляемых в российских территориальных водах и экономической зоне, не передавались в зарубежные морские ведомства в реальном масштабе времени.

В действующих в настоящее время «Совместных соглашениях» о разделе морской продукции, отсутствуют практически все режимные ограничения государства-владельца на экономическую деятельность в прибрежной и шельфовой морских зонах России. При этом, стремление расширить географию и объем морских исследований за пределы разумно обоснованных производственных потребностей или же малообоснованное привлечение к указанным работам иностранных подрядчиков вместо соответствующих российских, имеющих преимущественный местный опыт и достаточную квалификацию, как правило, свидетельствуют в пользу изложенных допущений о новых элементах российской военно-стратегической угрозы.

Рассмотренные и сформулированные факторы и обстоятельства экономического, геополитического и технологического характера обуславливают актуальность и высо-

кую научно-техническую значимость разработки научно-технических основ и практических путей создания Дальневосточной системы освещения и мониторинга полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры. В этой связи следует отметить, что разработки этой наукоемкой проблемы имеют достаточно серьезный опыт, как зарубежных ученых и практиков, так и отечественных специалистов и исследователей, в том числе и с участием авторов настоящей монографии, в области морской науки и практики освоения, контроля и охраны просторов Дальневосточных морей [1-12].

**Зарубежные разработки по созданию системы мониторинга и контроля морской обстановки в масштабе Мирового океана.** Интенсивный мониторинг акваторий в пределах морской экономической зоны государства, а также освоение морских просторов в масштабе Мирового океана обусловили необходимость разработки и создания всеобъемлющей системы мониторинга и контроля обстановки на его широкомасштабных просторах. К настоящему времени эта глобальная проблема является не только предметом интенсивных научно-технических разработок широкого круга отечественных ученых и инженеров, но и результатом ее практического воплощения в решение оборонных задач вероятного противника. Так, например, по данным зарубежной и отечественной печати [9-12], в период до 2010 г. гидроакустические станции (ГАС) останутся основными средствами наблюдения морских акваторий и объектов различного назначения. Мировым лидером в создании и развитии корабельных и стационарных гидроакустических станций являются ВМС США, опережающие другие зарубежные страны на 10 – 15 лет.

В целом, вся совокупность организационных, финансовых и интеллектуальных усилий США призвана обеспечить закрепление превосходства в дальности наблюдения подводных и надводных объектов различного назначения ВМФ РФ и третьих стран в открытом океане, а также завоевание такого же превосходства в мелководных прибрежных районах, что предполагает выполнение следующих требований:

- надежная регистрация подводных объектов в режиме эхопеленгования при любых гидрологических условиях на дистанциях 100-200 км в Северо-Западной части Тихого океана и повышение нижней границы обнаружения в мелководных прибрежных районах с 5-10 до 20-30 км;
- обеспечение работы эхопеленгования в диапазоне частот от 100 Гц до 7 кГц;
- внедрение бистатического и мульти статического режимов работы станций путем согласования их активных и пассивных трактов;
- согласованность работы стационарных, быстро разворачиваемых и буксируемых гидролокаторов подсветки с трактами корабельных и стационарных станций.

Проведенные исследования, в целом, позволили выявить следующую основную тенденцию в развитии антенн и гидроакустических средств. На протяжении последних десятилетий гидроакустические комплексы кораблей и стационарных ГДАС, спроектированные и изготовленные как законченное техническое средства, при использовании активного тракта обнаружения после излучения принимали отраженный от объектов сигнал. В настоящее время наблюдается разделение активного тракта, как технического средства, на две составляющие и размещение их на разных платформах – носителях и стационарных средствах.

Таким образом, группа совместно действующих кораблей и оперативно- разворачиваемые ими стационарные средства контроля превращаются, по сути дела, в некое единое техническое гидроакустическое средство (комплекс или систему), функционирую-

щее как единое целое, наподобие, например, гидроакустического комплекса стационарных ГДАС. Возможности подобной системы приведут к ситуации, когда акватория моря площадью 100 – 200 км<sup>2</sup> возможно и более, становится "прозрачной", и подводный объект с любыми характеристиками полей будет зарегистрирован при нахождении в контролируемом районе.

В целях удовлетворения к 2010 г. повышенных требований при борьбе с перспективными малозумными подводными объектами в прибрежных мелководных районах в США развернуты широкомасштабные НИОКР. Результаты, получаемые в ходе исследований, позволят сформировать базу данных для модернизации гидроакустических комплексов, находящихся в эксплуатации, и разработки ГАК нового поколения, например, для надводного корабля типа DD -21.

Анализ исследований совокупности известных отечественных и зарубежных гидроакустических средств [1-12] позволяет выделить активный режим работы как приоритетное направление их развития. Это направление будет совершенствоваться за счет расширения частотного диапазона станций, перехода на сложные сигналы и внедрение многопозиционных систем. Технологической основой такого совершенствования послужили достижения в области вычислительной техники и систем цифровой обработки сигналов.

Перспективная электронная аппаратура и математическое обеспечение позволят проводить более качественную обработку принимаемых сигналов и классифицировать объект на фоне помех и в итоге обеспечить выигрыш, достигающий 50 дБ, что превышает существующий уровень 20 – 30 дБ.

Усилия исследователей в рамках работ по совершенствованию технологии обработки сигналов имеют следующие цели:

- решение проблем при формировании сложных излучаемых сигналов, заданных лучей распространения и характеристик направленности антенн;
- улучшение обработки принимаемых сигналов, совершенствование путей отображения получаемой информации на дисплее;
- отстройку от помех и снижение числа ложных тревог в сложной гидрологической обстановке шельфовых зон;
- проработку однопозиционных и многопозиционных систем, алгоритмов, обеспечивающих их эффективное функционирование.

Эти цели специалисты ВМС США планируют достигать путем совершенствования:

- алгоритмов для работы активных ГАС в мелководных районах и регистрирующих поля малоразмерных, бесшумных (акустически слабозаметных) подводных объектов в условиях интенсивных помех;
- алгоритмов для пассивных ГАС (обнаружения, классификации и определения местоположения объектов, кроме того, предусматривается одновременная работа неакустических средств контроля и использование получаемых от этих средств данных);
- взаимного обмена первичными данными между всеми носителями и средствами наблюдения и их обработки, а также внедрения когерентной обработки, методов взаимодействия множества средств контроля и носителей (кораблей) для обеспечения, наблюдения, классификации и определения их местоположения с объединением данных на тактическом уровне (в группе надводных и подводных кораблей).

В этой связи следует отметить, что в течение последних десятилетий в США успешно используется комплексная система широкомасштабного наблюдения океана и сверхдальнего обнаружения полей шумового излучения современных акустически слабозаметных морских объектов. Общеизвестно, что основным стимулом к созданию указанной

системы послужило техническое совершенствование подводных лодок ВМФ в период 60–80 годов, выразившееся в резком снижении их акустической заметности [9-11].

Определяющую техническую основу системы освещения составляют стационарные, протяженные донные гидроакустические антенны, объединенные в единую измерительную подводную сеть, в которую входят дрейфующие радиогидроакустические буи (РГБ) и искусственные спутники земли (ИСЗ), осуществляющие непрерывное наблюдение морской поверхности.

Информационно–аналитическую основу системы составляет Единый центр сбора и обработки многозвенной информации, в который поступают данные от стационарных антенн, РГБ, а также известные и текущие метеорологические данные и данные о надводной обстановке с ИСЗ. Вся поступающая в центр информация анализируется с помощью ЭВМ, которые моделируют условия распространения сигналов по трассам вероятного маневрирования обнаруживаемых морских объектов и сравнивают их с характеристиками сигналов, поступающими от стационарных и мобильных измерительных гидроакустических средств. Возмущения среды, сформированные объектом, а также естественными морскими явлениями (течениями и вихрями) регистрируются как аномалии характеристик измеряемых сигналов от расчетных, смоделированных на основе измеряемых и известных гидроакустических характеристик морских объектов и среды.

Использование комплекса быстродействующих ЭВМ обеспечивает также возможность надежного классификационного разделения естественных возмущений среды от возмущений, сформированных объектом. При этом точность обнаружения (определения места) объекта системой наблюдения составляет область диаметром около 16 км. Дальнейшее уточнение места производится с помощью высокоподвижных авиационных поисковых систем или маневренных корабельных радиогидроакустических средств [1,9,10].

Принцип функционирования рассматриваемой системы кроме пассивного наблюдения включает активное озвучивание морских акваторий низкочастотными гидроакустическими сигналами, в качестве которых используются специальные взрывные импульсы. Отмечается, что оптимальной частотой озвучивания среды является 50 Гц. Использование сигналов такой частоты обеспечивает не только ее малое затухание при распространении, но и оптимальность согласования с протяженным океаническим волноводом. Как следует из [1, 9,10], это дает возможность распространения импульсов от одного берега океана до другого, последующее отражение и приход импульсов обратно. В качестве источников озвучивания менее протяженных трасс в системе наблюдения используются также излучения низкой частоты от подводных гидрографических маяков наведения. Впоследствии рассматриваемая система наблюдения, сформированная в рассмотренном составе, но более доработанная технически и усовершенствованная функционально, эффективно использовалась в ВМФ США. Техническую основу рассматриваемой системы освещения и контроля широкомасштабных морских акваторий составляют протяженные стационарные донные антенны, а также сформированные на их основе пространственно развитые антенные решетки, которые по известным публикациям в акустических журналах США могут быть успешно сформированы на основе протяженных линеек, сформированных из приемных гидрофонов, сбрасываемых авиационных РГБ.

Еще во время разработки системы наблюдения за подводной и надводной обстановкой и, прежде всего, за рассредоточением и поведением обесшумленных морских объектов в масштабе Мирового океана, планировалось обязательное создание всемирной системы не только наблюдения, но и мобильного управления подсистемами из Единого



информационного центра. Исходя из обобщения и анализа информации достоверных источников, создаваемая система на тот период включала до тридцати пяти периферийных информационно-аналитических вычислительных центров, которые посредством специальных каналов связи были объединены в единый информационный центр анализа обобщенной информации и управления системой, расположенный на Гавайских островах. Многозвенная и многоканальная связь с периферийными центрами в общей системе наблюдения осуществляется как с помощью коаксиальных кабельных линий, так и через каналы космической связи ИСЗ. Создание сложной структуры системы наблюдения постоянно обеспечивает возможность комплексного использования разнообразных по измеряемым физическим полям средств, расположенных на дне моря и ее поверхности, а также на различных по своим техническим и тактическим возможностям носителях. В современной терминологии это трактуется, как использование стационарных и мобильных (корабельных и авиационных) радиогидроакустических средств измерения характеристик полей среды и морских объектов различной физической природы.

Основные параметры морской среды и полей объектов в периферийных пунктах рассматриваемой системы измеряются, предварительно анализируются и передаются в единый центр с помощью другой, не менее глобальной, системы ASWEP. Именно эти данные затем используются при расчетах ожидаемых дальностей распространения звуковых волн на отработанных в то время моделях для глубоководного океанического канала. Указанные математические модели программ расчета акустических полей постоянно корректируются с учетом реально измеряемых параметров морской среды по наиболее характерным океаническим трассам.

Очевидно, что вся обработка и анализ информации (многозвенной по периферийным объектам и многоканальной по измеряемым параметрам среды) достаточно успешно реализуется специальными вычислительными программами, которые уже в тот период времени были не только отработаны, но и корректировались с учетом текущей информации о состоянии морской среды в оперативно - важных районах Мирового океана. Прогнозные расчеты характеристик гидроакустических полей и их сравнение с текущими, многоканально измеряемыми, обеспечивает возможность обнаружения возмущений морской среды, сформированных естественными, а также искусственными неоднородностями с достаточной степенью вероятности. Например, кильватерными следами кораблей, морскими течениями, вихрями, а также протяженными рыбными скоплениями. В этой связи необходимо добавить, что периферийные центры системы наблюдения способны также осуществлять необходимые измерения и последующие расчеты триангуляционного определения места обнаруживаемых неоднородностей среды. Такие определения места объектов выполняются на основе системного наблюдения морской обстановки разнородными системами, например, надводными и подводными кораблями, стационарными и мобильными гидроакустическими системами. Наиболее точное определение места объектов достигается при использовании космических и авиационных радиолокационных средств наблюдения и поиска [1,9,10].

Известно, что в последние десятилетия в США и странах НАТО в дополнение к линейным антеннам большие ассигнования выделяются на разработку крупногабаритных гидроакустических антенных решеток, устанавливаемых на гигантских донных треногах. При этом основное внимание уделяется научным исследованиям и разработкам практических путей использования решеток в глубоководных (не менее пяти тысяч метров) районах Мирового океана. Использование антенных решеток в этих районах обеспечивает возможность дальнего (практически сверхдальнего, до 1200 км) обнаружения возмущений среды и полей обесшумленных морских объектов по признакам низкочастотных составляющих

полей их шумового излучения. Эти задачи в рассматриваемой комплексной системе наблюдения не менее успешно реализуются с помощью заякоренных и дрейфующих радио-гидроакустических буев, гидрофоны которых расположены на глубоководных горизонтах.

**Отечественные разработки по созданию системы мониторинга и контроля акваторий дальневосточных морей.** Аналогичная система освещения морской экономической зоны создавалась и действовала в бывшем СССР. Масштабы и назначение системы в силу известных военных, политических целей и экономических возможностей ограничивались акваториями морей Дальневосточного региона. В обеспечение этой системы были разработаны и использовались стационарные донные протяженные антенны принципиально новой (жесткой) конструкций, которые по своим техническим параметрам значительно превосходили характеристики антенн системы "СОСУС" [10]. Протяженные вертикальные и горизонтальные линейные антенны нежесткой конструкции в СССР в период 90-х годов также разрабатывались в конструкторском бюро Киевского политехнического института. Опытные образцы антенн были испытаны и установлены в морях ДВ региона. На их основе был выполнен большой объем научно-технических разработок по формированию, так называемых, "пространственно развитых" антенных решеток и их практической реализации в условиях шельфовых зон. Технические характеристики рассматриваемых антенн также превосходили характеристики антенн "СОСУС". Конструктивно антенны формировались из секций длиной до 30 метров каждая. Протяженность вертикальных и горизонтальных ветвей антенны, в зависимости от места установки и решаемых задач, могли составлять до одного километра по высоте и до полутора по протяженности на дне. К сожалению, эти изделия по своим громоздким конструктивным параметрам, а также по причине их сложной и длительной установки оказались не долговечными. После непродолжительной, но достаточно эффективной работы они вышли из строя. Мероприятия по их доработке в период распада СССР были прекращены и не возобновлялись.

Следует отметить, что установленные и действовавшие в то время в СССР приемные донные антенны, а также мощные низкочастотные источники подсветки морской среды представляли собой лишь незначительную часть создаваемой системы освещения и контроля морской экономической зоны (МЭЗ) Дальневосточного региона (ДВР). Организация в системе единого центра сбора и обработки информации, сформированного на основе использования космических каналов связи и комплекса ЭВМ, планировалась и частично обрабатывалась. В силу наступивших политических перемен в СССР и его последующего распада, а также связанных с ними экономическими и военными реформами в стране реализация этой глобальной проблемы прекратилась, созданная и действовавшая часть системы наблюдения устарела и вышла из строя.

И только в настоящее время, в период надежного становления Российского государства и укрепления его позиций, как морской державы, актуальность проблемы освоения богатых запасов акваторий МЭЗ ДВР и надежной охраны ее протяженных границ неизмеримо возросла и стала предметом практических разработок [1-7]. Рассматриваемая проблема получила свое реальное воплощение в плановых научных исследованиях и технических разработках в связи с выходом специальных Государственных решений. Разработка этой актуальной проблемы в настоящее время проводится на основе достигнутых в прошедший период "затишья" научных достижений и новых технических решений в области практической гидроакустики, выполненных российскими учеными, инженерно-техническими работниками и конструкторами, интенсивность и продуктивность работ которых в этот период практически не прекращалась. Воссоздание обновленной системы освещения и контроля МЭЗ ДВР потребовало раз-

работки и внедрения нетрадиционных, более эффективных решений в области гидроакустики. Такими разработками стали, так называемые "быстро разворачиваемые" глубоководные системы длительного скрытного наблюдения (контроля) характеристик гидрофизических и гидроакустических полей морской среды, дальнего обнаружения полей акустически слабозаметных морских объектов, которыми являются современные обесшумленные корабли. Современное решение по созданию системы освещения и мониторинга полей морских акваторий является включение в ее состав глубоководных автономных радиогидроакустических комплексов, обеспечивающих передачу данных в Региональный информационно-аналитический центр управления [1-7, 12-23]. Рассматриваемые автономные системы наблюдения способны обеспечить (при условии их массированного развертывания) надежный контроль морских акваторий Мирового океана в реальном масштабе времени. Эта задача успешно реализуется только при условии постоянного использования надежных низкоэнергетических каналов связи, работающих с поверхности моря без применения стабилизированных платформ, которыми в настоящее время являются космические спутниковые каналы связи на базе системы низколетящих спутников связи «Гонец». Исходя из возможностей указанных технических решений и реализующих их радиогидроакустических средств наблюдения акваторий, следует, что они не только дополняют, но и существенно расширяют возможности создаваемой Единой Региональной системы наблюдения. Так, например, в случае объединения их в большие подсистемы, они обладают существенными преимуществами перед громоздкими и сложными гидроакустическими стационарными антеннами и решетками [1-3, 242-250].

Следует особо отметить, что рассматриваемая система SOSUS по причине своего давнего исторического создания не включала и по известным сведениям не включает в настоящее время достижения и разработки рассматриваемых принципиально новых радиогидроакустических контрольно-измерительных комплексов [10]. Создаваемые в СКБ САМИ быстро разворачиваемые контрольно-измерительные комплексы включают систему функционально связанных (СФС) заякоренных гидроакустических донных автономных станций (ГДАС), а также автономные модули космической радиосвязи (АМ КРС). Формирование рассматриваемых контрольно-измерительных радиогидроакустических комплексов (КИРГАК) существенно расширяют возможности системы наблюдения морской обстановки и, прежде всего, создаваемой обновленной системы мониторинга МЭЗ ДВР. Преимущества реализации разрабатываемого комплекса в системе мониторинга и контроля заключаются в реализации следующих принципиально новых научно-технических решений:

- возможности скрытного оперативного развертывания в глубоководных районах;
- получения быстрого обновления или полного свертывания комплекса;
- достижения больших дальностей обнаружения полей акустически слабозаметных морских объектов;
- возможности длительной автономной работы, измерения и консервации многоканальной информации о полях среды и морских объектах;
- возможности вхождения в Единый региональный информационный центр управления по космическим каналам связи.

Разработка и реализация КИРГАК позволяет решать совокупность других, не менее актуальных задач мониторинга и контроля акваторий МЭЗ ДВР в интересах народного хозяйства страны, например, контроля сейсмической обстановки, экологического контроля в районах хозяйственной деятельности на шельфе, мониторинга рыбных запасов и других задач Дальневосточного Региона [13-16, 90].

Это характеризует новизну и место научных исследований, а так же технических разработок в рамках монографии в общей проблеме создания Дальневосточной системы освещения и мониторинга полей морской среды и объектов на основе научно-технических разработок средств морского приборостроения, создаваемых в ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН.

Нельзя не отметить, что актуальность, научная новизна, высокая практическая значимость научно-технических разработок монографии заключается не только в решении государственной проблемы совершенствования морской деятельности государства за счет разработки ДВ СОМО и мониторинга полей различной физической природы на акваториях акваторий МЭЗ ДВР. Она также непосредственно нацелена и на решение актуальных задач мониторинга, освоения и охраны богатых рыбных и нефтегазовых запасов на шельфовых и глубоководных акваториях Дальневосточных морей.

**Исследования и научно-технические разработки по формированию ДВ СОМО, мониторинга и контроля морских акваторий в СКБ САМИ ДВО РАН.** Исследования, проведенные в НИР и ОКР в Федеральном Государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН) Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН (Г. Ю.Сахалинск), позволяют сформулировать основной круг задач, которые должна решать Дальневосточная система освещения и мониторинга морской экономической зоны Дальневосточного региона (ДВ СОМО МЭЗ ДВР). Создаваемая система должна обеспечивать стратегические интересы России, динамическое функционирование многозвенной инфраструктуры территорий и акваторий Дальнего Востока, их адекватное реагирование на суровые природные условия, политические, экономические и возможные военные вызовы [1-7, 13-16, 90, 224, 242 – 250, 253-275, 283-300]. К основным задачам ДВ СОМО акваторий МЭЗ ДВР относятся:

- обеспечение безопасности мореплавания, своевременное предупреждение об опасных и катастрофических природных явлениях, локализация их последствий, определение координат терпящих бедствие судов и летательных аппаратов, информационное сопровождение спасательных операций;

- контроль за подводной и надводной обстановкой в интересах удержания военно-морской оборонительной инициативы;

- охрана 12-мильной территориальной зоны от вторжения иностранных кораблей, судов и иных морских объектов-нарушителей;

- борьба с браконьерским освоением и добычей морских запасов в исключительной экономической зоне и в конвенционных районах, являющихся зоной адресной ответственности России, объявленными в соответствии с международными обязательствами, а также борьба с контрабандным вывозом морской продукции за границу;

- экологический мониторинг нефтегазовых проектов шельфа, иных промышленных операций на акваториях морской экономической зоны;

- научно-исследовательское сопровождение морской нефтегазовой добычи, рыболовного промысла и иных производственных проектов;

- охрана от несанкционированного проникновения в акватории морских портов, плавучих буровых установок, морских нефтегазовых терминалов и трубопроводов;

- информационно-аналитическое обеспечение и сопровождение структур власти Дальневосточного региона, деятельности береговых предприятий и организаций всех форм собственности. Перечисленные мероприятия достаточно большой экономической эффект и авторитет.

Общий экономический эффект от внедрения ДВ СОМО МЭЗ ДВР будет достигаться за счет совокупности новых технических и экономических результатов:

- многократного увеличения налоговых и таможенных поступлений в бюджеты всех уровней в результате сокращения браконьерства и контрабанды морской продукции, что будет гарантироваться высокой эффективностью контроля морской обстановки, действенностью и неотвратимостью мер пресечения и предупреждения указанных правонарушений;

- значительного сокращения расхода топлива и иных ресурсов кораблей и авиации погранвойск в результате их адресного применения за счет получения через систему освещения морской обстановки достоверных данных о противозаконных действиях судов-браконьеров, судов-контрабандистов и других нарушителей морской границы;

- повышения надежности и снижения затрат по предотвращению и локализации природных и техногенных катастроф, диверсий, аварий по недосмотру и халатности на объектах морского транспорта, рыбной, нефтяной и газовой добычи, Военно-Морском Флоте и частях погранвойск (при этом основной эффект выражается в снижении размеров ущерба и человеческих жертв от последствий аварий и катастроф);

- возмещения части расходов на создание и содержание системы за счет штрафов, налагаемых на нарушителей;

- коммерческой реализации широкого спектра информационных и исследовательских услуг ДВ СОМО МЭЗ ДВР морским и береговым российским и зарубежным организациям и предприятиям;

- возмещения части расходов на создание и эксплуатацию системы в форме дополнительных бонусов и сборов, налагаемых на российских и иностранных операторов и инвесторов нефтегазовых проектов.

Важнейшим эффектом создания ДВ СОМО МЭЗ ДВР должен стать перевод морской оборонительной стратегии на Дальневосточном театре на передовую системно-компьютеризованную базу по образу и подобию той, которая постоянно совершенствуется и внедряется в ВМС США и в этом направлении к настоящему времени проведены соответствующие научно-технические разработки, которые изложены в настоящей монографии. Наиболее важными из них являются [10,11,242,243,250, 253-275,283-300].

Следует особо отметить, что создание Дальневосточной системы освещения надводной и подводной обстановки в целях интеграции и рационального использования комплексов и средств ведомственного подчинения предусмотрено Указом и Решениями Правительства РФ об улучшении морской деятельности на широкомасштабных акваториях МЭЗ ДВР. Для этого силами сотрудников ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН в 1986 г. было разработано и оборудовано первое и единственное на Дальнем Востоке стационарное просветное гидроакустическое поле на трассе о. Сахалин - о. Итуруп, протяженностью 345 километров. За период с 1986 года на трассе проведен большой и многосторонний объем испытаний разрабатываемых средств морского приборостроения и морских экспериментов, в том числе и международных, совместно с США в рамках выполнения Договора об ограничении стратегического вооружения. По материалам многолетних научно-технических разработок и проведенных на их основе морских испытаний сформирован банк данных по результатам фундаментальных и прикладных научных исследований. К настоящему времени опытное морское поле в плане технического оборудования устарело и полностью вышло из строя, планируется его восстановление на современном научно-техническом уровне.

В прошедшие годы в лаборатории гидрофизики ФГБУН СКБ САМИ проведены работы по созданию электронной базы данных, полученных за период эксплуатации трассы. Сформированные электронные базы данных включают закономерности влияния сезонной изменчивости среды на распространение акустического сигнала, анализу влия-

ния полей техногенных объектов в районе расположения трассы на характеристики принимаемого просветного акустического поля, а также по исследованию возможности использования сейсмических источников в качестве зондирующего акустического поля. К завершённым результатам такой работы на просветном поле можно отнести анализ сезонных распределений температуры и солёности. Обнаружен и подтверждён посредством измерений и расчетов район образования постоянного антициклонического вихря в зоне 470° с. ш. и 1450° в. д. При анализе скоростей течений было выявлено, что у границ шельфа юго-восточного побережья о. Сахалин и в западной части Курильской глубоководной котловины приливные течения имеют меньшие скорости, чем на шельфе.

В настоящее время в интересах создания ДВ СОМО МЭЗ ДВР научно-техническое подразделение ДВО РАН - СКБ САМИ планирует проведение следующих фундаментальных и прикладных научных исследований.

1. Разработка научно-технических основ и измерительных технологий нелинейной низкочастотной «просветной» (активно-пассивной и параметрической) совместно с высокочастотной гидроакустикой, обеспечивающих дальнейшее обнаружение акустически слабозаметных морских объектов по признакам их полей различной физической природы, а также параметрический прием гидрофизических и геофизических полей и зондирование структуры морского дна.

2. Разработка технических путей внедрения низкочастотного «просветного» метода гидролокации в стационарных, мобильных и быстро разворачиваемых системах мониторинга, освоения и охраны Охотского региона (в том числе с использованием разработок просветной параметрической томографии полей объектов и неоднородностей протяженных морских акваторий).

3. Научно-технические разработки и создание макетов пространственно развитых вертикальных цифровых гидроакустических антенн, а также пространственно развитых антенных решеток, формирование с их использованием низкочастотных «просветных», в том числе систем мониторинга, и объемного наблюдения пространственно-временных характеристик полей различной физической природы акваторий Охотского и Японского морей на основе просветной акустической томографии.

В 2002 году ФБГУН СКБ САМИ завершило изготовление и испытания нескольких опытных образцов автономной глубоководной донной гидроакустической станции. Автономные гидроакустические станции, как уже отмечалось выше, являются уникальным измерительным инструментом в исследовании гидроакустической обстановки в различных районах Мирового океана, а также в комплексных исследованиях водной среды методами акустической томографии.

Проведены ОКР по разработке созданию и испытаниям радиогидроакустических автономных блоков обмена цифровой информацией от антенных систем ГДАС по каналам системы спутниковой связи «Гонец». Выполняются ОКР по созданию и опытной эксплуатации гидроакустической охранной системы, которая должна найти свое применение на многочисленных морских инженерно-технических объектах нефтегазовых разработок шельфа о. Сахалин и на других диверсионно-уязвимых объектах. Предполагается, что оборудованное в последствие на современном техническом уровне стационарное гидроакустическое поле на трассе о. Сахалин – о. Итуруп, сохраняя свое основное функциональное назначение, как научно-исследовательского гидроакустического полигона, может быть включено в состав СОМО, как одно из ее важнейших и неотъемлемых тактико-технических составляющих.

С принятием администрацией Сахалина (1995 г.) решения «О создании Сахалинского информационного центра», позже (1996 г.) решения «О создании системы монито-

ринга сахалинского шельфа», сотрудники СКБ САМИ ДВО РАН выполняют научно-исследовательские работы, содержанием которой является разработка научно-технических основ построения системы освещения морской обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы. Система должна обеспечивать решение задач включающих: обеспечение безопасности мореплавания, информационно-аналитическое сопровождение деятельности морских организаций, наблюдение за состоянием морских акваторий в интересах экологического мониторинга шельфовых нефтегазовых проектов, исследование и освоение морских биоресурсов. Результаты исследований, проведенных в СКБ САМИ ДВО РАН во взаимодействии с Сахалинской экологией и Управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Сахалинским научно-исследовательским институтом рыбного хозяйства и океанографии, опубликованы в 1998 г. в изданиях различного уровня. В настоящее время СКБ САМИ по заданиям ДВО РАН, во исполнение ФЦП «Мировой океан» (подпрограмма 2 «Исследование природы Мирового океана», Постановление Правительства РФ № 192 от 22.02.97, подпрограмма «Комплексные исследования океанов и морей, Арктики и Антарктики») продолжает работы по этой тематике [13-19, 243, 247, 250, 253-275, 283-300].

Результаты научных исследований, конструкторские разработки автономных радиогидроакустических комплексов, лабораторная база, морской полигон, а также региональная станция спутниковой системы связи «Гонец», могут быть использованы в СОМО. Созданная система может обеспечивать комплексное решение задач научного, народно-хозяйственного и оборонного комплексов.

В этой связи, следует констатировать, что реализация даже начальных научно-исследовательских этапов проекта создания ДВ СОМО МЭЗ ДВР, несмотря на значительный объем уже выполненных и представленных от различных научных, производственных и административных структур предложений, невозможна. Для этого необходима специальная Исполнительная Дирекция Главного Заказчика, действующей под началом ВМФ во исполнение и на основании Указа Президента РФ № 471 и его Поручения № К416 от 2000 года. Представляется также, что в Дирекцию должны войти представители соответствующих заинтересованных ведомств и регионов, а ее бюджет должен формироваться путем специальных целевых отчислений, определяемых еще на стадии формирования и принятия в Федеральном Собрании РФ цифр госбюджета, выделяемых ведомствам и регионам.

Относительно нетрадиционный подход к организационно-управленческой надстройке ДВ СОМО МЭЗ ДВР обуславливается самой логикой, интеграционной и многофункциональной сущностью создаваемой радиогидроакустической системы, ее составляющих технологических элементов. Ни одно федеральное ведомство (а тем более региональная администрация или ее структура) не в состоянии даже сугубо для своих собственных нужд создать такую архитектуру информационной системы, которая могла бы нормально функционировать без активной совместной работы баз данных и соответствующих технологических элементов участвующих, ведомств и организационных структур. Такое утверждение наглядно продемонстрировано логическим алгоритмом, работы создаваемой системы, согласно которому система независимо от объема запросов каждого конкретного потребителя должна интегрировать и обрабатывать:

- информацию от различных ведомственных и региональных служб наблюдения и контроля над обстановкой на море;

- данные гидрометеорологических донесений различных ведомств, флотских диспетчерских радиogramм и других оперативных донесений об обстановке на морских акваториях, островах и в прибрежной полосе;

- данные космических комплексов наблюдения в радио - и оптическом диапазонах;
- текущую информацию от радиолокационных средств наземного, морского и воздушного базирования в реальном масштабе времени;
- информацию от необслуживаемых гидроакустических аппаратов, стационарных гидроакустических систем, принадлежащих различным ведомствам;
- данные о плановых и оперативных заданиях, о дислокации по периодическим радиодонесениям кораблей и судов ВМФ, ФПС, судов рыболовных флотилий, пассажирских и торговых организаций РФ, частных судовых компаний, а также иностранных судов, работающих в контролируемых системой акваториях на долговременной межгосударственной договорной основе;
- данные экологического мониторинга морских акваторий (УГМС), сейсмологических наблюдений (ОМСП) об экологической обстановке, чрезвычайных ситуациях (комитеты по экологии, региональные управления по делам ГО и ЧС);
- иную необходимую информацию, воспроизводимую различными ведомствами или принадлежащую им по ведомственности.

Однако в организационном аспекте интеграционное единство логического алгоритма системы перерастает в свое противоречие, которое выражается в принципиальной невозможности на основе консенсуса или компромисса между отраслевыми ведомствами и региональными администрациями определиться в иерархии приоритетов, ответственности, заинтересованности и степени материального вклада в создание и дальнейшее обеспечение эксплуатации системы. Это обуславливает необходимость создания нетрадиционной управленческой надстройки, в качестве которой должно стать ДВО РАН, как научная организация, имеющая большой опыт и наиболее предпочтительную мотивацию для адекватной селекции и адаптации передовых достижений науки и техники к уникальным природным и геополитическим особенностям Дальневосточного региона.

Одним из главнейших приоритетов морской доктрины России является создание интегрированных информационных систем, обеспечивающих их межведомственную совместимость, высокую мобильность развертывания и транспортабельность.

Основой таких разработок стали быстро разворачиваемые радиогидроакустические системы, сформированные на базе глубоководных автономных донных станций, обеспечивающих длительное наблюдение и контроль характеристик гидрофизических полей морской среды.

Современное решение проблемы создания автономных радиогидроакустических комплексов мониторинга полей, наблюдения морской обстановки предполагает разработку и включение в их состав модулей передачи информации с поверхности моря из любой точки Мирового океана по космическим каналам радиосвязи в единый береговой или корабельный центр наблюдения и управления. Этот принцип успешно реализуется только при условии использования надежных низкоэнергетических каналов связи, работающих с поверхности моря в условиях качки без применения стабилизированных платформ. Действующей и развивающейся системой космической связи, удовлетворяющей этим требованиям и примененной в разработках автономных комплексов, является Российская система низколетящих спутников связи «Гонец» [13-19,90].

Еще одним принципиально важным условием создания современных автономных систем наблюдения является оснащение их пространственно – развитыми антенными решетками со встроенными преобразователями акустической информации в цифровую форму с последующей цифровой обработкой сигналов, обеспечивающей выделение полезного сигнала из помех и анализ его в соответствии с заданными алгоритмами и клас-



сификационными признаками. Такие автономные системы наблюдения при условии их массированного развертывания способны обеспечить надежный контроль морской экономической зоны Дальневосточного региона. Первые экспериментальные образцы глубоководных автономных станций показали, что достижение высокой надежности аппаратуры в условиях длительных морских экспедиционных работ и глубоководных постановок требует специальных конструкторских и технологических решений при создании опытных образцов гидроакустических станций и радиогидроакустических комплексов.

Первые опытные образцы функционально связанных глубоководных донных акустических станций серии «Монитор» были созданы в 1986 – 89 годах. Серия станций с большой длительностью автономной работы основана на применении технологий цифровой обработки гидроакустических сигналов. Цифровая обработка сигналов включает использование информационно - емких принципов телеуправления и передачи информации по гидроакустическому каналу связи, позволяющих позиционировать установленные станции с корабля – постановщика с совместным применением системы измерения дальности до установленной станции и навигационной системы ГЛОНАСС - GPS [13-19,90, 243, 247, 250, 253-275].

Применение Российской системы связи на базе низколетящих спутников серии «Гонец» позволяет реализовать в автономных станциях функцию передачи предварительно обработанной и кодированной информации с поверхности моря в любой точке Земного шара на береговые или корабельные приемные центры.

Возможность решения широкого круга задач, способность функционировать в любом районе океана, отсутствие необходимости переоборудования кораблей (судов) – постановщиков автономных гидроакустических комплексов обеспечат быструю окупаемость средств, затраченных на их разработку.

Технологическая основа современных гидроакустических комплексов базируется на современных цифровых технологиях, которые позволяют осуществлять обработку больших объемов сигнальной информации и принимать решения об обнаружении объектов заданных классов в автоматическом режиме. Для снижения потерь полезного сигнала во входных цепях антенны и энергопотребления предлагается использовать «цифровую» антенну, в которой предварительный усилитель, аналого-цифровой преобразователь и контроллер размещены внутри каждого гидрофона. Объединение информации, передаваемой с поверхности моря, решает подсистема передачи данных низкоорбитальной спутниковой системой "Гонец", обеспечивающая автоматизированный сбор потока информации с необслуживаемых модулей и систем, что решено и реализовано впервые [1-7,13-19,90, 247, 250, 253-275,283-300].

### **Научно-техническая проблема, решаемая в рамках науки о Земле.**

Создание Дальневосточной системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы (акустических, электромагнитных, и гидродинамических), формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и опасными явлениями атмосферы, океана и земной коры, как общего информационного поля Земли.

Создаваемая система должна быть широкомасштабной и многофункциональной и обеспечивать решение актуальных задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов Государства. Система освещения надводной, подводной и подземной обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы атмосферы океана и земной коры должна разрабатываться как широкомасштабная радиогидроакустическая и, в этой связи, она будет формироваться на основе закономер-

ностей и измерительных технологий низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, а также научно-технических разработок средств морского приборостроения. Таковыми разработками являются: контрольно измерительные радиогидроакустические комплексы (КИРГАК), «звукопрозрачные» приемные акустические антенны и сформированные на их основе быстро разворачиваемые радиогидроакустические комплексы, создаваемые в Федеральном Государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН) Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН [1-7,13-19,90, 247,250, 253-275,283-300].

#### **Решаемые задачи.**

1. Провести анализ разработок закономерностей, научно-технических разработок и измерительных технологий низкочастотной просветной и высокочастотной нелинейной гидроакустики, обосновать практические пути их реализации в создаваемой системе освещения и мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры, как общего информационного поля Земли.

2. Обосновать практические пути формирования и эффективной эксплуатации создаваемой системы освещения и мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры в протяженном океаническом канале с переменными характеристиками среды и границ.

3. Разработать технологии измерения пространственно-временных характеристик информационных полей и их контроля в формате 3D.

4. Проанализировать материалы теоретических и экспериментальных исследований, а также конструкторских разработок в области создания и применения ГДАС. Рассмотреть их конструктивные устройства, состав блоков и измерительных трактов, технические характеристики и функциональные возможности. Определить пути их модернизации, а также создания новых, более эффективных станций и комплексов применительно к решению практических задач мониторинга и охраны акваторий МЭЗ ДВР.

5. Разработать и создать технологии производства новых радиогидроакустических трактов системы функционально связанных (СФС) ГДАС, их конструкторские и схемные решения. Изготовить опытные образцы изделий, провести их морские испытания. Разработать радиотехнические блоки, обеспечивающие постоянный прием данных космических комплексов наблюдения, а также текущую информацию от радиолокационных средств наземного, морского и воздушного базирования в реальном масштабе времени.

6. Провести комплексные испытания надежности и эффективности работы ГДАС в глубоководных морских условиях. Для реализации этой задачи разработать программы-методики испытаний СФС ГДАС и технологии подготовки станций к автономной работе, включающие: порядок калибровки трактов и узлов; процесс постановки изделий на дно; контроль их работы; поиск после всплытия; выборку станций на борт обеспечивающего судна; порядок демонтажа и съема блоков записи информации.

7. Рассмотреть и проанализировать разработанные расчетные и измерительные технологии, а также организационные мероприятия, обеспечивающие эффективную работу СФС ГДАС в районах их установки. Технологии и реализующие их тракты, обеспечивающие: измерение; расчеты; последующую обработку измеряемой информации для определения гидролого-акустических характеристик среды; измерение параметров гидроакустических помех среды и полей морских объектов; определение координат объектов, а также контроль пространственного (географического) расположения отдельных станций.

8. Проанализировать структуру, схемные решения модуля гидроакустического канала управления и связи (ГАКУС), схемные и конструкторские решения его трактов и

блоков, практические пути вхождения ГАКУС в СФС ГДАС и систему обеспечивающего судна, провести испытания.

9. Проанализировать структуру, схемные и конструкторские решения автономного радиотехнического модуля космической связи (АРТМ КС), технологии приема – передачи информации с авиационных, спутниковых и наземных радиолокационных станций, практические пути его реализации в составе СФС ГДАС. Разработать технологии и создать конструкцию АРТМ КС. Обосновать практические пути вхождения СФС ГДАС с использованием АРТМ КС в систему мониторинга МЭЗ ДВР по каналам радиосвязи, включая космические - спутниковые.

10. Разработать технологий и технических решений использования радиогидроакустических комплексов в обеспечении программируемого измерения характеристик гидрофизических и геофизических полей среды и объектов, накопления и передачи измеряемых данных в Единый информационно-аналитический центр для их обработки и комплексного анализа.

11. Провести теоретические и морские экспериментальные исследования закономерностей зарождения и прохождения процессов и опасных явлений (волн цунами, землетрясений, синоптических возмущений, подводных и подземных взрывов), обосновать возможные пути прогнозирования их зарождения и упреждающего оповещения населения об их вступлении.

# **1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ**

## **1.1. Обзор методов гидролокации полей морских объектов**

Теоретическими и экспериментальными исследованиями в области гидролокации установлено, что движущийся подводный объект успешно регистрируется и классифицируется по признакам пространственно-временного преобразования амплитудно-фазовой структуры принимаемых зондирующих сигналов. Решение задачи гидролокационного наблюдения и измерения характеристик полей реальных объектов усложнилось из-за снижения их шумовых и отражающих характеристик. Это связано также с тем, что в области морского судостроения проводятся комплексные работы по снижению уровня шумности судов и, в первую очередь, снижению уровня характерных дискретных составляющих (ДС) спектра их общего шумового поля. Именно это обстоятельство значительно усложнило решение задач наблюдения и классификации современных малозумных морских объектов существующими средствами шумопеленгования [1, 2, 5].

Возможности наблюдения морских объектов средствами активной гидролокации также ограничены. Они связаны с необходимостью применения высокочастотного облучения объектов, обеспечивающего условия формирования устойчивых эхосигналов и их последующее надежное выделение на фоне помех и шумов моря. Интенсивное многолучевое распространение сигналов в мелководье прибрежных и проливных зон, повышенный уровень шумов приливно-отливных и регулярных морских течений усложняют процесс выделения эхосигналов и регистрации объектов. Стремление получить большие дальности наблюдения объектов классическими средствами гидролокации за счет снижения частоты зондирующих сигналов и увеличения их мощности привели к неоправданным, с точки зрения достигнутого эффекта, конструктивным усложнениям гидроакустических комплексов, увеличению их весогабаритов и, наконец, к резкому возрастанию общих экономических затрат и времени на их разработку и внедрение.

Не эффективными являются также методы регистрации морских объектов по признакам полей кильватерного следа (КС). Такое наблюдение осуществляется путем многократного непосредственного измерения характеристик наведенного электромагнитного поля или теплового и других полей КС. При этом обязательным требованием применения результатов измерений является проверка «первичной» регистрации другими (например, гидролокационными) методами и средствами.

Перечисленные обстоятельства обусловили необходимость разработки принципиально новых методов и средств измерения полей объектов, с более простыми, относительно существующих, приемными и излучающими трактами, обеспечивающих эффективное наблюдение акустически слаботочных объектов и неоднородностей морской среды на больших дистанциях. За рубежом уделяется большое внимание разработке принципиально новых гидроакустических методов регистрации подводных объектов, например по заказу ВМС США создана и успешно используется комплексная система

дальней регистрации полей морских объектов в масштабе Мирового океана [1, 2]. Основу системы составляет центр сбора и автоматизированной обработки многозвенной и многоканальной информации, которая поступает с огромной акватории океана от протяженных стационарных гидроакустических антенн и буев, океанографических станций. С искусственных спутников земли в систему поступают текущие метеорологические данные и информация о надводной обстановке. Вся информация вводится в ЭВМ, которая моделирует условия распространения сигналов по заданным трассам океана, проводит расчеты и сравнивает их с поступающими от стационарных средств реальными данными. При этом морской объект регистрируется по наличию аномалии распространения реального сигнала относительно смоделированного на ЭВМ. Конкретные принципы работы этой системы не опубликованы. На основании приведенной информации видно, что в ней могут использоваться как составные элементы, так и нетрадиционные способы обнаружения, основанные на подсветке среды акустическими сигналами и закономерностях преобразования структуры просветных сигналов объектами, их гидрофизическими возмущениями и полями.

К рассмотренным выше отечественным разработкам относится низкочастотный просветный метод гидролокации морских объектов [1, 2, 5]. Движущийся акустически слабозаметный морской объект с помощью просветного метода может быть зарегистрирован по признакам пространственной амплитудно-фазовой модуляции и параметрического преобразования характеристик установившегося просветного поля его излучениями и полями, сопутствующими движению в морской среде. Достаточно исследованы следующие закономерности, возникающие за счет искажения и модуляции установившегося поля сигналов акустической подсветки среды движущимся подводным объектом и сопутствующими его движению полями [5 – 30]:

- рассеяние и дифракция низкочастотных акустических сигналов подсветки среды на корпусе [8 – 10];

- рассеяние и затухание низкочастотных сигналов подсветки турбулентным гидродинамическим КС, а также сопутствующей движению объекта возмущенной областью среды [8 – 10];

- параметрическое преобразование низкочастотных сигналов подсветки близкой частоты в среде и усиление такого преобразования в области среды, возмущенной движущимся объектом, прежде всего в случае применения сложных полигармонических сигналов [6, 7];

- амплитудная и фазовая модуляция низкочастотных сигналов подсветки характерными дискретными составляющими инфранизкочастотного (ИНЧ) шумоизлучения объекта при их совместном распространении в нелинейной среде (преимущественно в возмущенной области и КС объекта) [13, 14, 16, 17];

- инфранизкочастотная (ИНЧ) и сверхнизкочастотная (СНЧ) модуляция низкочастотных сигналов подсветки колебаниями корпуса движущегося объекта (как целого), а также регулярными гидродинамическими колебаниями водных масс, вовлеченных в его движение [1, 2, 13 – 17];

- модуляция и параметрическое преобразование просветных сигналов электрическим и электромагнитным полями, формируемыми объектом [1, 2, 99, 100].

Закономерности дифракции звуковых волн на акустических экранах исследованы наиболее полно. Известен ряд работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям закономерностей дифракции звуковых волн на телах правильной геометрической формы, например цилиндрах, сферах, вытянутых сфероидах и т.д. [8 – 11], в которых рассматриваются характеристики ближнего акустического поля.

В решении практических задач дальнего наблюдения подводных объектов наибольший интерес представляют работы [10 – 12]. В них рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований по регистрации малоразмерных подводных объектов, а также контроля подводных инженерно-технических сооружений. Наибольший практический интерес в разработке дифракционного (теневого) способа регистрации малоразмерных подводных объектов, и в частности самодвижущихся подводных аппаратов, представляют работы [5, 12]. В условиях специально оборудованного опытного морского поля проведены исследования с использованием просветной гидроакустической системы и реализации в ней различных физических методов (гидроакустического, электромагнитного и др.). Экспериментально показано, что из рассмотренных способов при наблюдении малоразмерных подводных объектов более эффективен гидроакустический, так как все другие из-за малой дальности (порядка десятков-сотен метров) могут быть использованы как дополнительные к нему. Вышеуказанные работы посвящены также исследованиям возможности наблюдения малоразмерных подводных объектов с использованием высокочастотных сигналов подсветки и выделения признаков их затенения объектом.

Дальнее обнаружение и контроль пространственно временных характеристик полей морских объектов на протяженных акваториях основано на выполнении следующих операций. Низкочастотной (десятки-сотни герц) акустической подсветке контролируемой среды, нелинейном взаимодействии и параметрическом преобразовании просветных волн объектными волнами различной физической природы (акустическими, электромагнитными и гидродинамическими). Последующим приеме преобразованных просветных волн; узкополосном спектральном анализе и выделении признаков преобразования сигналов объектом. Последовательность перечисленных операций обеспечивает возможность дальнего обнаружения и классификации акустически слабозаметных, в том числе и с малыми волновыми параметрами объектов и неоднородностей морской среды [1, 2, 12, 30 – 32].

## **1.2. Пространственная структура поля, рассеянного на акустических экранах**

Рассмотрим порядок получения аналитического выражения для вычисления интенсивности плоской звуковой волны, рассеянной на неподвижном жестком цилиндре. При нахождении такого выражения пользуются аналитическими зависимостями для излучения звуковых волн пульсирующими поверхностями [1, 2, 8, 9]. Итак, пусть на цилиндр радиусом  $R$  падает плоская звуковая волна интенсивностью  $J_0$  (рис. 1.1, а). Направление падающей волны совпадает с осью координат  $Ox$  и перпендикулярно к оси цилиндра. При этом цилиндр считаем абсолютно жестким, т.е. нормальные составляющие колебательных скоростей на его поверхности равны нулю. В излучении (рассеянии) участвуют только тангенциальные составляющие колебательных скоростей. Решение задачи в этом случае сводится к получению выражения для интенсивности рассеянной волны  $J_s$  в точках среды, удаленных от оси цилиндра на расстояние  $r$ .

Ф. Морзом найдены упрощенные выражения для давления  $P_s$  и радиальной скорости  $U_s$  рассеянной волны в точках, удаленных на расстояния  $r$  от оси цилиндра, которые для случая  $kr \gg 1$  представляются в виде [1, 2, 8]

$$P_s = - \left( \frac{\varphi \rho c J_0 R}{\pi r} \right)^2 \cdot \Psi_s(\varphi) e^{ik(r-ct)}; \quad U_s = \frac{P_s}{\rho c};$$

$$\Psi_s(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{kR}} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \sin(\gamma_m) e^{-i\gamma_m} \cos m\varphi,$$

где  $\varphi$  – угол, который образует линия  $r$  с плоскостью отсчета;  $r$  – расстояние от оси цилиндра до точки наблюдения;  $c$  – скорость звука в воде;  $\rho$  – плотность;  $J_0(kr)$  – функция Бесселя нулевого порядка;  $R$  – радиус цилиндра;  $\Psi_s(\varphi)$  – радиальная скорость рассеянной волны на большом расстоянии от цилиндра;  $k$  – волновое число;  $t$  – время;  $\gamma_m$  – фазовые углы цилиндрических волн  $\varepsilon_m$ .

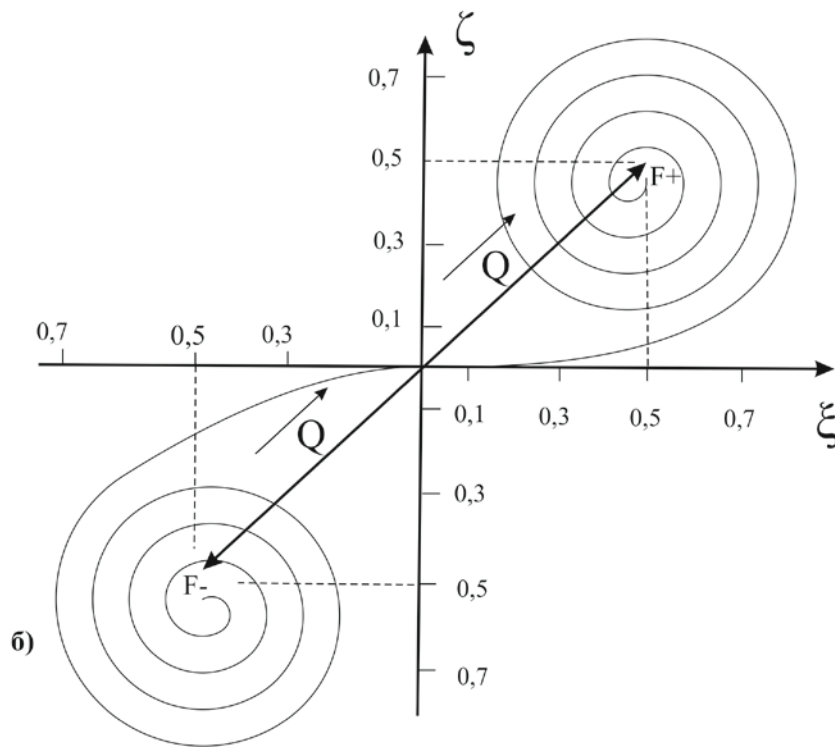
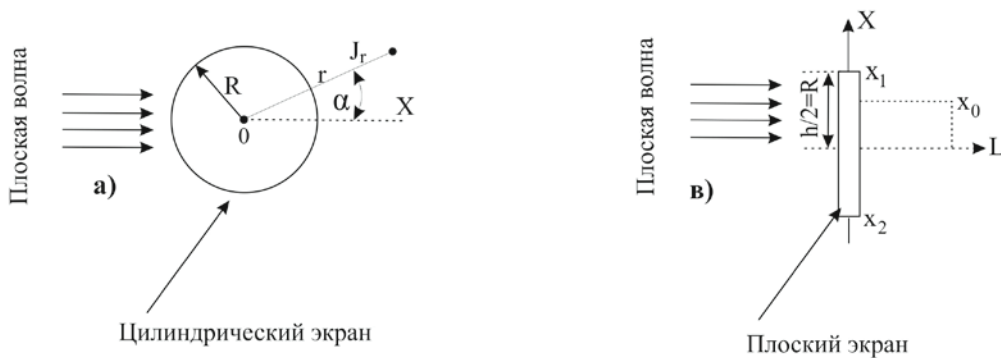


Рис. 1.1. Схема расчета дифракционного поля за экраном: а – для цилиндрического экрана; б – с помощью спирали Корню; в – для плоского экрана

Интенсивность волн в удаленной на расстоянии  $r$  от поверхности цилиндра точке среды может быть представлена как [8, 9]

$$J_s = \frac{2J_0R}{\pi r} [\Psi_s(\varphi)]^2 \text{ при } kr \gg 1;$$

$$[\Psi_s]^2 = \frac{1}{kR} \sum_{m,n=0}^{\infty} \epsilon_m \epsilon_n \sin \gamma_n \cos(\gamma_m - \gamma_n) \cos(m\varphi) \cos(n\varphi).$$

После проведения сложных математических преобразований Ф. Морзом получено удобное для анализа выражение интенсивности рассеяния относительно коротких звуковых волн на жестком цилиндре:

$$J_s = \frac{R}{2r} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{1}{2\pi kr} \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin^2(kR \sin \varphi) + A, \quad (1.1)$$

$Kr \ll kr \gg 1.$

Первый член выражения (1.1) представляет интенсивность волны, отраженной в обратном направлении в секторе углов  $\varphi > \pi/2$ , второй член определяет теньевую волну, распространяющуюся в прямом направлении, заключенную в секторе углов от  $\pi/kr$  до  $\lambda/2R$ . Этот сектор теньевой волны тем уже, чем меньше длина волны  $\lambda$  относительно  $R$ . Величина  $A$  представляет сумму быстро осциллирующих членов, дающих на конечном угловом интервале в среднем нулевую интенсивность.

С точки зрения возможности применения в просветной гидроакустической системе закономерностей рассеяния и дифракции волн при обнаружении подводных объектов наиболее интересен промежуточный случай между длинными и короткими волнами. Такая ситуация соответствует моменту, когда размеры препятствий (цилиндра) и длина падающей волны близки по величине. В этом случае наблюдаются сложные интерференционные явления между падающей и рассеянной волнами.

В среде по некоторым направлениям формируются максимумы и минимумы дифрагированных волн, которые даже при незначительных изменениях длины волны, размеров и положения препятствия относительно падающей волны претерпевают резкие изменения. Такие явления происходят, например, при обтекании морской волной больших препятствий, когда от них наблюдаются слабые неустойчивые отражения, а за препятствием образуется тень с размытыми границами. На практике трудно разделить и зарегистрировать отдельно поле падающей и рассеянной волн. В случае регистрации объекта по закономерностям дифракции, наоборот, целесообразно фиксировать все суммарное поле дифрагированных волн по пространству. Именно такая регистрация может обеспечить высокую информативность измеряемого поля дифрагированных сигналов при решении задачи обнаружения и идентификации движущихся подводных объектов низкочастотными сигналами.

Выражение (1.1) наиболее удобно для приближенной оценки и анализа закономерностей рассеяния при решении задач дальней гидролокации. Для этого представим его в следующем виде:

$$J_s = J_{\text{отр}} + J_{\text{тени}} + A, \text{ где } A \approx 0; kR \ll kr \gg 1;$$



$$J_{\text{отр}} = \frac{R}{2r} \sin \frac{\varphi}{2};$$

$$J_{\text{тени}} = \frac{1}{2\pi kr} \operatorname{ctg}^2 \varphi (kR \sin \varphi).$$

Определим значение длины волны  $\lambda$ , при котором интенсивности отраженной и теневой волн на углах, близких к оси координат (направлению падающей волны), будут равны, что характерно при разнесенном излучении-приеме сигналов. С учетом указанных выше условий преобразуем выражения интенсивностей отраженной и теневой волн:

$$J_{\text{отр}} = \frac{R}{2r} \sin \frac{\varphi}{2} \cong |\varphi \rightarrow \pi| \cong \frac{R}{2r} \sin \frac{\pi}{2} \cong \frac{R}{2r};$$

$$J_{\text{тени}} = \frac{1}{2\pi kr} \operatorname{ctg}^2 \frac{\varphi}{2} \sin^2 (kR \sin \varphi) \cong |\varphi \rightarrow 0| \cong \frac{2kR^2}{\pi r}.$$

Приравняв интенсивности отраженной  $J_{\text{отр}}$  и теневой  $J_{\text{тени}}$  составляющих компонент рассеянной волны, получим

$$\frac{R}{2r} \cong \frac{2kR^2}{\pi r}.$$

$$\text{Так как } k = \frac{2\pi}{\lambda}; \mu = \frac{2\pi R}{\lambda},$$

$$\text{то } \frac{1}{2} \cong \frac{2 \cdot 2\pi R}{\pi \lambda}; \lambda = 8R;$$

$$\frac{1}{2} \cong \frac{2\mu}{\pi}; \mu = \frac{\pi}{4} \approx 0,8.$$

То есть равенство интенсивностей отраженной и теневой составляющих компонент рассеянной волны соответствует случаю, когда длина падающей на препятствие волны близка к 8 радиусам цилиндра. Этот случай соответствует величине параметра  $\mu \approx 0,8$ , при котором общая рассеянная энергия падающей волны мала и для решения практических задач обнаружения объектов не представляет интереса.

В этой связи, при обнаружении объектов активными методами гидролокации, целесообразно применять низкочастотные волны, для которых полная интенсивность рассеянной волны близка к своему предельному значению, что соответствует значению параметра  $\mu = 5$ . В этом случае для объекта размером радиуса 10 м длина волны будет равна 12,5 м [1,2,8]:

$$\lambda = \frac{2\pi R}{\mu} = \frac{6,28 \cdot 10}{5} \approx 12,5 \text{ м, } f \geq 100 \text{ Гц.}$$

Для объекта радиусом 5 м длина волны будет равна 6,28 м:

$$\lambda = \frac{2\pi R}{\mu} = \frac{6,28 \cdot 5}{5} \approx 6,28 \text{ м}, \quad f \geq 200 \text{ Гц}.$$

Таким образом, объект как жесткий бесконечный цилиндр радиусом от 5 до 10 м, будет рассеивать и формировать интенсивное дифракционное поле больших пространственных размеров на частотах ниже 1 кГц (вплоть до частот 100–200 Гц), в то время как прямое применение низкочастотных сигналов в методе гидролокации для обнаружения реальных подводных объектов неэффективно.

Обнаружение объекта только по наличию теневой волны также неэффективно. Оно может быть достигнуто путем регистрации всей пространственной структуры дифракционного поля, что требует применения пространственно протяженных антенн и специальных методов излучения, приема и обработки сигналов. Режим дальнего обнаружения объектов можно реализовать с использованием линейно-частотно-модулированных сигналов подсветки среды.

Для нахождения структуры звукового поля за плоским прямоугольным экраном, на который падает плоская звуковая волна, применен графический метод расчета с помощью спирали Корню (рис. 1.1, б), параметрические уравнения которой можно представить в виде [1, 2, 8, 41]

$$\xi(v) = \int_0^v \cos \frac{\pi}{2} v^2 dv; \quad \eta(v) = \int_0^v \sin \frac{\pi}{2} v^2 dv,$$

где  $\xi(v)$  и  $\eta(v)$  – интегралы Френеля.

Интегралы Френеля в элементарных функциях не берутся, но известны специально составленные таблицы, по которым они могут быть вычислены для различных значений параметра  $v$ , физический смысл которого заключается в следующем. Если представить бесконечно узкую зону волновой поверхности и возбуждаемую этой зоной интенсивность колебаний в точке наблюдения, то величина и направление этого вектора колебаний совпадают с участком спирали Корню, соответствующим определенному значению параметра  $v$ . Это значение параметра связано с расстоянием  $X'$  от точки наблюдения до проекции на экран бесконечно узкой зоны соотношением

$$v = X' \sqrt{2/(\lambda L)},$$

где  $L$  – расстояние от центра экрана до плоскости в точке наблюдения, проведенной перпендикулярно  $OY$ .

Если координаты краев экрана принять за  $X_1$  и  $X_2$ , а за  $X_0$  принять координату точки наблюдения, отсчитываемую от центра (середины) экрана (рис. 1.1, в), то значение параметра можно преобразовать к следующему виду:

$$v = \sqrt{2/(\lambda L)}(X - X_0),$$

где  $X$  – текущая координата фронта волны;  $\lambda$  – длина падающей звуковой волны.

Ось ОХ проведена в плоскости экрана и совпадает с его шириной (высотой). Спираль Корню выражает модуль и фазу интегралов Френеля в зависимости от параметра  $\mathcal{U}$ , т.е. в зависимости от координат точки наблюдения относительно краев экрана. Ослабление звукового давления за счет наличия в среде экрана в точке наблюдения можно представить в следующем виде:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{|\vec{a}_1 - \vec{a}_2|}{|F_- F_+|},$$

где  $A$  и  $A_0$  – амплитуды звукового давления в точке наблюдения при наличии экрана и без него;  $\vec{a}_1$  и  $\vec{a}_2$  – векторы, проведенные в плоскости спирали Корню из точек, соответствующих значениям  $\mathcal{U}_1$  и  $\mathcal{U}_2$  для краев экрана;  $F_-$  и  $F_+$  – полюсы спирали.

Так как полюсами спирали являются точки  $F_+(0,5;0,5)$  и  $F_-(-0,5; -0,5)$ , то  $|F_+ F_-| = \sqrt{1/2}$ . Значения параметра  $\mathcal{U}$  для краев экрана, где координаты экрана по оси ОХ соответствуют значению полуширины экрана  $R$ , можно представить в виде

$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{L\lambda}}(X_1 - X_0) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{L\lambda}}(R - X_0) = \frac{2R}{\sqrt{2L\lambda}} \left(1 - \frac{X_0}{R}\right);$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2}{L\lambda}}(X_2 + X_0) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{L\lambda}}(R + X_0) = \frac{2R}{\sqrt{2L\lambda}} \left(1 + \frac{X_0}{R}\right).$$

С использованием ЭВМ получена структура звукового поля с теневой стороны плоского экрана для различных значений параметра  $\mathcal{U}$ . При этом экран считается плоским, если отношение его ширины (в нашем случае высоты объекта  $h$ ) к длине падающей волны удовлетворяет условию  $h/\lambda \gg 1$ . Для универсальности использования результатов расчета при различных значениях длин волн  $\lambda$  величины  $X_0$  и  $\sqrt{2L\lambda}$  выражены через полуширину экрана  $R$ . Глубина звуковой тени за экраном (отношение  $A/A_0$ ) выражена в децибелах. Величины звуковой тени в интервалах  $\geq 6$  дБ; 6–4 дБ; 4,5–3,8 дБ; 3–2 дБ объединены в общие зоны, отмечены общей штриховкой и представлены на рис. 1.2. По вертикали отложена величина  $X(R)$ , характеризующая координаты точек наблюдения через полуширину экрана в относительных единицах; по горизонтали – величина  $L(R^2/\lambda)$ , характеризующая расстояние от экрана до плоскости в точке наблюдения, выраженная через отношение квадрата полуширины экрана  $R$  к длине падающей волны в среде.

Для оценки возможных дистанций регистрации подводных объектов как экранов проведем вычисление пространственной структуры дифракционного звукового поля для плоского прямоугольного экрана. В определенном диапазоне звуковых частот этому условию удовлетворяют многие реальные объекты. С помощью полученной пространственной структуры поля сигналов за экраном определим ориентировочные значения возможных дистанций  $L_{\max}$ , на которых при заданном значении глубины звуковой тени может быть зарегистрирован объект.

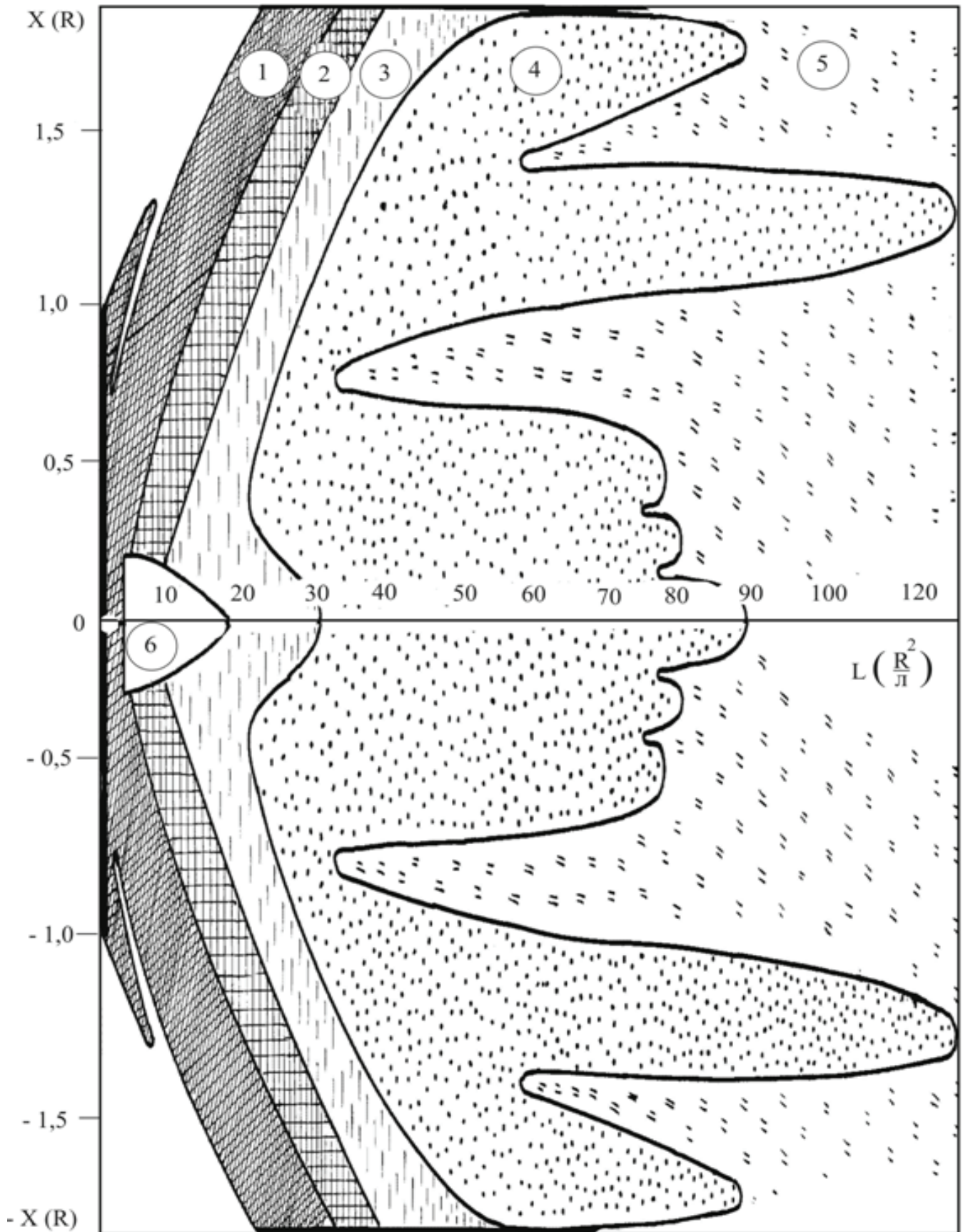


Рис. 1.2. Пространственная структура рассеянного акустического поля за экраном:

область 1 (-6 дБ); область 2 (-4,5 дБ); область 3 (-3 дБ);

область 4 (-2 дБ); область 5 (-0,8 дБ); область 6 (+1 дБ)

При этом его высота принимается равной ширине экрана. Например, для величины звуковой тени более 5 дБ согласно номограмме, приведенной на рис. 1.2, можно принять

$$L_{\max} = 23 \frac{R^2}{\lambda} \cong \frac{23(h/2)^2 f}{c} \cong 6 \frac{h^2 f}{c}.$$

Для величины звуковой тени более 3 дБ имеем

$$L_{\max} \cong 12 \frac{h^2 f}{c},$$

где  $h$  – высота объекта, м;  $f$  – частота, Гц;  $c$  – скорость звука в воде, м/с.

В случае разнесенного излучения-приема сигналов подсветки среды  $L_{\max}$  соответствует примерно половине протяженности линии излучения-приема. Ориентировочные значения максимальных протяженностей гидроакустических барьерных линий (ГАБЛ) контроля среды, с учетом спада уровня затеняемых просветных сигналов, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

J/J <sub>0</sub> , дБ	Протяженность ГАБЛ, км			
	3 кГц	10 кГц	20 кГц	30 кГц
≥ 5	2,5	8	15	25
≥ 3	5,0	16	30	50
≥ 1,5	10,0	32	60	100
≥ 0,75	20,0	65	120	200

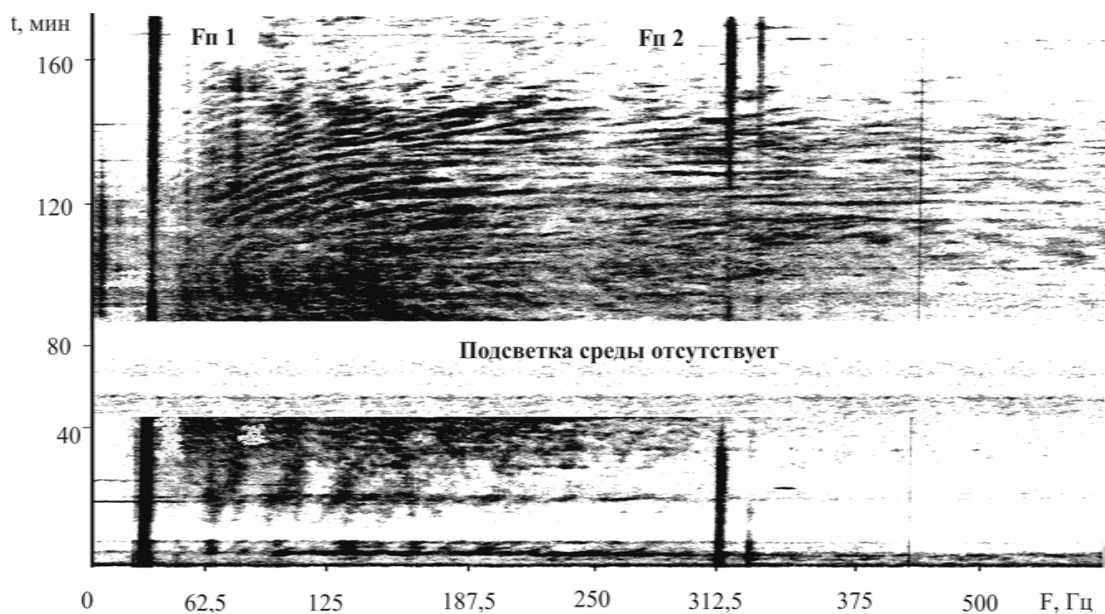


Рис. 1.3. Интерференционная структура шумоизлучения морского судна

На рис. 1.3 приведен пример дальнего измерения интерференционной структуры шумоизлучения морского судна низкочастотным просветным методом гидролокации на трассе протяженностью около 25 км. Частоты подсветки среды ( $F_n 1$ ,  $F_n 2$ ) – 31,5 и 312,5 Гц. В этом случае интерференционная структура шумоизлучения судна проявляется как амплитудно-фазовая модуляция просветных сигналов. Таким образом, движущийся объект может быть зарегистрирован по наличию спада уровня установившегося поля. Например, объект как плоский экран высотой 10 м может быть обнаружен на линии протяженностью 15 км, озвучиваемой сигналами с частотой 10 кГц. При этом спадание уровня сигнала в области тени составит 3 дБ.

Приведенный пример является прямым обнаружением, при котором не используется эффект усиления спада за счет дополнительной обработки выделяемого информационного сигнала.

Для сигналов, длина волны которых соизмерима с размерами объекта, а также на больших дистанциях от него, звуковая тень становится неразличимой. В таких случаях за объектом остается только сглаженная интерференционная структура рассеянного поля.

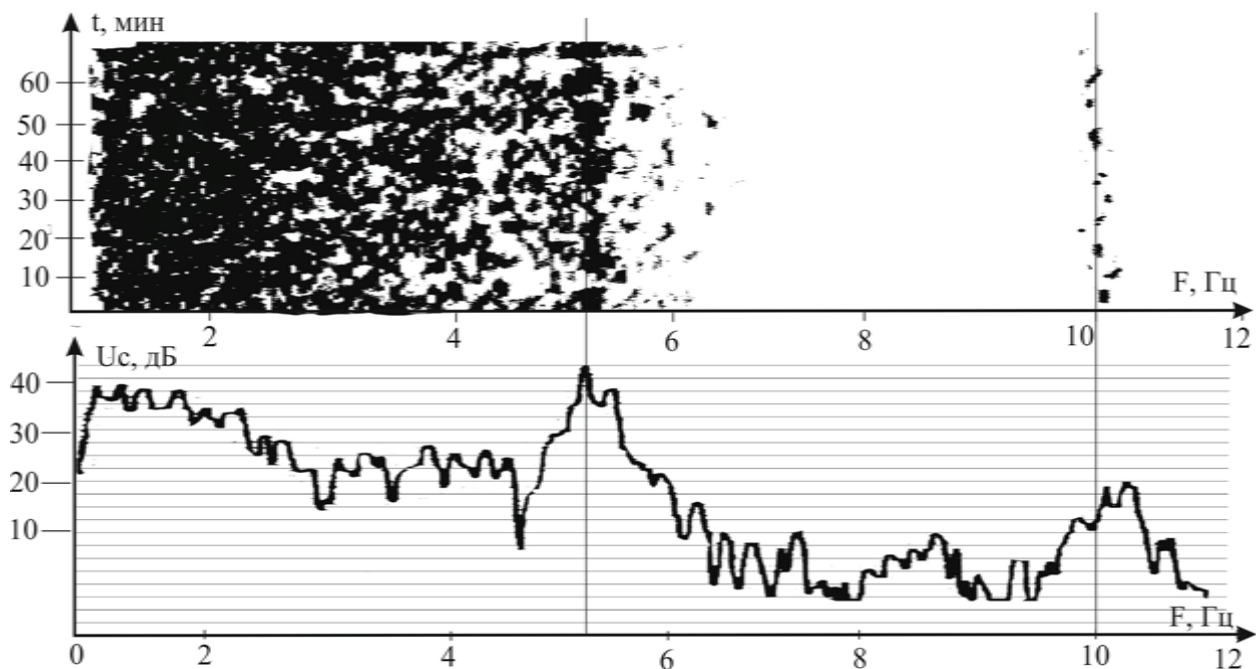


Рис. 1.4. Спектрограмма и спектр просветного поля, преобразованного гидродинамическими возмущениями среды, за движущимся пловцом (частота просветных ЛЧМ сигналов – 2 кГц, период ЛЧМ – 5 Гц)

Пространственные размеры объекта, а также перемещение его относительно приемноизлучающей системы позволяют зарегистрировать эти изменения путем дополнительной обработки сигналов, например методом некогерентного накопления многоканальной регистрации пространственной структуры интерференционного поля. Это может быть реализовано с использованием специальных просветных, например, сложных линейно-частотно-модулированных сигналов в интервале частот резонансного рассеяния волн объектами. Эксперименты по проверке эффективности предложенной обработки были проведены с использованием морского судна на линии протяженностью

около 25 км, а также в морской бухте с использованием объекта с малым волновым параметром на линии протяженностью около 1,5 км (см. рис. 1.4).

Рассмотренные закономерности рассеяния акустических волн на морских объектах как экранах, а также примеры экспериментов по проверке эффективности их измерения свидетельствуют о многообразии возможных технологических решений практических задач гидроакустики и гидрофизики.

### **1.3. Сравнительный анализ характеристик классических параметрических приемоизлучающих средств и прожекторной системы гидролокации**

Интенсивность волн сформированных комбинационных частот в параметрических излучателях невелика и в зависимости от характеристик среды изменяется в широких пределах (от  $4 \cdot 10^{-7}$  до  $19 \cdot 10^{-5}$ ) относительно интенсивности высокочастотной волны накачки [1, 2, 13–18]. Низкая интенсивность волн комбинационных частот затрудняет их выделение и практическое использование при регистрации объекта на больших дистанциях. Известны примеры усиления интенсивности волн комбинационных частот за счет изменения нелинейности среды [13, 14, 23–27]. Существуют технические решения параметрических приемников с длиной акустической базы, составляющей сотни метров. Так, например, в активно-пассивном гидролокаторе Тернера, а также в системах, основанных на применении протяженных пузырьковых завес, область нелинейного взаимодействия ультразвуковых волн накачки составляет единицы километров [21, 22, 29]. Примеры классических решений параметрического излучения и приема низкочастотных сигналов ограничены по дальности необходимостью применения высокочастотных (вплоть до ультразвуковых) волн накачки, но это не исключает их применение при решении задач направленного приема низкочастотных волн «малых амплитуд» антеннами «малых волновых размеров». В этой связи перспективным направлением развития прикладной гидроакустики является разработка той параметрического излучения-приема низкочастотных акустических волн с использованием низкочастотной подсветки среды.

Рассмотрим характеристики классических излучающих высокочастотных параметрических средств относительно низкочастотных прожекторных антенн. Американским акустиком Вестервельтом доказано, что характеристика направленности классического параметрического излучателя ограничивается пределом, который, в свою очередь, определяется линейными размерами излучателя, что выражается зависимостью

$$\theta = 4 \sqrt{\frac{\bar{\alpha}}{2\pi\lambda_p}},$$

где  $\bar{\alpha}$  – усредненный коэффициент поглощения исходных волн накачки;  $\lambda_p$  – длина низкочастотной разностной волны.

Установлено, что ширина характеристики направленности классического параметрического излучателя в пределах частот 10–100 кГц с учетом реальных коэффициентов поглощения и преобразования волн составляет единицы градусов. Характерной особенностью параметрических излучателей является также то, что на частотах ниже 5 Гц возможность формирования низкочастотных волн падает, что связано с малыми изменениями нелинейности среды и их предельными размерами. В то время как для про-

светной параметрической антенны экспериментально подтверждена возможность формирования волн с частотой 2 Гц при значениях исходных просветных волн 415 и 417 Гц на линии не менее 50 км. Характеристика направленности просветной параметрической антенны подобна характеристике пространственной антенны бегущей волны и может быть представлена как

$$D(\theta) = \frac{\gamma - (1 - \cos \theta) \sin(kR/2)(1 - \cos \theta)}{\gamma (kR/2)(1 - \cos \theta)}; \theta \approx 1,9\sqrt{\lambda/R},$$

где  $k$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны.

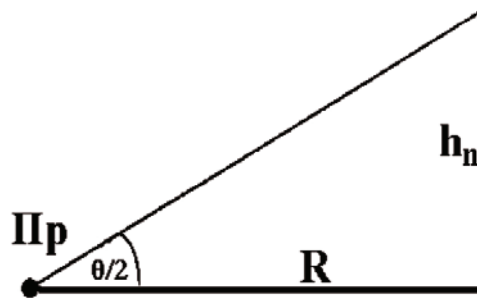


Рис. 1.5. Пространственная ширина зон Френеля (характеристика направленности)

Ширина характеристики направленности параметрической просветной антенны может быть определена на основе принципа построения структуры зон Френеля (рис. 1.5) и представлена как

$$\theta = 2 \cdot \arctg\left(\frac{h_n}{R}\right),$$

где  $h_n$  – максимальный радиус зоны Френеля;  $R$  – максимальная величина (половина) протяженности зон Френеля.

Так как ширина характеристики направленности просветной антенны ограничивается пределами первых зон Френеля, которые, в свою очередь, определяются длиной волны просветных сигналов и протяженностью барьерной линии, то направленность и помехозащищенность приемоизлучающей просветной антенны в отдельных случаях могут превосходить классические.

Рассмотрим характеристики классических приемных высокочастотных параметрических средств относительно низкочастотных просветных антенн. Процесс взаимодействия звуковых волн в нелинейной среде связан с модуляцией одного колебания другим, что сопровождается изменением амплитуды и фазы принимаемых сигналов. Наличие нелинейного преобразования и взаимодействия волн в среде приводит к образованию в сигналах дополнительных гармоник и составляющих комбинационных частот, которые проявляются как верхняя и нижняя боковые полосы сигналов подсветки и их гармоник. На основе этих закономерностей разработаны параметрические приемники, представляющие собой нелинейные антенны, преимущества и недостатки которых заключаются в следующем.



Параметрический приемник как нелинейная пространственно-развитая антенна имеет диаграмму направленности с узким раствором угла основного максимума и практически отсутствием боковых лепестков, что обеспечивает его высокую помехоустойчивость. Характеристика направленности параметрического приемника аналогична характеристике протяженной антенны бегущей волны, апертура которой соответствует протяженности ее виртуальной базы «излучатель сигналов накачки – приемник». Ширина характеристики направленности параметрического приемника не зависит от частоты сигналов накачки, она пропорциональна приблизительно удвоенному значению корня квадратного из отношения длины волны принимаемого сигнала к длине базы «излучатель – приемник сигналов накачки».

Одним из недостатков параметрического приема является низкая эффективность преобразования энергии сигналов накачки и сигналов объекта в энергию сигналов комбинационных частот. Так, согласно результатам теоретических исследований и многократным измерениям уровень сигналов комбинационных составляющих может составлять от  $-140$  до  $-170$  дБ относительно уровня сигнала накачки, что соответствует коэффициенту модуляции сигналов накачки от  $1 \cdot 10^{-7}$  до  $3 \cdot 10^{-9}$ . Это свидетельствует о больших технических трудностях, которые связаны с практической реализацией закономерностей параметрического приема сигналов объекта. К настоящему времени известны различные схемные решения параметрических приемников, но, несмотря на их разнообразие, все они реализуют три основных метода выделения сигнала объекта из боковых полос сигналов накачки.

К первому, более простому и распространенному, типу относятся полосовые приемники, в которых выделение сигналов объекта осуществляется путем узкополосной фильтрации одной из боковых полос и с ее последующей демодуляцией. Ограниченная добротность применяющихся в приемнике фильтров позволяет реализовать выделение сигналов боковых полос с интенсивностью до  $-150$  дБ относительно несущей. Второй разновидностью параметрических приемников является приемник, содержащий каскад полосно-заграждающих фильтров и более сложную схему демодуляции двух боковых полос. Приемники позволяют выделять сигналы боковых полос с интенсивностью до  $-180$  дБ относительно сигналов накачки. Третья разновидность параметрических приемников содержит блоки фазовой автоподстройки частоты накачки, которые позволяют исключить вредную модуляцию сигналов из-за вибраций и рывков приемника. Приемники работают более устойчиво в реальных условиях, но чувствительность их хуже, чем у полосно-заграждающих приемников и составляет  $-160$  дБ.

Другим недостатком параметрических приемников является отсутствие возможности приема сигналов объекта с частотами единицы-доли герца. Это объясняется ограниченной добротностью и узкой полосой применяемых полосно-заграждающих фильтров при выделении сигналов боковых полос из нелинейно преобразованных сигналов накачки. Наиболее информативные низкочастотные сигналы шумоизлучения объектов выделяются специальными методами цифровой обработки и узкополосной фильтрацией.

В разработку параметрических приемников, наряду с американскими акустикими, внесли существенный вклад отечественные ученые. В их работах [6, 7, 12–20] было показано, что суммарный результат взаимодействия низкочастотной и высокочастотной сигнальных волн накачки может быть выражен через закономерность их взаимной амплитудно-фазовой модуляции [95–97]. При совпадении траекторий сигналов объекта и подсветки среды, что характерно для реализации просветного метода гидролокации, выражения для индекса фазовой модуляции и давления комбинационных волн представляются следующими аналитическими зависимостями [1, 2, 6, 17, 23]

$$P_k = \frac{(\gamma+1) \omega_n P_n P_c L}{4\rho_0 (c_0)^3}; \quad \Delta\varphi = \frac{(\gamma+1) \omega_c P_c L}{2\rho_0 (c_0)^3}, \quad (1.2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент нелинейности морской среды;  $\omega_n$ ,  $\omega_c$ ,  $P_n$ ,  $P_c$  – частоты и давления исходных волн близкой частоты;  $L$  – протяженность акустической базы;  $\rho_0$  – плотность среды;  $c_0$  – скорость звука в среде.

В отличие от классических параметрических устройств излучения и приема сигналов просветная система, основанная на реализации закономерностей нелинейной акустики, представляет собой многолучевую широкомасштабную параметрическую систему с низкочастотной подсветкой среды. Параметрическое взаимодействие просветных сигналов близкой частоты, а также преобразование их полями (или специальными излучениями) объекта происходит на всем пути распространения в водной среде. Рассмотрим закономерность формирования просветной линии при распространении акустической энергии из точки излучения в точку приема. Энергия сигнала из точки излучения А в точку приема В (рис. 1.6) распространяется в пределах области пространства, границы которой определяются на основе принципа Гюйгенса и построения зон Френеля [1, 2, 8, 97].

На рис. 1.6. приведена качественная картина пространственной структуры зон Френеля между точками излучения и приема просветных сигналов. Каждая из зон (на рисунке они обозначены в порядке возрастания от 1 до  $h_n$ ) в пространстве образует эллипсоиды вращения. Причем первая зона образует ту область пространства, которая в основном определяет перенос энергии просветных акустических волн из точки излучения в точку приема.

Действие всех остальных зон в результате их попарной нейтрализации (вследствие отличия по фазе на  $180^\circ$ ) эквивалентно действию примерно половины первой зоны.

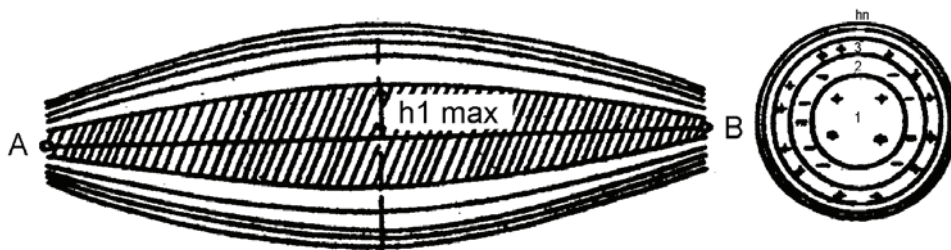


Рис. 1.6. Пространственная структура зон Френеля между точками излучения и приема акустических волн

То есть для того чтобы в точке приема получить энергию сигнала такой же величины, как и в свободном пространстве, необходимо первой зоне на всем пути распространения волн оставаться «чистой» от экранирования препятствиями или преобразования рассеивающими неоднородностями. Радиус  $h$  зоны номера  $n$  определяется по формуле Френеля

$$h_n = \sqrt{(R_1 R_2 \lambda n) / (R_1 + R_2)},$$

где  $R_1, R_2$  – расстояния, определяющие положение объекта на линии излучения-приема;  $\lambda$  – длина просветной акустической волны;  $n$  – номер зон Френеля (достаточно взять нечетное число зон, например три или пять) [1, 2].

При расположении в пределах пространства первой зоны Френеля излучающего объекта с сопутствующей нелинейной неоднородностью среды будет происходить не только экранирование проходящих волн, но также их интенсивное параметрическое преобразование на рассеивателях этой неоднородности. В этом случае первая зона Френеля выполняет функции пространственной (бестелесной) параметрической антенны бегущей волны [1, 2, 97].

Выражение (1.2) применительно к низкочастотной просветной системе не может быть использовано непосредственно, так как в нем рассматривается взаимодействие волн вблизи приемника. При взаимодействии волн на больших удалениях от приемника (десятки-сотни километров) в выражении (1.2) следует учитывать особенности просветной гидролокации [110–115]:

- затухание просветной волны  $P_n$ , обусловленное ее расхождением при распространении в волноводе, в соответствии с известными принципами, которое обратно пропорционально квадрату расстояния  $P_n / R^2$ ;
- взаимодействие волн по объему нелинейно-возмущенной среды  $V$ ;
- повышенную степень нелинейности среды в объеме взаимодействия, которая может составлять порядка 10–15 единиц;
- малое отличие частот просветных волн  $\omega_n$  и полезного сигнала  $\omega_c$ , которое в этом случае находится в пределах одного порядка и обеспечивает их более интенсивное взаимодействие.

С учетом указанных поправок аналитические зависимости для амплитуд параметрических комбинационных волн и индекса фазовой модуляции могут быть представлены в следующем виде:

$$P_k = \frac{(\gamma+1)\omega_n\omega_c P_n P_c V}{4\rho_0(c_0)^3 R^2}; \quad \Delta\varphi = \frac{(\gamma+1)\omega_c P_c V}{2\rho_0(c_0)^3 R^2},$$

где  $V$  – объем среды параметрического взаимодействия волн;  $\omega_c, P_c, \omega_n, P_n$  – частота и давление сигнальных и просветных волн;  $\gamma$  – коэффициент нелинейности морской среды;  $R$  – расстояние от точки излучения до точки расположения объема локации;  $\rho_0 c_0$  – плотность и скорость звука в невозмущенной среде.

Как видно из приведенных выражений, давление комбинационных волн и индекс фазовой модуляции аналогичны классическим зависимостям. Но полезная фазовая модуляция просветных сигналов информационными низкочастотными сигналами возрастает, что обусловлено усилением взаимодействия волн в объеме среды с повышенной нелинейностью.

Просветная низкочастотная акустическая система в параметрическом режиме излучения (приема) является обновленным вариантом антенны бегущей волны. В неоднородном волноводе ее лучи представляют собой «акустические трубки» равных фаз. Большая протяженность просветной параметрической антенны, а также возможность озвучивания среды когерентным облучением, как накачкой, обеспечивает улучшение её следующих характеристик: направленного излучения (приема) низкочастотных волн;

помехоустойчивости приема сигналов «малых амплитуд»; повышенной чувствительности приемного тракта при выделении полезных сигналов на фоне помех среды и реверберации.

Использование закономерностей нелинейного взаимодействия просветных акустических сигналов с гидрофизическими полями и излучениями объектов, а также модуляции пространственной амплитудно-фазовой структуры акустического поля, обусловленной движением объектов, делает просветный метод универсальным инструментом в решении задачи дальнего обнаружения гидрофизических полей малошумных объектов и неоднородностей среды. Следует отметить, что метод невозможно непосредственно использовать в приемных и излучающих трактах существующих станций, но он не требует сложных технических решений и разработок для внедрения в штатных корабельных и стационарных гидроакустических системах.

#### **1.4. Нелинейное взаимодействие волн различной физической природы в морской среде**

Закономерностями модуляции одних звуковых волн другими при их совместном распространении или пересечении в жидкостях и газах обусловлена нелинейность их взаимодействия и параметрическое преобразование. В работах [63–67, 112–120] показано, что использование фазовой модуляции в гидроакустических системах обнаружения и связи более предпочтительно, так как относительно амплитудной она не только значительно информационно емка, но и более помехоустойчива, что подтверждено результатами натуральных экспериментальных исследований по обоснованию эффективности различных видов модуляции параметра нелинейности морской среды.

Рассмотрим пример нелинейного взаимодействия трех волн различных по физической природе источников в проводящей морской среде. Это волна с частотой  $\omega_1$  от дополнительного источника накачки среды; измеряемая (информационная) низкочастотная волна с частотой  $\Omega$  от источника излучений; просветная волна накачки с частотой  $\omega_2$ , сформированная с условием  $\omega_1 \approx \omega_2$ . Будем считать, что суммарный сигнал от источника, поступающий в область взаимодействия с просветной волной, является амплитудно-модулированным. В случае использования в качестве источника звука шумовых сигналов, модулированных низкочастотным звуком, характер огибающей  $A(t)$  будет определяться частотой низкочастотной модуляции. При этом огибающая  $A(t)$  по форме будет совпадать с модулирующей функцией  $S(t)$ , которая описывается гармоническими колебаниями:

$$S(t) = S_0 \sin(\Omega t + \psi).$$

Огибающую амплитуды модулированного колебания от взаимодействия трех волн можно представить в виде

$$A(t) = A_0 + K_{\text{ам}} S(t) = A_0 + A_m \sin(\Omega t + \psi),$$

где  $\Omega$  – частота модуляции, определяемая информационной волной;  $A_0$  – амплитуда несущего колебания в отсутствие модуляции;  $S_0$  – амплитуда несущего колебания при наличии модуляции;  $K_{ам}$  – коэффициент пропорциональности;  $A_m$  – амплитуда изменения огибающей;  $\Psi$  – начальная фаза огибающей;  $t$  – время.

Отношение  $A_m / A_0 = m_A$  является коэффициентом модуляции; таким образом, мгновенное значение давления модулирующего колебания можно записать как

$$P(t) = A(t) \sin(\omega_1 t + \varphi) = A_0 [1 + m_A \sin(\Omega t + \psi)] \sin(\omega_1 t + \varphi),$$

где  $\varphi$  – начальная фаза модулирующего колебания;  $t$  – время.

Результирующее выражение для давления описывается известной формулой

$$P^*(t) = 0,5P^2 \left\{ J_0(m_p) \cos 2\omega t + J_1(m_p) [\cos(2\omega - \Omega)t - \cos(2\omega + \Omega)t] + \right. \\ \left. + J_2\left(\frac{2A_m}{P}\right) [\cos(2\omega - 2\Omega)t + \cos(2\omega + 2\Omega)t] + J_3\left(\frac{2A_m}{P}\right) [\cos(2\omega - 3\Omega)t - \right. \\ \left. - \cos(2\omega + 3\Omega)t] + \dots \right\}, \quad (1.3)$$

где  $J_n\left(\frac{2A_m}{P}\right) 0,5P^2$  – амплитуды  $n$ -х боковых составляющих;  $n$  – любое целое число;  $A_m$  – амплитуды модулированных волн;  $m_p$  – коэффициент модуляции;  $2\omega$  – частота нелинейно сформированной волны.

Анализ выражения (1.3) показывает, что спектр колебаний взаимодействующих волн состоит из бесконечного числа боковых составляющих, расположенных попарно – симметрично относительно удвоенной центральной частоты  $2\omega \approx \omega_1 + \omega_2$ , значения частот которых отличаются от центральной частоты  $2\omega$  на величину  $n\Omega$ . Вклад энергии от различных боковых составляющих спектра в суммарную мощность модулированного колебания определяется величиной  $2A_m / P$ . При малых значениях коэффициента модуляции  $m_p$ , спектр колебания состоит приблизительно из гармоник центральной частоты  $2\omega$  и двух боковых частот: верхней ( $2\omega + \Omega$ ) и нижней ( $2\omega - \Omega$ ).

Эксперимент по проверке эффективности использования фазовой модуляции низкочастотных просветных сигналов низкочастотными излучениями случайных источников проводился на шельфе Японского моря. Условия проведения эксперимента заключались в следующем. В береговом клине с глубинами от 200 (в точке приема сигналов) до 1000 м (в точке излучения сигналов) была сформирована гидроакустическая барьерная линия протяженностью около 25 км, прозвучиваемая сигналами частоты около 388 Гц. Судно – носитель подводного источника акустического и электромагнитного излучения пересекало барьерную линию (рис. 1.7, точки 1–3). Промодулированные акустическими и электромагнитными излучениями подводного источника и судна просветные сигналы принимались ненаправленными пространственно рассеянными одиночными приемниками.

При обработке данных измерялись сигналы разности фаз, проводился узкополосный спектральный анализ.

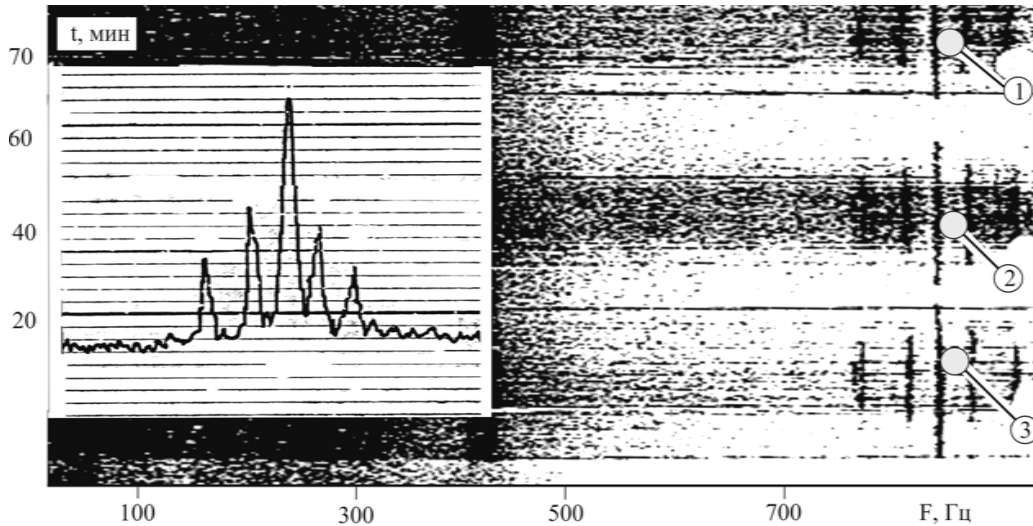


Рис. 1.7. Результаты эксперимента по исследованию параметрического взаимодействия электромагнитных волн с низкочастотной подсветкой среды

Электромагнитные волны излучались судном носителем на частоте 398 Гц, которые даже при интенсивном затухании в проводящей морской среде эффективно модулировали просветные волны в моменты пересечения гидроакустической барьерной линии, то приводило к модуляции и формированию комбинационных частот и их последующему выделению в приемных трактах просветной системы [1, 2, 96, 99–101].

### 1.5. Фазовая обработка сигналов в просветных параметрических системах мониторинга гидрофизических полей

Экспериментальными исследованиями в модельных и натуральных условиях было показано, что при пересечении объектом гидроакустической барьерной линии наряду с изменением уровня сигнала изменялась фаза и характер ее флуктуаций, которые проявлялись в отдельных модах (лучах) и определяли параметры флуктуаций суммарного сигнала в точке приема [99–101, 118–120]. Проведем оценку флуктуаций фазы сигнала с частотой  $\omega = 400$  Гц по отдельным модам колебаний сигнала, характерным для экспериментальной ситуации. Рассмотрим случай, когда ось волновода находится на глубине  $z = 0$ , а его толщина равна 30 м. Если принять, что движущийся вблизи оси канала объект перемешивает слой воды толщиной 30 м, то значения собственных чисел запишем в следующем виде:

$$\chi_m^2 = k_0^2 - \omega^3 \left( m - \frac{1}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\frac{1}{q} + \frac{1}{q'}} \right)^{\frac{2}{3}};$$

$$q = \frac{1}{1} \left( \frac{1}{c_0^2} - \frac{1}{c_1^2} \right); \quad q' = \frac{1}{1'} \left( \frac{1}{c_0^2} - \frac{1}{(c_1')^2} \right),$$

где  $C_1$  и  $C'_1$  – значения скорости звука на границах волновода;  $C_0$  – значение скорости звука на горизонте оси волновода;  $k_0$  – волновой параметр;  $\omega$  – частота;  $m$  – номер моды колебаний сигнала.

Флуктуации фазы моды номера  $m$  относительно случая невозмущенного акустического канала равны

$$\Delta\varphi = |\chi_m - \chi'_m| \Delta v,$$

где  $\Delta v$  – размер области возмущения, принимающий значения 30 м в пределах 1 км;  $\chi'_m$  – собственное число моды номера  $m$  в волноводе.

При заданных размерах области возмущения получились следующие значения флуктуации фазы сигналов:  $|\Delta\varphi_{1,2}| = 1,26$  рад;  $|\Delta\varphi_{2,3}| = 1,1$  рад;  $|\Delta\varphi_{3,4}| = 0,93$  рад. Расчеты на ЭВМ показали, что при таких флуктуациях фаз между модами сигнала возникают флуктуации амплитуд в суммарном сигнале. Их величина достигает порядка 5–10 дБ, что подтверждается результатами, приведенными в работах [1, 2, 52, 53, 112, 113].

На рис. 1.8. представлена спектрограмма флуктуаций фазы просветного сигнала модулированного излучениями объекта. Измерение фазы просветного сигнала относительно опорного проводилось для гидроакустической барьерной линии протяженностью 20 км, частоты сигналов подсветки – около 400 Гц. Прием сигналов осуществлялся одиночным ненаправленным гидрофоном донной антенны. На рис. 1.8 видно, что спектральная обработка фазы просветных сигналов с одиночного приемника не обеспечила подавление помех среды и возможность выделения сигналов шумоизлучения движущегося объекта.

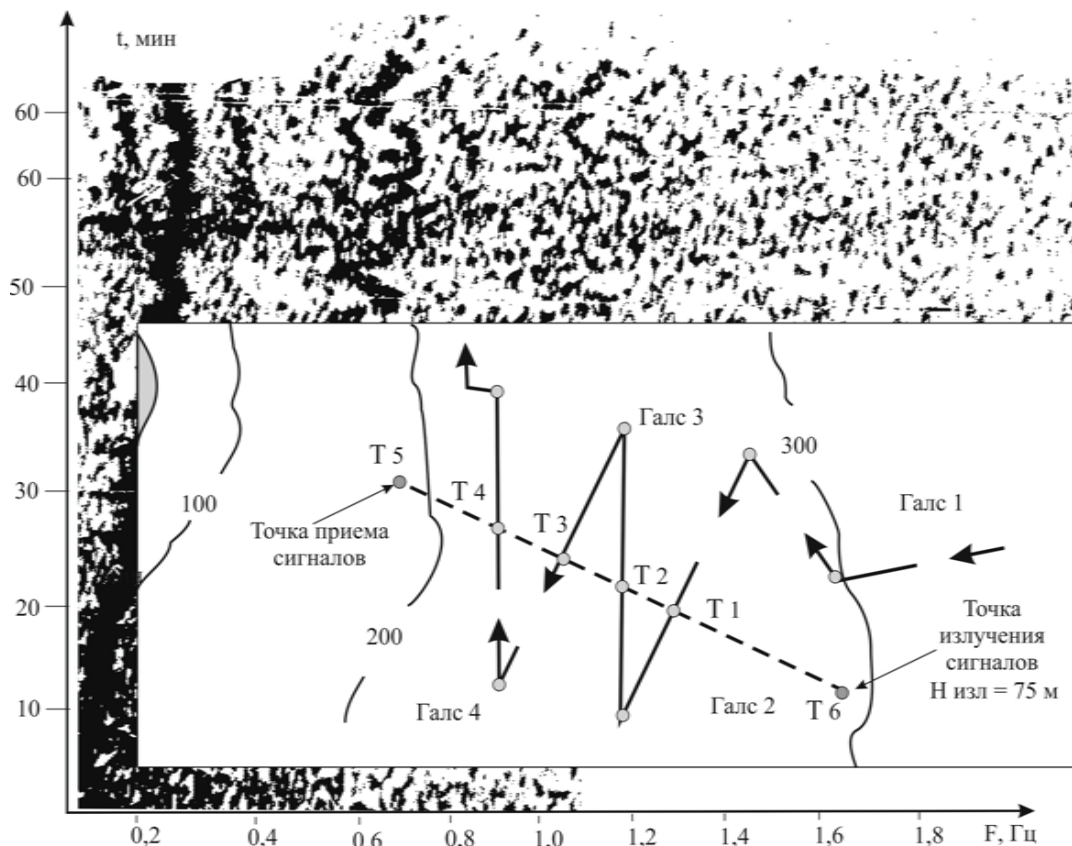


Рис. 1.8. Спектрограмма флуктуаций фазы просветного сигнала с одиночного приемника, модулированного излучениями движущегося объекта

На рис. 1.9. приведены спектр и спектрограмма флуктуаций разности фаз сигналов, модулированных объектом и принимаемых с горизонтально разнесенных на 200 м одиночных приемников донной антенны. Протяженность просветной линии составляет 25 км. Просветные сигналы излучались с частотой около 400 Гц. На рис. 1.9 видно, что при пересечении объектом барьерной линии в спектре просветных сигналов возникают устойчивые дискретные составляющие его шумоизлучения, что является эффективным признаком обнаружения объекта.

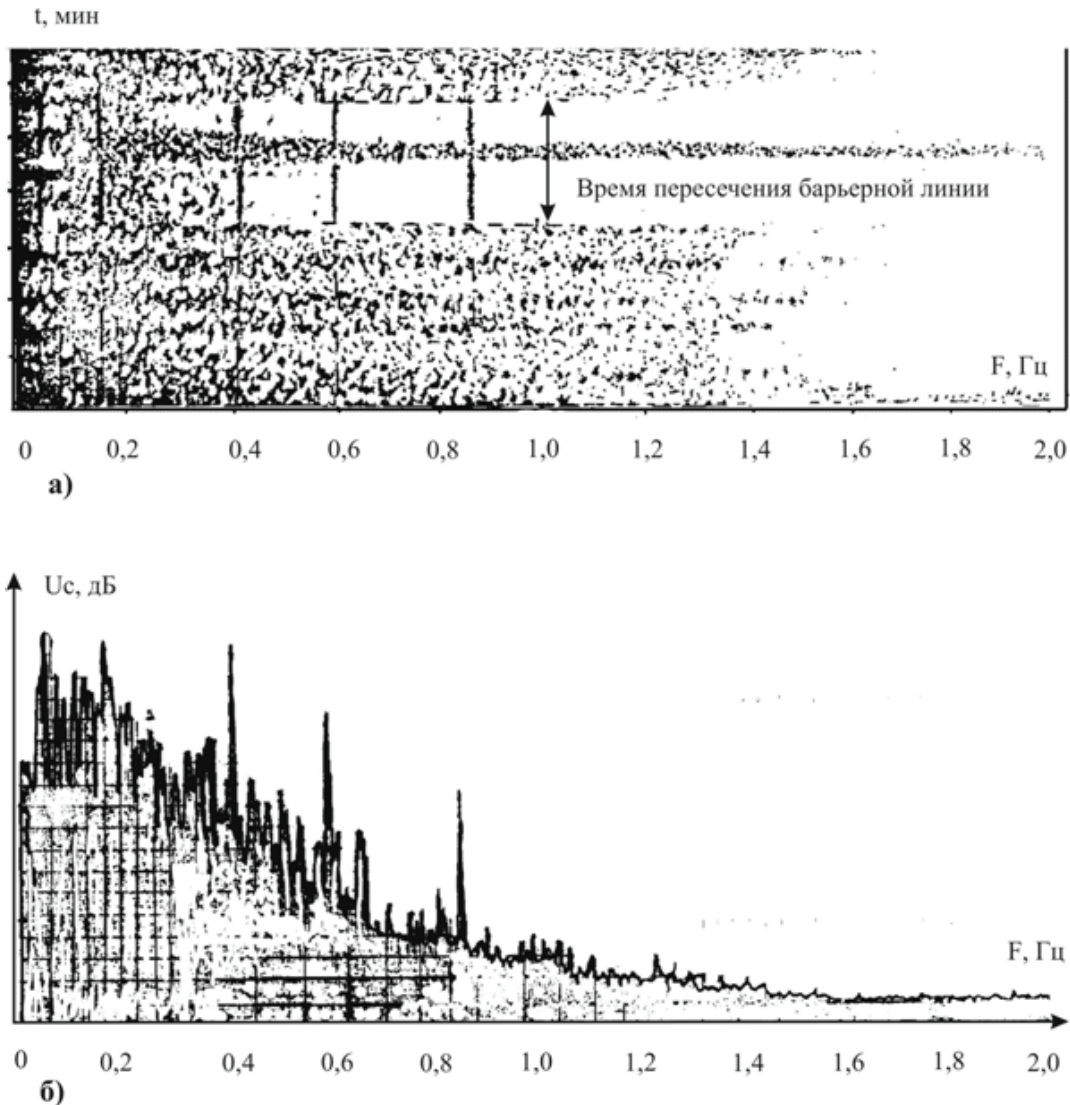


Рис. 1.9. Спектрограмма (а) и спектр (б) флуктуаций сигналов разности фаз с горизонтально разнесенных приемников на 200 м

На рис. 1.10 приведены спектр и спектрограмма разности фаз сигналов, принимаемых пространственно разнесенными на 10 км донными приемными базами на мелководной морской трассе протяженностью 25 км. Просветные сигналы излучались с частотой 31,5 Гц. В качестве информационных сигналов использовались излучения морского судна. Из рис. 1.10 видно, что спектральная обработка разности фаз принимаемых просветных сигналов с пространственно разнесенных приемников обеспечила возможность подавления помех среды как случайных процессов, и эффективное выделение признаков движущегося объекта как источника регулярного излучения.



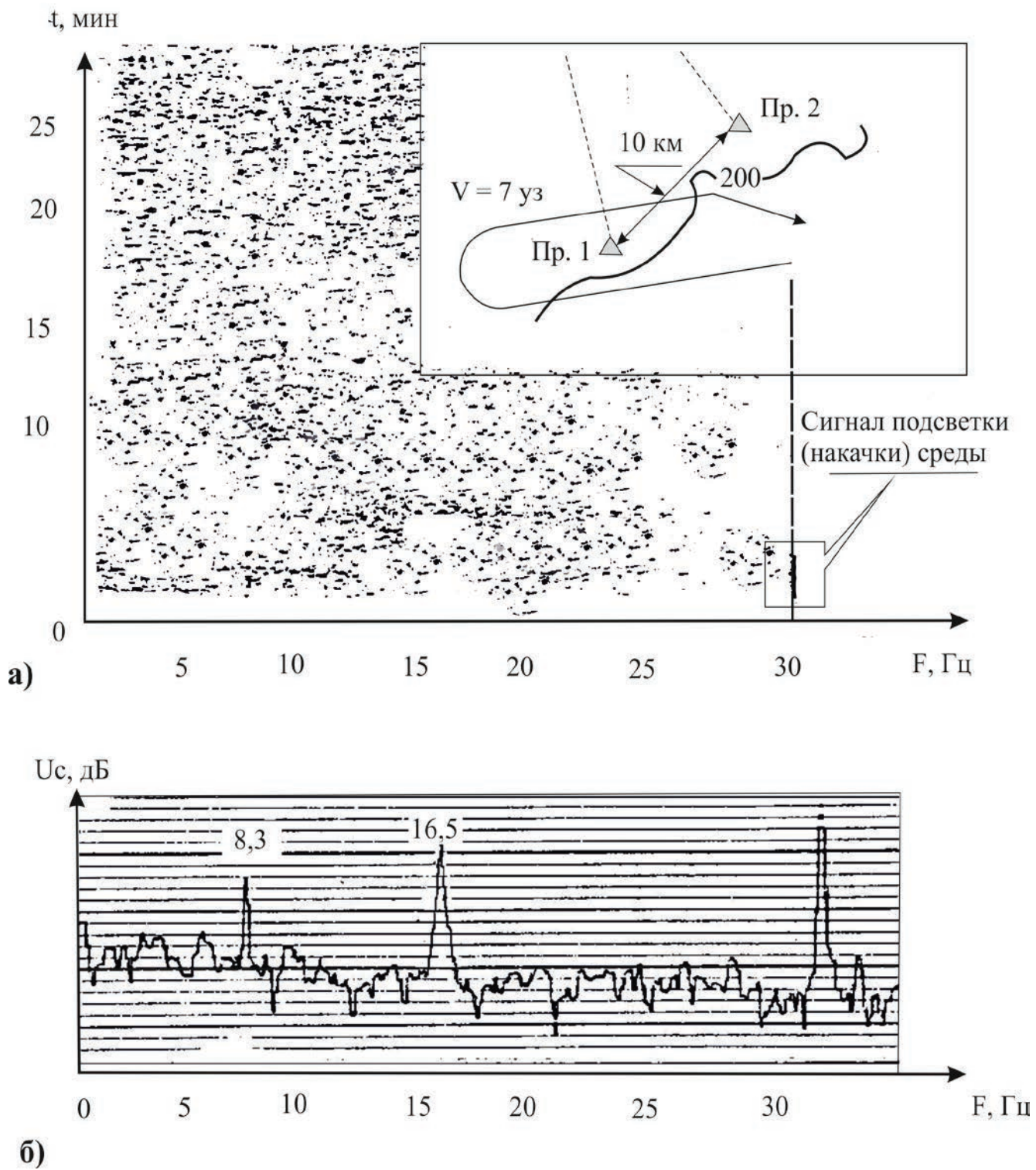


Рис. 1.10. Спектр (а) и спектрограмма (б) сигналов разности фаз горизонтально разнесенных лонных станций на 10 км

## 1.6. Использование закономерностей взаимодействия акустических и электромагнитных волн в параметрических системах

Рассмотрим процесс формирования акустических волн, основанный на усилении и модуляции параметрических свойств морской среды в ближних и дальних зонах излучающих и приемных устройств просветных систем [1, 2, 30–34, 118–129]. Усиление интенсивности формируемых акустических волн достигается как акустическим методом, так и методом, основанным на использовании электромагнитных волн накачки среды. При этом новым направлением при параметрическом излучении и приеме акустических волн является использование энергии электромагнитных волн как в качестве возбуждения (усиления) нелинейных свойств морской среды, так и в качестве электромагнитной накачки среды [105].

Процесс распространения электромагнитной волны в морской среде описывается уравнением диффузии, математические основы которого опираются на теорию распространения электромагнитной волны в проводящей жидкости. Электрические токи, генерируемые электромагнитной волной, переходят в джоулево тепло. Диссипативные потери на ток проводимости в морской воде преобразовываются в тепловые потери, которые, в свою очередь, изменяют механические характеристики проводящей жидкости (плотность, температуру и теплоемкость).

При пропускании упругой волны по модулированной в пространстве нелинейной среде её параметры будут модулированы за счет изменения ее фазовой скорости. Спектр акустической волны также изменится, в нем появятся высокочастотные и низкочастотные составляющие сигнала. Вследствие потерь на распространение звука в среде высокочастотные упругие волны будут интенсивно затухать, а низкочастотные волны будут распространяться на большие расстояния. Поскольку область параметрического взаимодействия сигнала (прежде всего, сигнала разностной частоты) с модулированной средой составляет только несколько длин волны, то тип антенны и физика формирования направленности в этом случае подобны формированию диаграммы акустической параметрической антенны бегущей волны [97]. Любые изменения плотности среды и давления при постоянной температуре приводят к изменению фазовой скорости звука в зоне взаимодействия электромагнитной волны с упругой через проводящую среду. Таким образом, если излучать электромагнитную волну гармонической частоты, то фазовая скорость упругой волны будет изменяться с той же частотой.

Количественные характеристики глубины модуляции можно получить, используя конкретные инженерные модели. Очевидно, что другие типы волн (например, гидродинамические) при условии их взаимодействия с электромагнитными волнами также могут быть использованы. Пример параметрического взаимодействия акустических и электромагнитных волн в морской воде приведен на рис. 1.11. В эксперименте исследовалась возможность формирования параметрических волн суммарной ( $F_a + F_{эм}$ ) и разностной ( $F_a - F_{эм}$ ) частоты и их гармоник.

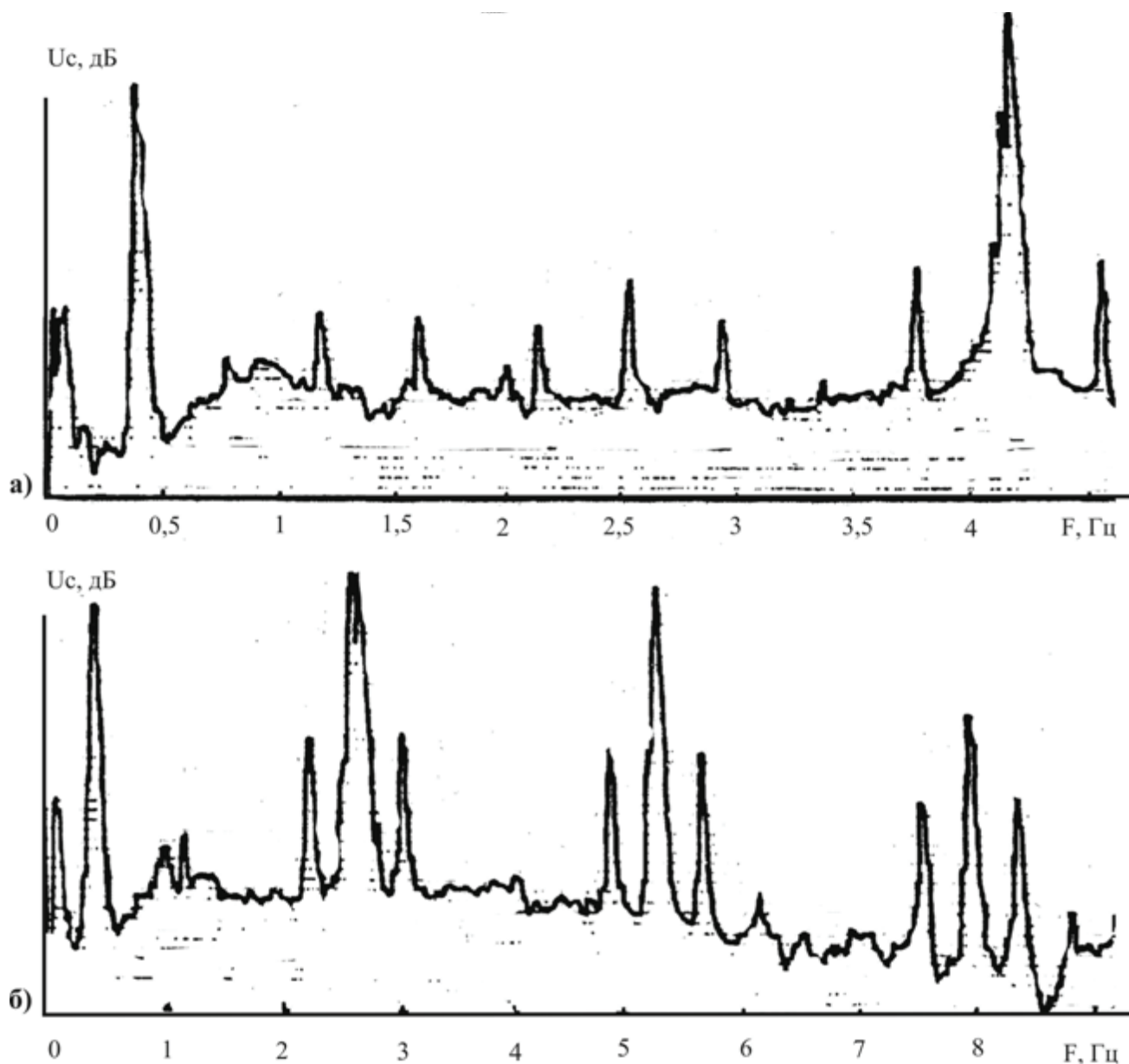


Рис. 1.11. Спектры параметрических составляющих акустических и электромагнитных волн в морской воде:  
а – при  $F_a = 4140$  Гц и  $F_{эм} = 390$  Гц ;

Испытания способа взаимодействия акустических (просветных) и электромагнитных (информационных) волн были проведены в различных условиях – в морской среде и в гидроакустическом бассейне с пресной водой.

На первом этапе были выполнены морские измерения, близкие к лабораторным. Излучатель (преобразователь) и приемник (гидрофон) просветных акустических сигналов опускались с носа и кормы заякоренного судна и посредством экранированного кабеля соединялись с лабораторным приемоизлучающим трактом, в качестве которого использовался специально сформированный измерительный комплект аппаратуры.

Протяженность просветной линии составляла 100 м. В качестве излучателя электромагнитных волн использовался электромагнитный вибратор, который размещался на горизонте просветной линии. Тракт формирования излучаемых электромагнитных волн был сформирован на базе звукового генератора стабильной частоты с трансформаторным выходом.

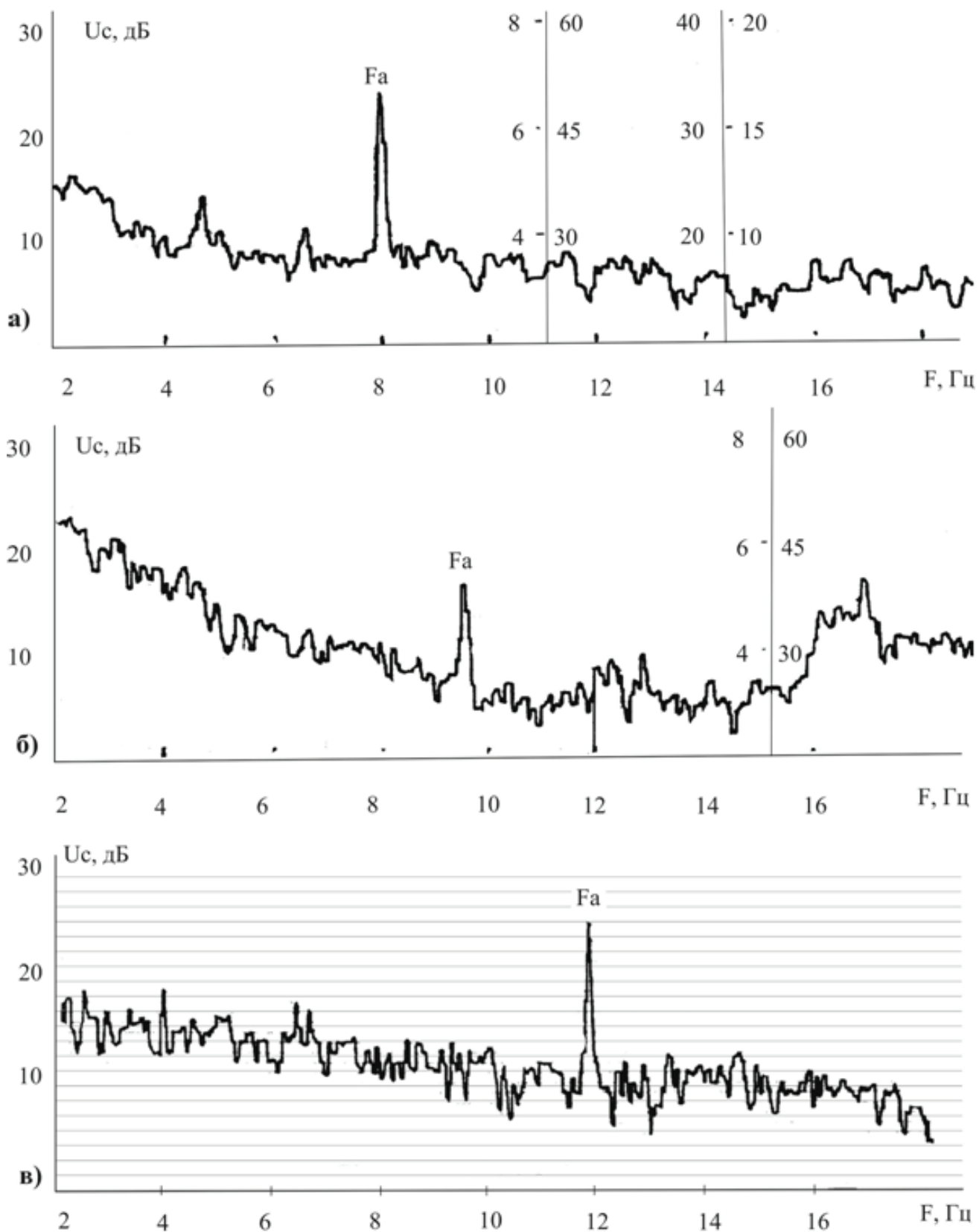


Рис. 1.12. Спектры просветных акустических сигналов, модулированных электромагнитными волнами при распространении в пресной воде: а – при  $F_a = 8$  кГц и  $F_{эм} = 8,5$  кГц; б - при  $F_a = 9,5$  кГц и  $F_{эм} = 10$  кГц; в - при  $F_a = 12,3$  кГц и  $F_{эм} = 12$  кГц

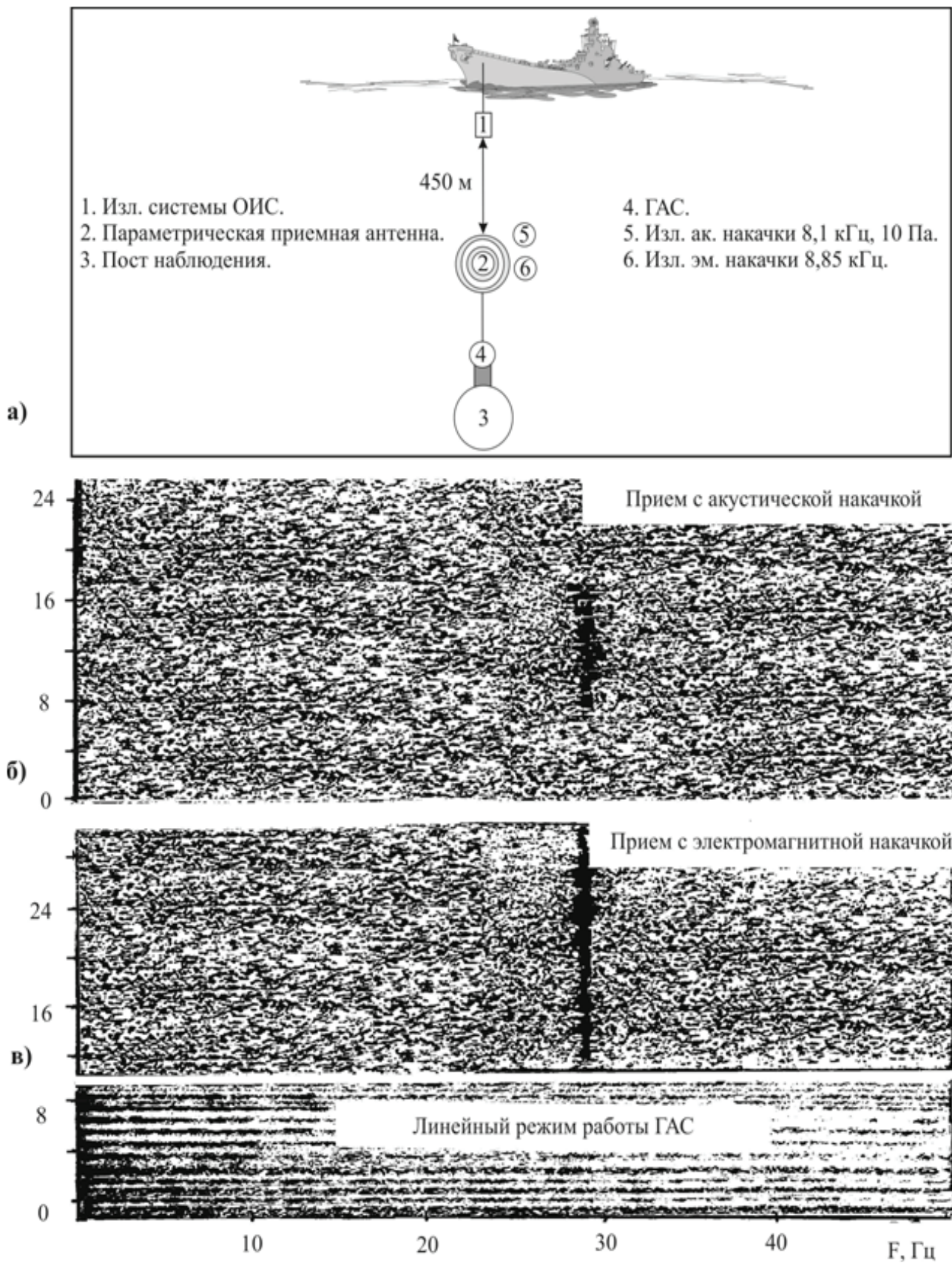


Рис. 1.13. Схема расположения оборудования при проведении эксперимента (а) и спектрограммы тонального сигнала (частота – 28,5 Гц), зарегистрированные в параметрическом режиме приема с акустической (б) и электромагнитной накачкой морской среды (в), и линейном режиме работы ГАС (в)

Принимаемые сигналы подсветки усиливались, затем, с помощью узкополосного анализатора, выделялись их спектры, которые регистрировались на самописце. При измерениях были проверены различные варианты соотношения частот акустических просветных и модулирующих электромагнитных волн. Проведёнными измерениями была подтверждена закономерность эффективного взаимодействия акустических и электромагнитных волн при их совместном распространении в проводящей морской среде. При этом подтверждена основная (классическая) закономерность параметрического взаимодействия волн, а именно: интенсивность параметрического взаимодействия сигналов повышается с уменьшением разности частот взаимодействующих волн, т.е. увеличивается как уровень сформированных параметрических составляющих, так и количество их гармоник.

Аналогичные экспериментальные исследования закономерности нелинейного взаимодействия акустических (просветных) и электромагнитных (информационных) волн в пресной воде проводились в гидроакустическом бассейне объемом  $15 \times 7,5 \times 6 \text{ м}^3$ . При измерениях были проверены различные варианты соотношения частот акустических просветных и модулирующих электромагнитных волн. Результаты эксперимента показали (рис. 1.12), что в пресной (непроводящей) водной среде нелинейное взаимодействие упругих и электромагнитных волн отсутствует, что ограничивает возможности практического применения просветной гидролокации в пресных водоемах [1, 2].

На втором этапе были проведены морские испытания на просветных гидроакустических барьерных линиях (ГАБЛ) различной протяженности [101, 103, 105, 106]. Морские испытания по проверке параметрического приема электромагнитных волн были выполнены на просветных гидроакустических трассах различной протяженности. Они подтвердили теоретические предпосылки по вопросу взаимодействия акустических и электромагнитных волн в проводящей морской среде. Исследования по проверке и сравнительной оценке эффективности использования гидроакустических станций в штатном (линейном) и параметрических (с использованием акустической и электромагнитной накачки среды) режимах проводились следующим образом. Излучатель «полезных» акустических сигналов опускался с борта заякоренного судна. Приемная гидроакустическая станция с рефлекторной антенной устанавливалась в придонном варианте. Излучатели сигналов акустической и электромагнитной накачки располагались на расстоянии около 100 м от антенны станции. Эксперимент с использованием электромагнитной накачки показал более высокую, относительно акустической накачки, чувствительность и помехоустойчивость приема информационных сигналов (рис. 1.13).

## **1.7. Результаты морских испытаний макетов параметрических систем.**

### **Рекомендации по формированию стационарной просветной системы мониторинга гидрофизических полей**

Параметрический прием акустических сигналов «малых амплитуд» в просветных системах основан на нелинейном взаимодействии принимаемой низкочастотной волны с интенсивной низкочастотной волной подсветки среды на пути их совместного распространения. Физическая сущность нелинейного взаимодействия просветных волн и формирования параметрических составляющих комбинационных волн суммарной и разностной частоты при их совместном распространении в нелинейной среде заключается во взаимной модуляции фронта одной волны другой, в результате чего фазовая скорость

их распространения взаимно преобразуется. Это приводит к амплитудно-фазовой модуляции принимаемой волны накачки.

Способ регистрации полей объектов, основанный на подсветке морской среды и разнесенном излучении-приеме сигналов, и его реализация на стационарном измерительном полигоне сформулированы в работах [30–34]. Основными признаками регистрации акустических полей объектов являются затенение сигналов и искажение установившегося акустического поля подсветки контролируемой морской среды движущимся объектом, что выражается в модуляции его амплитудно-фазовой структуры.

Экспериментальными исследованиями способ измерения полей объектов был уточнен и дополнен признаками, учитывающими модуляцию сигналов подсветки характерным инфранизкочастотным излучением объектов, а также их резонансными колебаниями при движении в среде в диапазоне частот ниже 1 Гц. Способ включает также признаки, учитывающие искажение движущимся объектом фазового фронта гармонической волны и возникновение в сигнале дополнительных гармоник. В этом случае пространственная модуляция поля сигналов подсветки выражается в изменении характера спектров флюктуаций огибающей для сигналов амплитуд и фаз в диапазоне частот ниже 1 Гц [96, 98, 99, 100, 103, 104, 107].

Облучение среды в просветных системах проводят низкочастотными вплоть до 30 Гц гидроакустическими сигналами. Движущиеся в контролируемой акватории подводные или надводные объекты регистрируются путем измерения следующих величин: средних значений и дисперсий флюктуаций амплитуд и фаз принимаемых просветных сигналов, а также спектров флюктуаций их амплитуд и фаз. Спектры огибающих и боковых полос несущей сигналов подсветки получают в частотных диапазонах: 0–1 Гц, 0–10 Гц, 0–100 Гц. Для выделения признаков искажения сигналов нижней боковой полосы используется диапазон частот  $0 \dots f_{\text{подсв}}$ .

Просветная система включает заякоренную вертикальную антенну, состоящую из приемных блоков и радиобуя, и автономную излучающую систему, состоящую из ненаправленных излучающих блоков, которая может быть мобильно развернута в дрейфующем варианте в глубоководном районе моря. Прием, обработку и регистрацию сигналов проводят многоканально, но не менее чем с двух приемников. Дополнительная излучающая цепочка ненаправленных преобразователей позволяет обеспечивать максимально возможную засветку контролируемой среды.

Выбор места, горизонтов излучения и приёма сигналов осуществляют по специально разработанным программам расчета пространственной амплитудно-фазовой структуры акустического поля [74, 101, 113]. Блоки излучающих и приемных антенн устанавливаются на горизонтах обеспечивающих акустическую подсветку вероятного расположения и маневрирования объектов на акватории, а также надежный прием прихода сигналов, модулированных полями шумящих объектов, которые не испытывают отражений от дна и поверхности и дают энергетический выигрыш от 5 до 20 дБ. Объекты или неоднородности среды регистрируются по наличию совокупности измеряемых признаков в сигналах подсветки, а также по наличию изменений измеряемых величин относительно аналогичных величин, соответствующих неискаженному установившемуся акустическому полю. Объекты могут быть зарегистрированы как стационарной, так и мобильной системами, основанными на подсветке среды [1, 2, 80, 87, 90, 98, 121, 124, 126]. Наиболее оптимальным вариантом системы контроля среды на данном этапе разработки излучателей и приемных антенн являются стационарные системы.

Новизна просветного метода и измерительной системы определяется большими протяженностями обследуемых океанских акваторий и масштабностью измерительной системы.

Эти факторы обуславливают применение низкочастотных (десятки-сотни герц) просветных сигналов и упрощение измерительной системы (до 2 излучателей и 2–3 приемников), что, в свою очередь, позволяет измерять не геометрические образы объектов, а только характеристики их полей (акустических, гидродинамических, электромагнитных и других), которые в пространственно-временном масштабе регистрируются на носителях информации. Решение задачи дальней регистрации и определения места морских объектов эффективно объединяет закономерности активно-пассивной и параметрической гидроакустики. При этом регистрируются спектральные (или статистические) характеристики флюктуаций амплитуды и фазы просветных сигналов, обусловленные модуляцией, а также параметрическим преобразованием сигналов движущихся объектов и их полями различной физической природы.

Экспериментальные исследования по реализации просветной параметрической системы были проведены в Татарском проливе Японского моря. Протяженность акустической трассы составляла около 200 км (рис. 1.14).

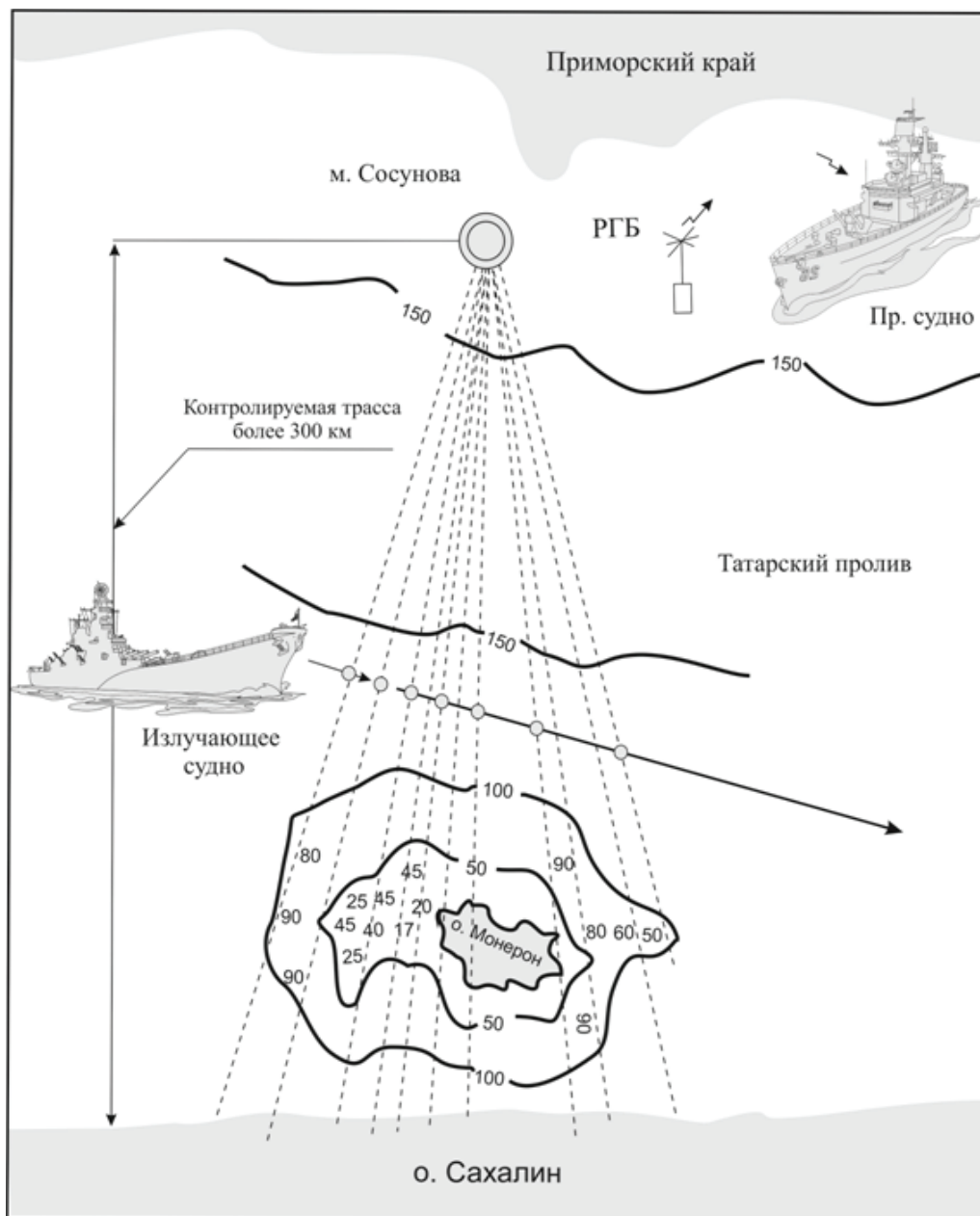


Рис. 1.14. Схема эксперимента по измерению шумов моря на шельфе о. Монерон



В качестве приемной базы использовался радиогидроакустический буй, связанный по радиоканалу с приемной лабораторией опытового судна.

В качестве излучающей базы использовался заборный излучатель, который буксировался другим судном и озвучивал среду акустическими сигналами с частотой 400 Гц. В эксперименте были выполнены измерения спектральных характеристик анизотропии инфразвуковых шумов в шельфовой зоне о. Монерон, формируемых техническими объектами, расположенными на береговой части о. Сахалин.

Эффективная реализация дальнего параметрического приема низкочастотных сигналов в рассмотренных экспериментах объясняется наличием областей среды с усиленным нелинейным взаимодействием сигналов.

Протяженность просветной морской трассы составляла около 30 км. На рис. 1.14 приведена спектрограмма сигналов разности фаз, принимаемых горизонтально разнесенными на 200 м одиночными приемниками донной антенны. Частота просветных сигналов составляет около 400 Гц.

Таким образом, просветная активно-пассивная система представляет собой широкомасштабный параметрический приемник дальнего приема информационных сигналов «малых амплитуд» в звуковом и инфразвуковом диапазонах.

Опыт морских экспериментальных исследований сформировал идею совместной реализации стохастических антенных решеток и низкочастотного просветного активно-пассивного и параметрического метода гидролокации неоднородностей морской среды [1, 5, 102].

Совместная реализация стохастических антенных решеток и просветных систем, с меньшим числом приемных элементов, обеспечивает высоко направленный прием низкочастотных просветных сигналов, что, в свою очередь, дает возможность углового (до единиц градусов) разделения приходов лучей и позволяет решать задачу определения места наблюдаемых неоднородностей на озвучиваемых акваториях. Преимущества стохастических антенных решеток обеспечиваются за счет специальной обработки информации в приемном тракте радиогидроакустической системы, который совместно со случайной апертурой антенны образует пространственный корреляционный фильтр [46, 102]. Случайное расположение элементов антенны обеспечивает подавление помех среды определенного диапазона частот, а также выделение на фоне помех слабых регулярных сигналов.

Для совместной реализации просветного метода гидролокации и стохастических антенных решеток мелководный измерительный полигон целесообразно оборудовать следующим образом. Приемные системы, соединенные кабелем с корабельными и береговыми лабораториями, устанавливаются на свале глубин (на удалении 3–5 км от линии перегиба морского дна). Многоэлементные антенные решетки должны иметь сквозные тракты усиления для последующей корреляционной обработки и формирования характеристики направленности. Пространственно-развитые антенны должны включать разнесенные по вертикали и горизонтали одиночные приемные элементы со сквозными трактами фазовой обработки просветных сигналов. Для отработки задач дальнего измерения вторичных полей объектов акустическую подсветку приемных систем, расположенных на мелководье, целесообразно осуществлять с глубоководной стороны на дистанциях десятки-сотни километров.

## 1.8. Акустический мониторинг биологических запасов просветными гидроакустическими системами

Кратко проанализируем влияние на морскую ихтиофауну пневматических излучателей при проведении сейсморазведочных работ.

Первые исследования воздействия на морскую фауну были начаты в 50-х годах прошлого столетия с использованием взрывных веществ. В 60–70-х годах при сейсморазведке начинают применяться устройства, использующие газовые смеси электроимпульсных излучателей и пневматических источников разных модификаций. В эти годы исследования выполняли Б.В. Выскребцев, В.Р. Протасов, Э.Х. Векилов и др., а также зарубежные специалисты. С 1987 г. в сейсморазведке используются в основном параметрические излучатели (ПИ). Современные ПИ формируют импульсы с временем от пика до пика длительностью в 6 мс. Наборы ПИ производят шум с амплитудой давления в 255 Па относительно 1 мкПа на расстоянии 1 м от источника или 218 дБ на расстоянии 50 м от источника, или 201 дБ на расстоянии 500 м от источника. На расстоянии более 20 м от источника пиковое акустическое давление становится ниже некоторого критического порога (около 230 дБ), и набор ПИ уже не оказывает летального воздействия на морские биологические объекты (МБО).

В последнее десятилетие были проанализированы особенности физических процессов, протекающих вблизи источников волн звукового давления, а также проведены многочисленные эксперименты по оценке влияния ПИ на морские организмы – планктон, бентос, различные виды рыб (включая все стадии жизненного цикла – икру, личинки, молодь, взрослых рыб), морских млекопитающих (ММ). Исследования проводились в разных морях с мечеными отдельными особями рыб, с большим скоплением рыб, а также непосредственно в процессе их лова (сетями и др.). При этом результаты воздействия ПИ фиксировались на разных уровнях: поведенческие реакции, физиологические и морфологические нарушения (органов, тканей, физиологических функций, состава крови и т.д.). Исследовались как непосредственные реакции МБО на воздействия ПИ, так и «последствия» на развития икры, личинок и молоди рыб.

Установлено, что используемые в настоящее время ПИ являются наиболее «мягкими» по своему воздействию на МБО, тем не менее они представляют определенную экологическую опасность для МБО. При этом имеющиеся в литературе сведения о характере влияния ПИ на МБО не вполне однозначны. Большинство специалистов считают, что упругая волна, возбуждаемая ПИ, за границей радиуса безопасности, не превышающего величину 10 м, не вызывает гибели рыб, планктона и особенно ММ. Поясним, что под радиусом безопасности понимают некоторую геометрическую характеристику условной зоны, в том числе и охватывающей источник, за пределами которой воздействие импульса давления не вызывает изменений жизненно важных функций МБО. Внутри радиуса безопасности на удалении нескольких метров от ПИ существует летальная зона. Эти же специалисты отмечают, что летальное воздействие существует только для планктона, икры и личинок рыб, а также ошибочно высказывают мнение о том, то взрослые особи рыб и ММ практически не подвержены летальному воздействию. При этом, противореча самим себе, отмечают, что речь идет о гидробионтах, у которых отсутствуют воздушные полости и плотность тела достаточно однородна, а в качестве примера «стойкости» к воздействию ПИ приводят бактерии и грибы, у которых малые геометрические размеры и примерно одинаковая с морской средой плотность тела. Не менее странным выглядит и их заключение о полной экологической безопасности ПИ:

«Звуковое давление, способное причинить какой-либо вред морским организмам, плохо изучено, но вероятная дальность воздействия ПИ для ММ – менее 100 м, а для рыб – менее 200 м. Многие беспозвоночные и ММ обладают слабым восприятием низких частот, поэтому влияние на их поведение может происходить только вблизи от источника».

Сделаем несколько замечаний относительно некорректности высказываний некоторых отечественных специалистов. «...Уровень сейсмических сигналов в морской среде примерно такой же, как при движении судов...» На самом деле на 1–2 порядка превосходит. Как уже было отмечено, набор ПИ производит шум с амплитудой звукового давления в 255 Па на расстоянии 1 м от ПИ, в то время как приведенная к 50 м шумность современных кораблей и судов в этом же диапазоне частот составляет 160–180 дБ относительно 1 мкПа. При этом давно установлен факт отпугивания рыб с расстояний до 300 м от рыбопромыслового судна среднего водоизмещения. «...Животные, имеющие твердый панцирь (например, крабы), практически никакого действия от пневматических источников не испытывают...». Практически, панцирь краба может лишь частично защитить его от ультразвука, отразив часть акустической энергии, но от инфразвуковых и низких звуковых частот защитить крабов не может. «...Поражающее действие сейсмических съемок на икру и личинки промысловых рыб незначительны...» Результаты работ зарубежных специалистов говорят об обратном, при этом даже из уцелевших икринок вырастает большой процент «рыб-мутантов».

Длительно и детально изучалось воздействие низкочастотных (НЧ) гидроакустических полей на основные виды промысловых рыб (80 % которых имеют плавательный пузырь или у которых желудок выполняет роль плавательного пузыря) и ММ (касаток, сивучей, нерп и др.). Исследования проводились как в рамках Программы по оценке экологической безопасности использования НЧ гидроакустических средств (ГАС) ВМФ с высоким энергетическим потенциалом (большой дальностью действия), так и при разработке способов управления поведением ММ и рыб: отпугивание и вытеснение из района промысла и от подводных технических сооружений, приманивание к орудию лова и т.д. Результаты собственных исследований однозначно говорят о негативном воздействии НЧ гидроакустических полей на МБО, и, в первую очередь, на ММ и рыб с плавательным пузырем. Другое дело, что они достаточно подвижны и стараются покинуть район проведения сейсморазведки. Малоподвижные особи, к которым относятся икринки и личинки рыб, беспозвоночные и др. вынуждены оставаться в данном районе, и степень воздействия на них необходимо определять с учетом генетических изменений у последующих поколений.

В странах, где осваивается континентальный шельф, людей (прежде всего рыбаков и экологов) интересует, в каких районах будут проходить сейсморазведочные работы, их объем, продолжительность, воздействие на обитателей моря, величина возможного экономического и экологического ущерба, так как зачастую сейсморазведка проходит в районах нагула ценных пород рыб, добычи краба, обитания ММ и т.д.

Действие сейсмических сигналов на живые организмы может быть, в зависимости от расстояния до них, разным: гибель, физическое повреждение органов (особенно имеющих воздушные полости) и тканей, поражение системы ориентации (например, в поиске пищи и др.), изменение общей двигательной активности, нарушения в функционировании информационных каналов (для морских млекопитающих) и т.д. Особенно уязвимы зоопланктонные организмы, рыбы на ранних стадиях развития (в том числе икринки рыб) и малоподвижные морские биологические объекты, которые просто физически не могут, в отличие промысловых рыб и ММ, своевременно покинуть «опасную» для них зону. При этом следует заметить, что длительные и масштабные сейсми-

ческие съемки однозначно способны нарушить пути миграции рыб, рассеивать их нерестовые скопления и т.д., что негативно скажется как на состоянии запасов рыб, так и на их промысле.

Таким образом, специалисты выделяют следующие условные зоны воздействия ПИ на МБО, особенно имеющие воздушные полости (морские млекопитающие и 80 % промысловых рыб):

- зона летального действия – до 30–40 м от ПИ;
- зона повреждения внутренних органов (имеющих воздух) – до 300–400 м от ПИ;
- зона гидроакустического вытеснения – от нескольких сот метров до единиц километров;
- зона подавления информационных каналов морских млекопитающих – от единиц до десятков километров;
- зона слышимости – несколько десятков километров.

Интенсивное освоение биологических ресурсов океана обуславливает необходимость ускоренной разработки и внедрения эффективных гидроакустических технологий и реализующих их систем, способных решать задачи оперативного обследования протяженных акваторий, дальнего обнаружения рыбных косяков, их миграции. Решение этих задач достаточно успешно достигается применением технических разработок нетрадиционного просветного акустического метода гидролокации, преимуществом которого является возможность его реализации при выполнении мероприятий по контролю морской экономической зоны. Наиболее эффективным и актуальным направлением народнохозяйственного применения просветного гидроакустического метода являются мобильные поисковые системы промыслового рыболовства.

Итак, рассмотрим сущность реализации дальнего обнаружения косяков рыб и других скоплений морских организмов мобильными «просветными» акустическими системами.

Рассматриваемый способ поиска косяков рыб (КР) и других скоплений морских биологических организмов (МБО), например звукорассеивающих слоев (ЗРС), основан на реализации закономерностей рассеяния и расфокусирования просветных гидроакустических сигналов обнаруживаемыми объектами [44, 65, 72, 73, 124].

В отличие от классического метода эхолокации, основанного на использовании рассеянной в обратном направлении (отраженной) части энергии сигналов, в просветном гидролокационном методе используется информация о волнах (сигналах), рассеянных объектом в прямом направлении, которые, накладываясь на проходящую прямую волну, образуют интерференционную картину. В конечном счете это выражается в общем спадании (затенении) уровня и скачка фазы принимаемых сигналов, в наличии пространственной и амплитудно-фазовой модуляции принимаемых просветных сигналов, а также сопровождается изменением (скачком) статических характеристик флуктуаций их амплитуды и фазы, что может быть использовано в протяженных поисковых системах в качестве эффективного признака обнаружения объектов [1, 2, 5, 72, 73, 124].

При обработке принимаемых сигналов непрерывно измеряют и регистрируют средние значения флуктуаций их уровня и фазы в процессе поиска КР или МБО в районе. Решение о наличии на акватории КР или МБО принимается по превышению измеряемыми величинами заданных пороговых уровней. Время наблюдения превышений и их величины являются классификационными характеристиками обнаруживаемых скоплений. Реализация просветного акустического метода поисковой системой подтверждается результатами испытаний, приведенными на рис. 1.15, 1.16.

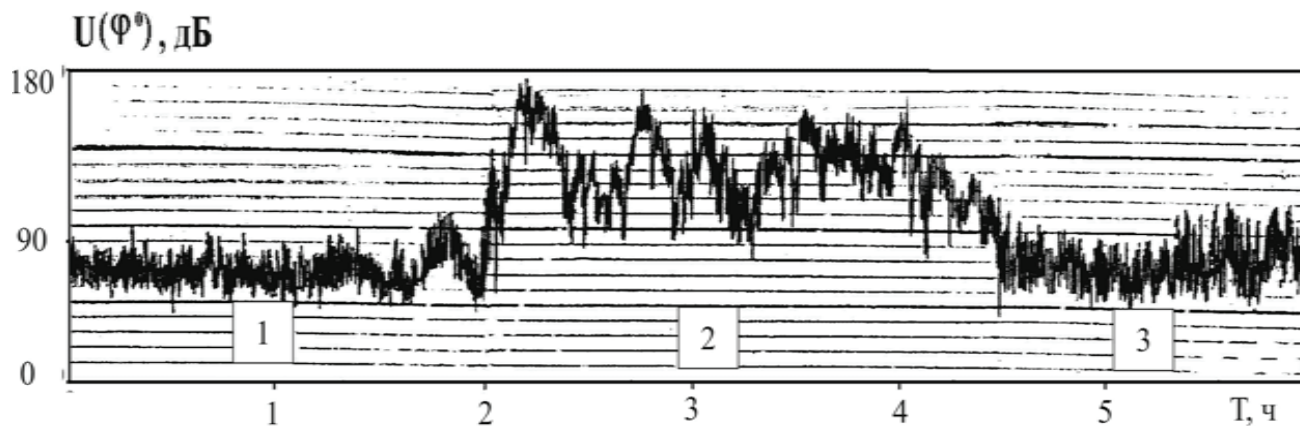


Рис. 1.15. Флуктуации фазы просветных сигналов при пересечении акустической линии косяком рыб (протяженность линии – 140 км, частота – 400 Гц)



Рис. 1.16. Дисперсия флуктуаций фазы просветных сигналов при пересечении акустической линии косяком рыб

Структурная схема излучающего и приемного трактов системы приведена на рис. 1.17. Измерительная система состоит из излучающего и приёмного трактов. Излучающий тракт включает: формирователь сигналов (звукового диапазона частот) 1; усилитель мощности излучаемых сигналов 2; трансформаторный блок согласования выхода усилителя с кабелем 3 и далее с подводным излучателем (преобразователем) 4. Приёмный тракт измерительной системы содержит: приёмный блок (гидрофоны с предварительными усилителями) 5, соединённый посредством многожильного кабеля с основным (бортовым) многоканальным усилителем 6, содержащим также полосовые фильтры 7; блок управления (переключения режимов) 8; блок выделения огибающей 9; блок измерения фазы 10 и дисперсии 11, а также регистраторы соответствующих величин 12–14.

Уточнение места обнаруженного скопления МБО производится путем перемещения приемной и излучающей систем (созданием веера пересекающихся просветных линий). Идентификация биологических особей в скоплении (косяке) осуществляется облучением среды сложными просветными сигналами, обеспечивающими их резонансное рассеяние.

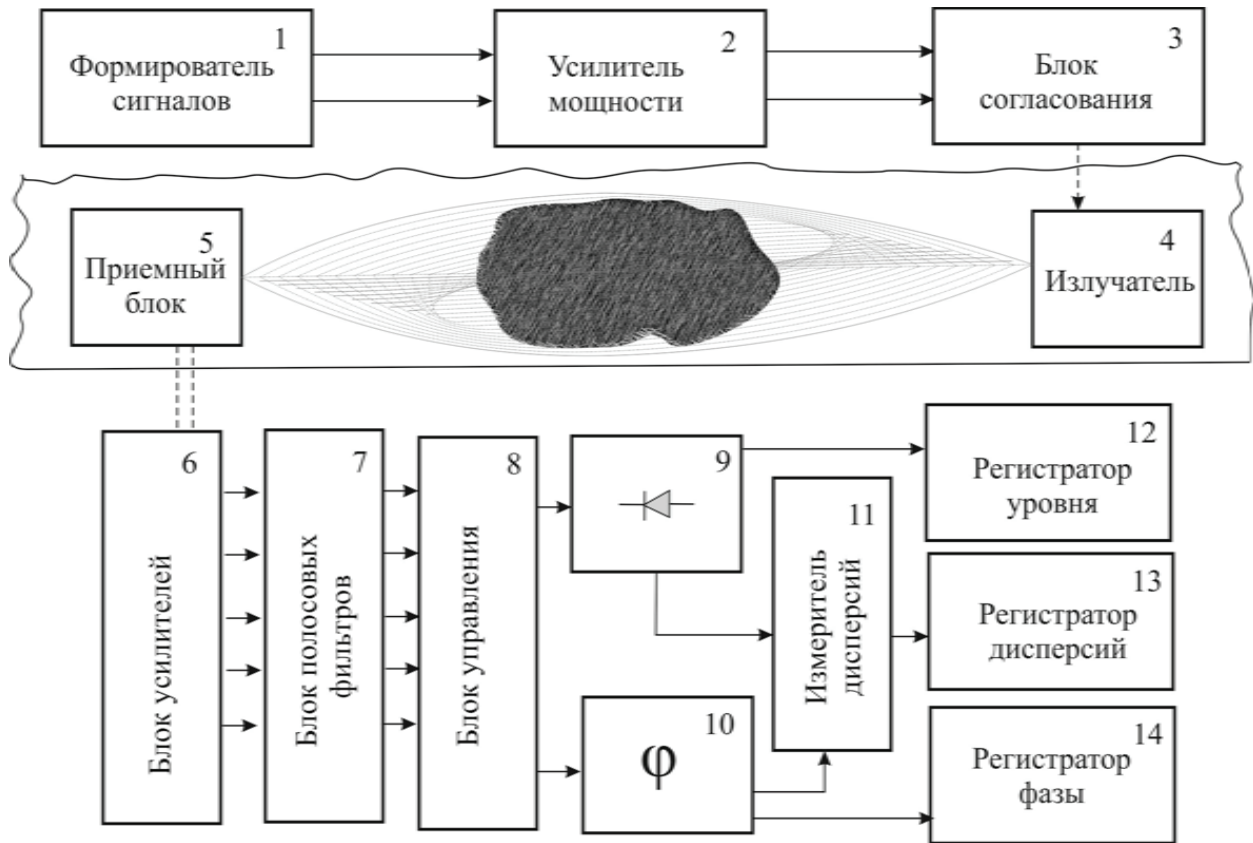


Рис. 1.17. Схема приемоизлучающих трактов поисковой гидроакустической системы

Особый практический интерес представляет реализация поисковой просветной системы для проведения промысла пузырьковых рыб, у которых могут быть эффективно использованы резонансные свойства их газовых пузырей. Просветная система в этом случае строится с учетом этих закономерностей, а именно: контролируемую среду и расположенный в ней рыбный косяк облучают двумя акустическими сигналами близкой частоты. При этом один из сигналов (как правило, с частотой 400 Гц) поддерживается строго стабильно, а другой излучается по закону ЛЧМ-модуляции. Ширина изменения частоты ЛЧМ сигнала подбирается исходя из резонанса добываемых особей рыб. На практике, ввиду того, что резонанс пузырей является достаточно высоким (единицы килогерц), средняя частота модуляции соответствует резонансному значению частоты пузырей или их верхним гармоникам. Промодулированный суммарно принятый сигнал в этом случае подвергается спектральной обработке. В полученных спектрограммах определяются значения резонансных частот пузырьковых рыб и их изменения, определяющие поведение и характер косяка.

Так как рыбные косяки в течение суток мигрируют по глубине, поднимаясь к поверхности днем и опускаясь на глубину в ночное время, то резонансная частота их пузырей изменяется в соответствии с давлением среды по известной формуле [27, 44, 72]:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_{сф}} \sqrt{\frac{3\gamma P + 4\mu}{\rho}};$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4,$$

где  $P$  – давление на горизонте рыб;  $\rho$  – плотность воды;  $\gamma$  – отношение удельных теплоемкостей газа в пузырьре и ткани рыб;  $\mu$  – модуль сдвига для окружающих пузырьре тканей;  $R_{сф}$  – радиус сферы, равной по объему полости пузырьре.

Резонансную частоту рыб можно определить, используя другую аналитическую зависимость:

$$F_p = \frac{0,885\sqrt{0,42 + H_p / 100}}{L},$$

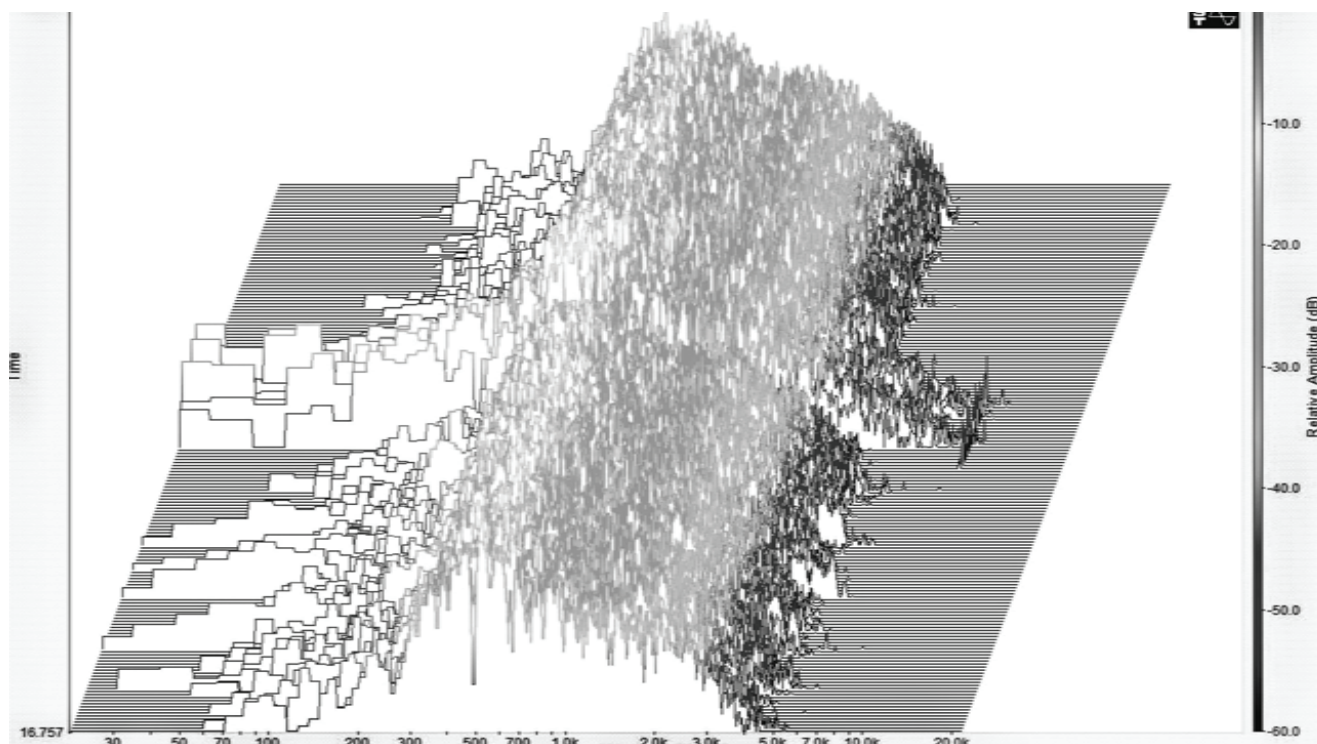
где  $F_p$  – резонансная частота, кГц;  $H_p$  – глубина косяка - м;  $L$  – длина рыбы.

При озвучивании акватории вертикальной акустической системой контроля время прохождения косяка между излучающим и приемным блоками можно определить, используя следующую приближенную аналитическую зависимость:

$$t = (2(H_B - H_p)\text{tg}\alpha) / V_p,$$

где  $H_B$  – глубина водоема, м;  $H_p$  – глубина косяка, м;  $\alpha$  – половина угла раствора диаграммы направленности;  $V_p$  – скорость рыб соответствующего размера, м/с.

На рис. 1.18 приведена спектрограмма шумов крабовых скоплений. Измерения проведены на шельфе п-ова Камчатка по закономерностям резонансного рассеяния просветных сигналов.



*Рис. 1.18.* Спектрограмма шумов крабовых скоплений (параметрические измерения просветной системой проведенные с использованием зондирования морского дна, обработка сигналов – с использованием цифрового фильтра)

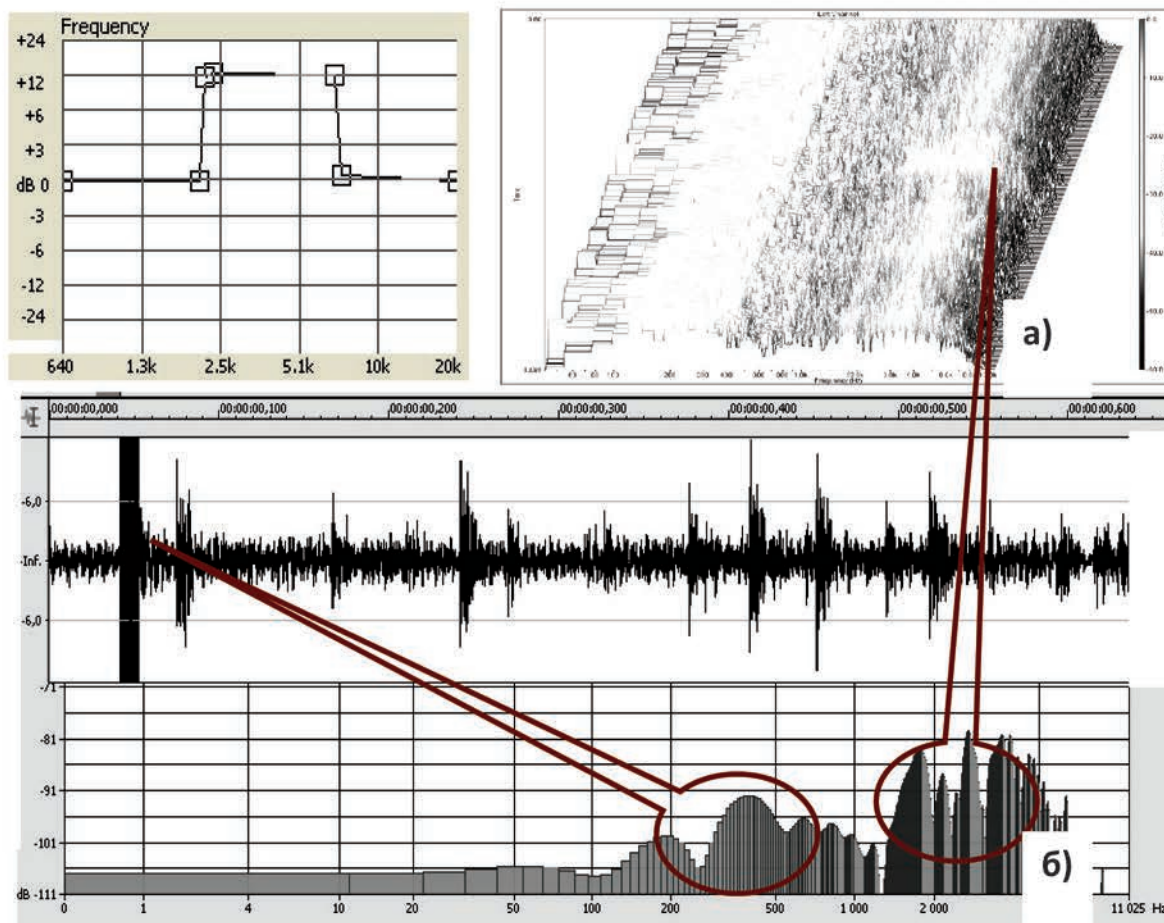


Рис. 1.19. Спектрограмма (а) и спектр (б) шумов крабовых скоплений (измерения проведены просветным методом зондирования морского дна с использованием цифровой фильтрации в трактах обработки сигналов)

На рис. 1.19 представлена спектрограмма шумов крабовых скоплений. Измерение шумов как донных источников выполнялось просветной параметрической системой с использованием дополнительного акустического зондирования дна высокочастотными сигналами накачки.

### 1.9. Просветная параметрическая система комплексного мониторинга гидрофизических морских полей с применением фазового метода приема и обработки сигналов

Рассмотрим принцип формирования просветной гидроакустической системы комплексного мониторинга гидрофизических полей морской среды, формируемых естественными и искусственными источниками, движущимися объектами и гидродинамическими возмущениями. Структурная схема просветной системы, как показано на рис. 1.20, включает: тракт формирования и усиления акустических сигналов 1, снабженный подводным излучателем 2 (для протяженных трасс, например подводным звуковым маяком марки ПЗМ-400), источник излучения информационных волн 3, приемную антенну с пространственно разнесенными в горизонтальной плоскости ненаправленными приемниками 5, 6. Приемники 5 и 6 могут быть связаны по радио с трактом приема, об-



работки и регистрации сигналов 4. При установке на судне или использовании на стационарных объектах приемных блоков 5, 6 и тракта приема просветных сигналов 4 они будут составлять единый аппаратный комплекс общей системы мониторинга и контроля акватории.

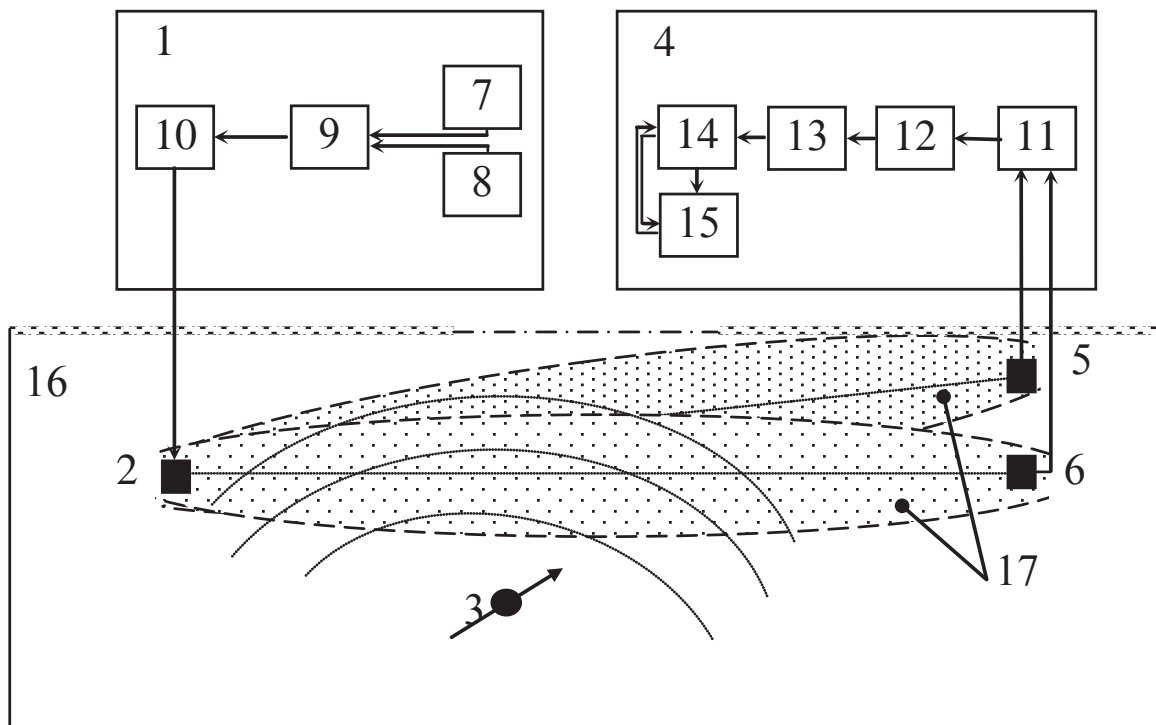


Рис. 1.20. Структурная схема просветной системы мониторинга полей морских акваторий фазовым методом приема, обработки и выделения их информационных признаков

В качестве источников информационных сигналов 3 использовались акустические, электромагнитные и гидродинамические излучения морских судов, а также другие известные источники формирования волн различной физической природы. Конструктивно тракт формирования и усиления акустических сигналов накачки 1 представляет электронную схему, содержащую генератор сигналов стабилизированной частоты 7 или иных сложных сигналов 8, усилитель мощности 9 и блок согласования его выхода с кабелем 10 и далее с излучателем 2.

Конструктивно тракт приема, обработки и регистрации сигналов 4 представляет собой электронную схему, содержащую широкополосный двухканальный усилитель 11 (с полосой от долей герца до суммарной частоты волн накачки и информационных), вход которого связан с приемниками 5 и 6, преобразователь временного масштаба волн 12, блок измерения сигналов разности фаз 13, блок узкополосного спектрального анализа 14 и функционально связанный с ним рекордер 15. Кроме того, на схеме 1.20 показана контролируемая морская среда 16 и области нелинейного взаимодействия волн накачки и измерительных сигналов (рабочие зоны) 17.

Задача рассматриваемой системы мониторинга выражается в дальнейшем параметрическом приеме информационных волн «малых амплитуд» в условиях интенсивных помех среды. Это достигается за счет нелинейного взаимодействия и параметрического пре-

образования волн в объеме протяженной рабочей зоны контролируемой среды, что обеспечивает увеличение масштаба дальности параметрического приема информационных волн до сотен километров, а также расширение нижней границы их частотного диапазона до единиц-долей герца. Подавление некоррелированных помех среды обеспечивается сохранением фазовых характеристик регулярных просветных сигналов. Метод подавления помех относительно известных аппаратурных является эффективным и реализуемым за счет выполнения следующей последовательности операций.

Излучающую и приемную антенны измерительной системы размещают на противоположных границах контролируемого участка морской среды. Формируют между ними зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования упругих волн подсветки с измеряемыми информационными волнами посредством излучения в нее низкочастотных просветных волн. Волны подсветки среды, взаимодействовавшие с информационными волнами, принимаются несколькими пространственно разнесенными в горизонтальной плоскости ненаправленными приемниками, усиливаются в полосе от единиц герца до суммарной частоты волн подсветки и информационных волн, а их масштаб переносится в высокочастотную область.

Далее измеряют сигналы разности фаз пространственно разнесенных приемников, проводят их узкополосный спектральный анализ и выделяют в спектрах параметрические составляющие суммарной или разностной частоты, по которым с учетом параметрического и частотно-временного преобразования волн накачки восстанавливают исходные характеристики измеряемых информационных волн.

На рис. 1.21 представлена спектрограмма просветных акустических сигналов на частоте 400 Гц, модулированных гидродинамическими возмущениями и резонансными колебаниями корпуса морского судна. Протяженность трассы составляла 30 км.

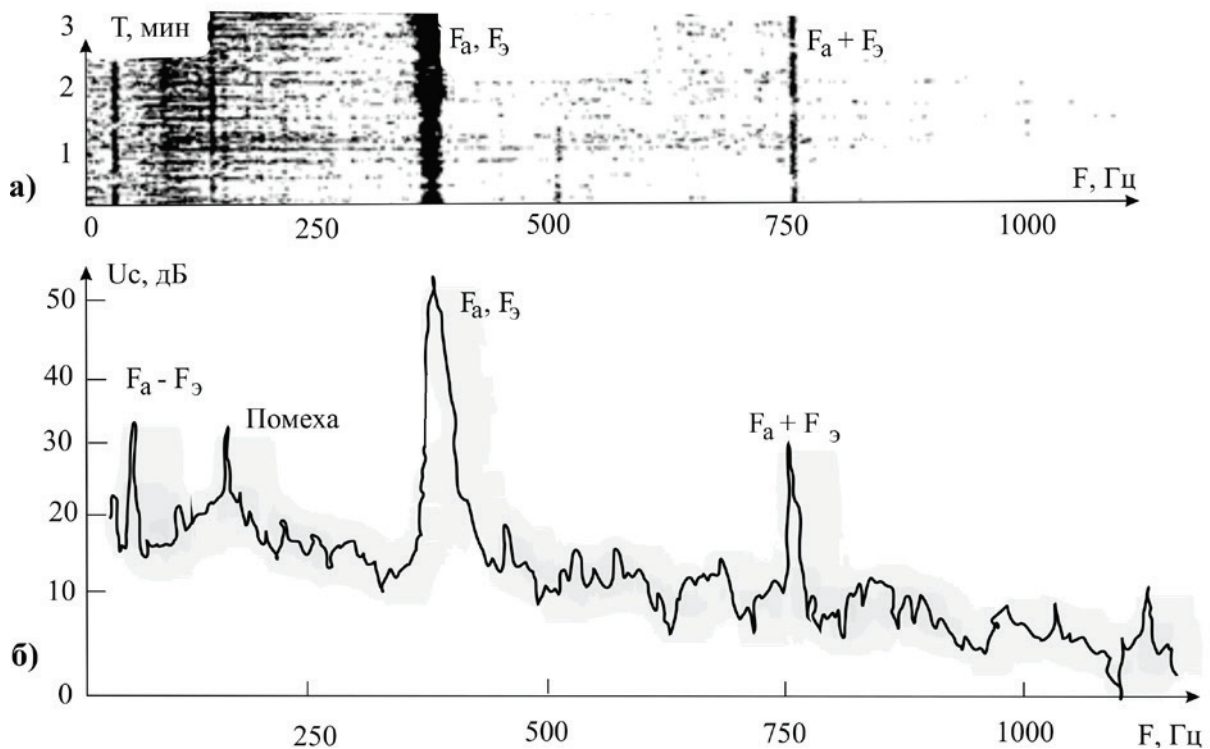


Рис. 1.21. Спектрограмма (а) и спектр (б) просветных акустических сигналов на частоте 400 Гц, модулированных гидродинамическими возмущениями и резонансными колебаниями корпуса морского судна

В случае пересечения траекторий сигналов нелинейными областями объектов происходит усиление параметрического взаимодействия сигналов и формирование в них составляющих суммарной и разностной частоты, которые накладываются на исходные волны. Нелинейно преобразованные сигналы позволяют определить местоположение объектов (дистанцию и глубину). Усиление параметрического преобразования просветных сигналов характерными составляющими полей шумоизлучения объектов используется как обобщенный признак объекта. В случае обнаружения биологических объектов (косяков рыб) могут быть эффективно использованы резонансные рассеивающие свойства их воздушных пузырей, что определяется по модуляционным характеристикам просветных сигналов. На рис. 1.22 представлена схема определения места гидродинамических неоднородностей среды в океаническом канале распространения волн.

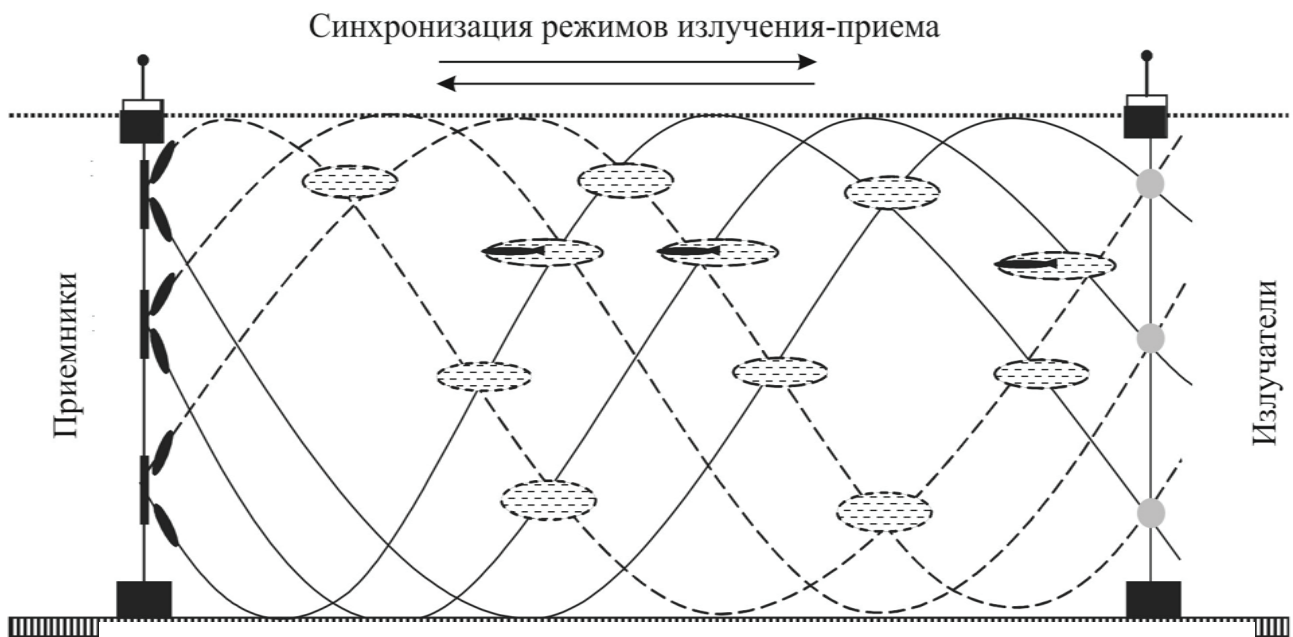


Рис. 1.22. Схема определения места гидродинамических неоднородностей среды в океаническом канале распространения волн

Таким образом, система мониторинга и контроля акваторий представляет собой широкомасштабный гидроакустический комплекс мониторинга гидрофизических полей различной физической природы в низкочастотном, инфразвуковом и дробном диапазонах в условиях интенсивных инфразвуковых помех протяженных морских акваторий. Протяженность системы обеспечивается подсветкой среды слабозатухающими низкочастотными акустическими сигналами в диапазоне десятки-сотни герц.

Повышенный эффект нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн достигается за счет использования соизмеримой с протяженностью среды пространственной рабочей зоны нелинейного взаимодействия волн, что обеспечивает также решение известной проблемы дальнего параметрического приема информационных сигналов как «волн малых амплитуд». Повышенная помехоустойчивость низкочастотного параметрического способа дальнего измерения информационных волн достигается за счет применения в системе мониторинга пространственно разнесенного приема волн подсветки и преобразования их временного масштаба в высокочастотную область с последующим спектральным анализом.

Очевидно, что и другие инфразвуковые акустические, электромагнитные и гидродинамические волны различной физической природы, сформированные другими морскими источниками или стихийными явлениями, например землетрясениями или цунами, будут надежно зарегистрированы.

Измерительная система мониторинга полей морских акваторий была сформирована и реализована в различных вариантах с использованием стационарных, автономных средств морского приборостроения, а также на основе специальных и штатных корабельных приемопередаточных станций.

### **1.10. Совместная реализация низкочастотных методов просветной и бистатической гидролокации в системах мониторинга протяженных морских акваторий**

Исследования и научно-технические разработки низкочастотной гидролокации методом разнесенного излучения-приема зондирующих сигналов были обусловлены проблемой дальнего обнаружения акустически слабозаметных морских объектов.

Решение задачи дальней гидролокации объектов, в свою очередь, связано со снижением частоты и увеличением мощности зондирующих сигналов, неизбежным следствием которых является формирование в среде интенсивной реверберационной помехи. Режим разнесенного излучения-приема сигналов в системах бистатической и просветной гидролокации позволяет нейтрализовать отрицательное воздействие реверберационных помех на их приемные тракты.

По своей физической сущности бистатическая и просветная гидролокации аналогичны, но просветная является предельным вариантом разнесенного излучения-приема зондирующих сигналов (рис. 1.23). При этом имеет место их существенное отличие, которое заключается в следующем. Если при бистатической локации определяющую роль в формировании полезного (эхо) сигнала играет отражающая способность (сила цели) объектов, то в случае просветной гидролокации – рассеянная в прямом направлении (теневая) волна, которая при равных условиях (равенство волновых параметров), согласно теоретическому обоснованию закономерностей рассеяния звуковых волн [1, 2, 81], превышает отраженную составляющую рассеянных волн. То есть в общем поле рассеянных на объекте звуковых волн при равных волновых параметрах теневая волна превышает отраженную от объекта.

При обнаружении объектов, имеющих рассеяние на гидродинамических возмущениях среды, теневая составляющая рассеянного поля значительно возрастает.

Необходимо отметить, что прямая просветная волна будет распространяться на большие расстояния; она характеризуется также дополнительным расхождением после отражения на не ровной поверхности объектов.

Основным фактором, определяющим использование преимущества просветной гидролокации, является возможность реализации закономерностей параметрического излучения и приема низкочастотных просветных волн.

В данном случае признаками обнаружения объектов являются характерные классификационные составляющие их полей различной физической природы – акустических, электромагнитных и гидродинамических. Такие поля присущи морским объектам и естественным неоднородностям среды. Также наблюдается эффект наложения на просветный сигнал интерференционной картины полей шумоизлучения.

При отсутствии поля просветных сигналов интерференционная картина может проявляться, как правило, в условиях мелкого моря и на малых дистанциях (в пределах 10–15 км).

При наличии подсветки среды интерференционное поле накладывается на просветное и может наблюдаться на больших (до 20–30 км) удалениях от шумящего объекта.

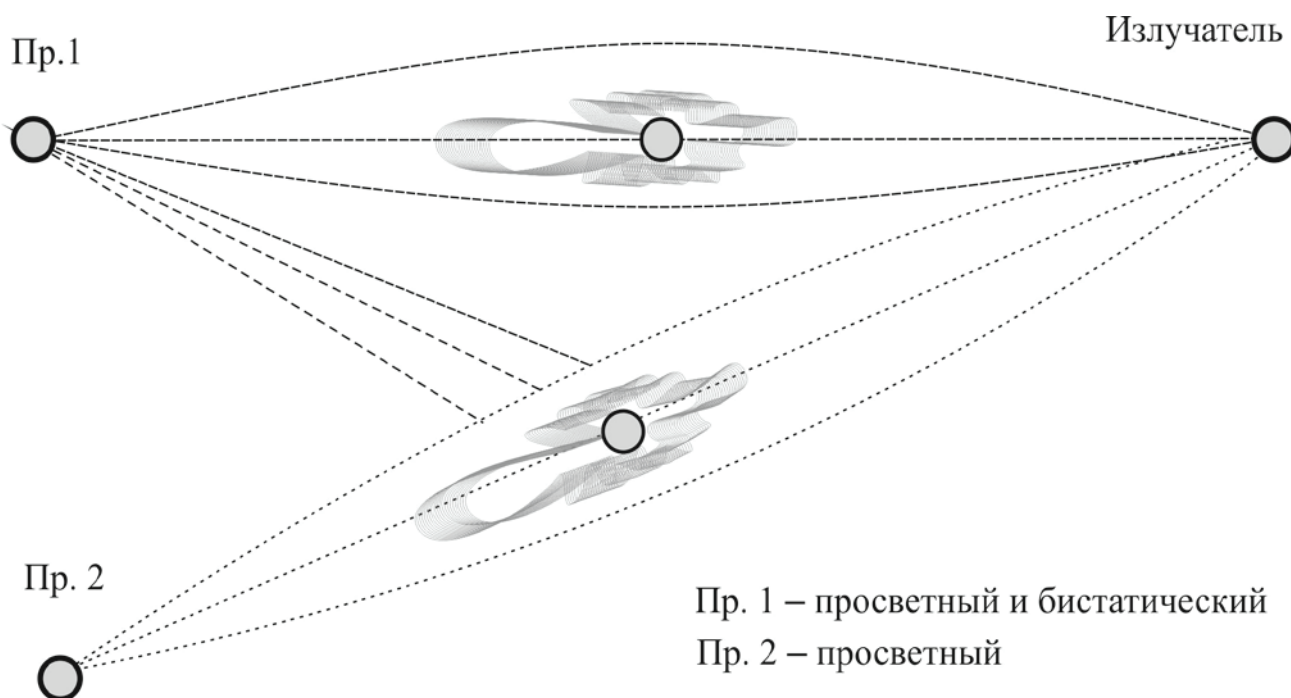


Рис. 1.23. Схема совместной реализации низкочастотных методов просветной и бистатической гидролокации

В случае реализации импульсной бистатической гидролокации могут быть эффективно использованы современные методы цифровой обработки, в частности метод Вейвлет-анализа. Этот метод сопряжен с известными потерями измеряемой информации, но в допустимых пределах погрешности он является достаточно эффективным инструментом спектральной обработки импульсных сигналов в реальном масштабе времени.

В бистатической гидролокации выделение модуляционных и параметрических составляющих в длительных импульсных сигналах возможно, но относительно непрерывных просветных сигналов оно менее эффективно, так как ограничено по времени взаимодействия волн при распространении и по выделению полезных волн при обработке. Пример спектральной обработки взрывного сигнала приведен на рис. 1.24. Объемное представление спектра отраженной компоненты рассеянного объектом взрывного сигнала выполнено с использованием метода Вейвлет-анализа.

Морскими исследованиями, выполненными на стационарных трассах протяженностью около 50 км, была подтверждена эффективность совместной реализации просветной и бистатической гидролокации, обеспечивающей измерение характеристик акустических полей объектов и гидродинамических неоднородностей среды в широком диапазоне частот.

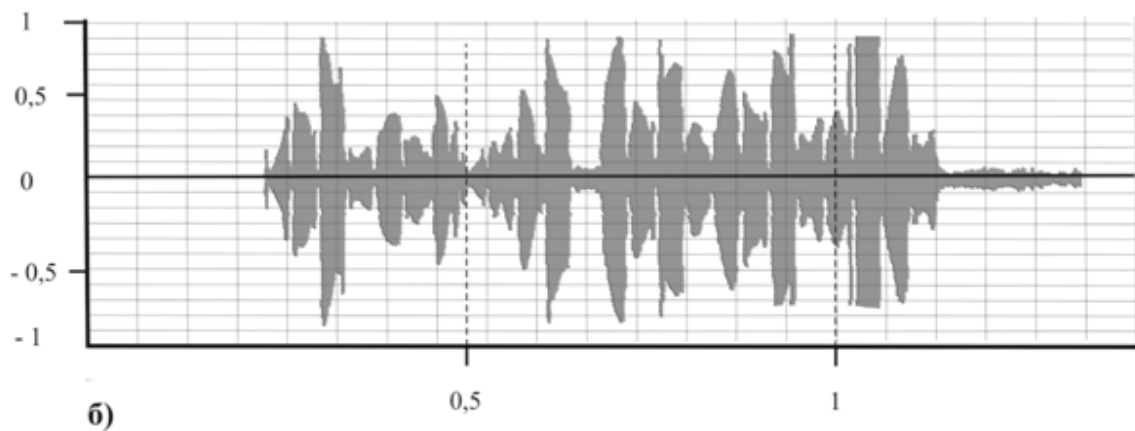
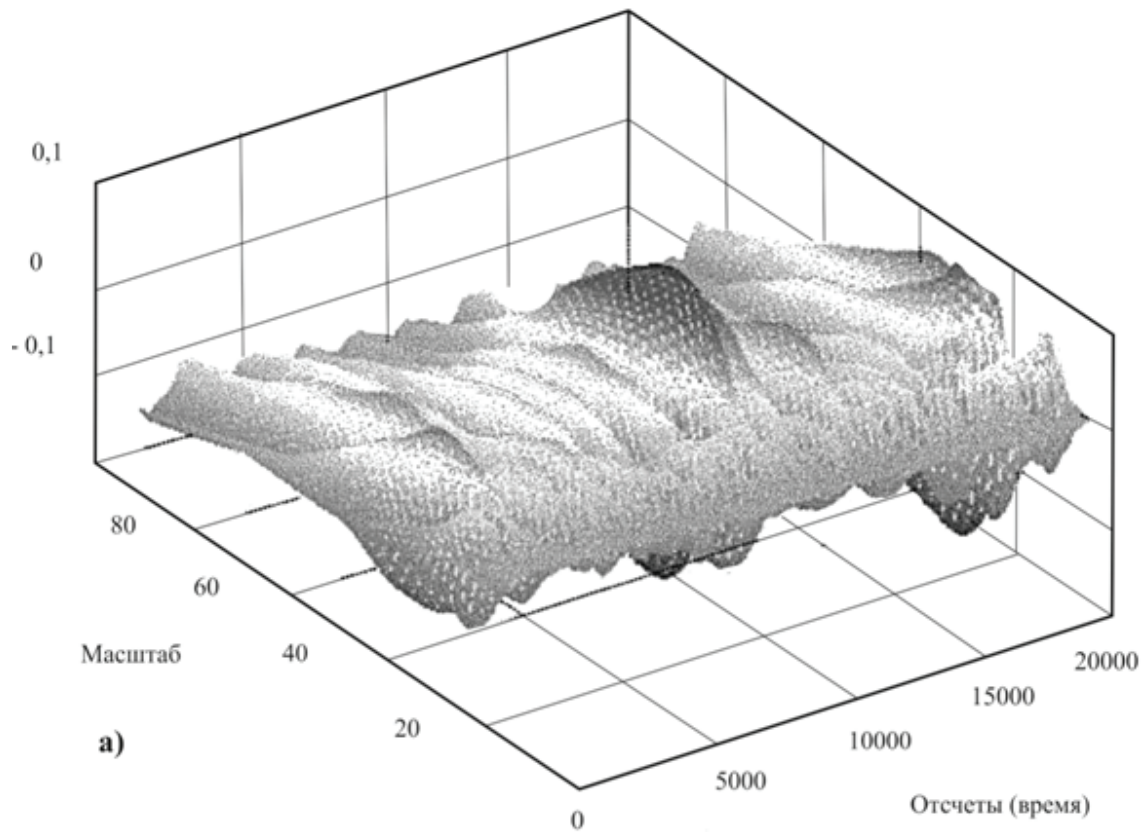


Рис. 1.24. Спектрограмма (а) и временная структура рассеянного объектом взрывного сигнала (б) на просветной трассе протяженностью 50 км

*В первой главе:*

– обоснованы научно-технические решения просветной гидроакустики по закономерностям: дифракции и интерференции просветных волн, рассеянных объектами, а также их амплитудно-фазовой модуляции и параметрического взаимодействия с измеряемыми волнами в морской среде;

– показана эффективность просветного метода в решении задач дальнего параметрического приема гидрофизических полей среды и объектов различной физической природы;

– приведены результаты экспериментальных исследований в модельных и в натуральных условиях, подтверждающие возможность практического использования этих закономерностей в просветных гидроакустических системах дальнего помехоустойчивого приема и измерения характеристик полей объектов и среды различной физической природы (акустических, электромагнитных и гидродинамических) с использованием фазовой обработки принимаемых просветных сигналов;

– рассмотрены общие и отличительные характеристики низкочастотных методов просветной и бистатической гидролокации;

– обоснована возможность их совместной реализации при организации контроля протяженных морских акваторий;

Просветный метод гидролокации и система мониторинга гидрофизических полей могут найти широкое применение в геологических исследованиях структуры морского дна, проведении морских спасательных работ, обследовании глубоководных гидротехнических сооружений, а также проведении океанологических работ.

Результаты исследований, технических разработок и их натуральных испытаний по мониторингу гидрофизических полей среды, а также технических и биологических объектов свидетельствуют и эффективности технологий нелинейной просветной гидроакустики, а так же возможности их практической реализации в создании широкомасштабной системы мониторинга полей естественных, технических и биологических объектов [1-3,7].

## 2. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ РЕВЕРБЕРАЦИОННАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ГИДРОЛОКАЦИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ

### 2.1. Параметрическая приемная антенна классического типа

В 1963 году Вестервелт опубликовал работу, в которой впервые была обоснована возможность использования нелинейности среды с целью приема звука. Первые комплексные экспериментальные работы с параметрическими приемными антеннами классического типа (КППА) были выполнены Берктеем, Эль-Темими. Авторами было установлено, что характеристика направленности (ХН) классической параметрической приемной антенны соответствует характеристике направленности антенны бегущей волны, протяженность которой равна расстоянию между излучателем накачки и приемным элементом антенны.

Сотрудниками Техасского университета (США) к середине 70-х годов была разработана теория классической параметрической приемной антенны, хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами, несмотря на технические трудности, вызванные необходимостью оперировать с параметрами низкочастотных (НЧ) сигналов второго порядка малости. Анализ полученных результатов позволил организовать ряд научно-исследовательских работ, направленных на создание параметрических антенн, способных найти применение в гидроакустической технике различного назначения [138, 139]. В этих работах предусматривалось также создание специальных процессоров для обработки сигналов, изготовление антенн для исследований направленных свойств и помехоустойчивости классической параметрической приемной антенны в пресноводных водоемах и в морских условиях.

Созданный для обеспечения работ в данной области процессор «PARRAY» позволил обеспечить подавление несущей частоты до 120 дБ в полосе частот до 35 Гц, усиление комбинационных составляющих, их преобразование и разделение, что позволило фиксировать уровни боковых компонент, порядка 180 дБ, от уровня несущей частоты. Названные параметры схемы обработки были достигнуты за счет специально изготовленных режекторных кристаллических фильтров. Полученный в ходе данных работ технический уровень построения классической параметрической приемной антенны позволил снизить собственные шумы антенны до уровня  $10^{-3}$  Па/Гц<sup>0,5</sup> в диапазоне частот 35...800 Гц и использовать стационарную гидроакустическую систему с КППА в Мексиканском заливе.

После 1982 года информации о состоянии работ по Программе «PARRAY» не поступало. Работы с параметрической приемной антенной классического типа свернуты не были, о чем свидетельствует появление с 1985 года ряда публикаций по смежным вопросам. В частности, обсуждалась проблема измерения низкочастотных (до 1500 Гц) шумов кораблей при установке высокочастотного излучателя накачки на объекте измерений, а приемного элемента – на берегу.

Функциональная схема классической параметрической приемной антенны, в простейшем виде, представлена на рис. 2.1. Приходящий полезный сигнал низкой частоты  $\omega_2$  взаимодействует с высокочастотной (ВЧ) волной накачки  $\omega_1$  большой интенсивности, при этом частота высокочастотной накачки гораздо выше частоты низкочастотного полезного сигнала. Приемник настроен на одну или обе боковые полосы, содержащие высокочастотную комбинационную частоту (частоты). Для того чтобы принять низко-



частотный полезный сигнал  $\omega_2$  на частоте 30 Гц с длиной волны  $\lambda_2$ , приблизительно равной 50 м, требуется классическая параметрическая приемная антенна  $L$  протяженностью около 500 м. Очевидно, что поместить такую антенну на подвижном носителе невозможно. Как видно, классическая параметрическая приемная антенна отличается от приемной линейной антенны во многих отношениях, но основное отличие заключается в том, что для параметрического приема низкочастотных гидроакустических сигналов требуется всего два небольших высокочастотных электроакустических преобразователя, в то время как линейная антенна обычно состоит из большого числа преобразователей, расположенных вдоль ее оси.

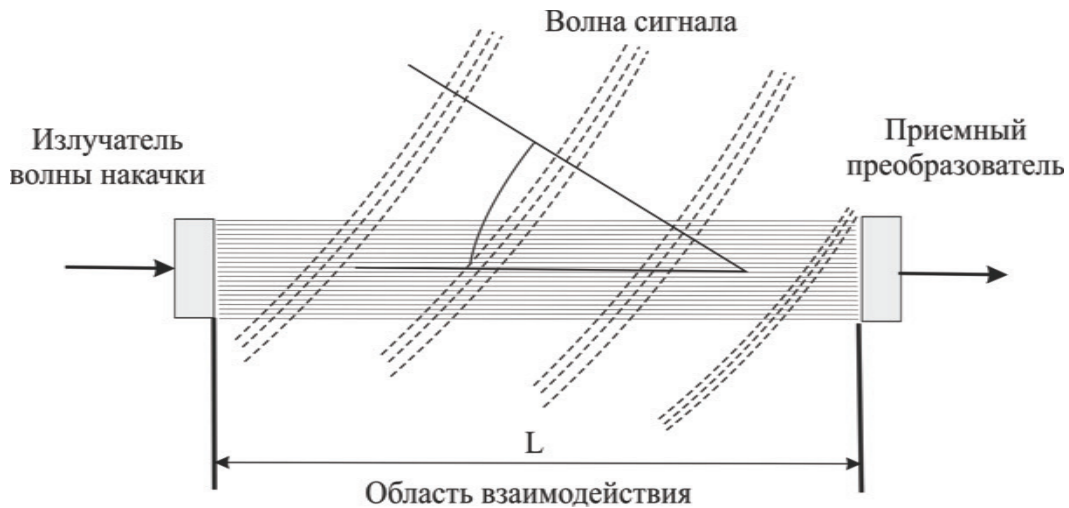


Рис. 2.1. Одноэлементная приемная параметрическая антенна

На рис. 2.2 иллюстрируется распространение гармонических составляющих высокочастотной волны накачки (высокочастотные волны конечной амплитуды). Поршневой излучатель диаметром 76 мм излучал на основной частоте 450 кГц акустическую волну с амплитудой звукового давления 127 дБ относительно 0,1 Па на расстоянии 1 м. При этом измерялись амплитуды основной волны ( $n = 1$ ), а также ее второй ( $n = 2$ ) и третьей ( $n = 3$ ) гармоник в зависимости от расстояния. Как видно из рис. 2.2, амплитуды гармоник достаточно велики, хотя при заданном уровне звукового давления и частоте пилообразная волна не была еще сформирована.

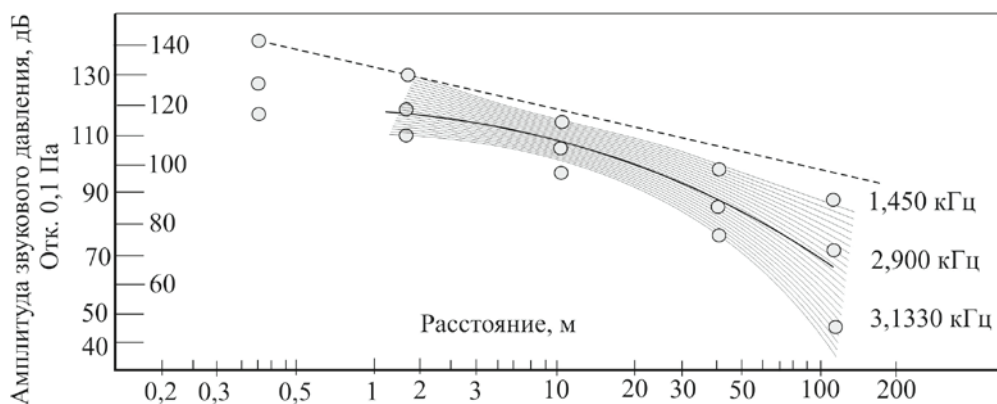


Рис. 2.2. Зависимости амплитуд параметрических составляющих сферической волны конечной амплитуды от расстояния:  
 ----- теория; ————— эксперимент

Напомним, что в пилообразной волне амплитуды гармонических составляющих относятся к амплитуде основной волны как  $1/n$ , где  $n$  – порядок гармоники. Если пилообразный профиль еще не сформирован, то, как видно из графиков, представленных на рис. 2.2, поглощение уменьшает амплитуды гармонических составляющих. При этом ширина диаграммы направленности классической параметрической приемной антенны и уровень боковых лепестков уменьшаются с увеличением порядка гармоник. Все эти эффекты способствуют увеличению разрешающей способности классической параметрической приемной антенны, поэтому потенциальные возможности использования гармонических составляющих в нелинейной акустике очень велики.

Первой предложенной моделью, описывающей функционирование классической параметрической приемной антенны, была модель Вестервелта, основанная на эффекте модуляции звука звуком, проявляющемся в возникновении фазовой модуляции высокочастотной волны накачки под воздействием низкочастотного полезного сигнала. Физически фазовая модуляция обусловлена изменением скорости распространения точек профиля синусоидальной высокочастотной волны накачки, что определяется двумя факторами: величиной избыточного давления и скоростью смещения частиц среды.

Первый фактор обусловлен нелинейностью уравнения состояния среды, а второй – нелинейностью уравнения гидродинамики. Действие этих факторов приводит не только к самовоздействию волн (образование высших гармоник сигнала накачки), но и к образованию высокочастотных волн комбинационных частот. Максимальное значение индекса фазовой модуляции  $\Delta\varphi$  и амплитуды волн комбинационных частот  $P_{\pm}$  при распространении волн накачки и сигнала в коллинеарном направлении имеют вид

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon P_c \omega_n L}{\rho_0 c_0^3};$$

$$P_{\pm} = \frac{\varepsilon P_n P_c \omega_n L}{2\rho_0 c_0^3},$$

где  $P_c$ ,  $P_n$  – амплитуды звукового давления волн НЧ сигнала и ВЧ накачки;  $\omega_n$  – частота ВЧ накачки;  $\varepsilon$  – параметр нелинейности воды;  $L$  – протяженность области взаимодействия акустических волн;  $\rho_0$ ,  $c_0$  – плотность и скорость звука в невозмущенной среде.

В дальнейшем метод расчета эффекта модуляции звука звуком зарубежными специалистами был обобщен на случай, когда плоская волна низкочастотного сигнала взаимодействует с реальной (не ограниченной по длине) высокочастотной волной накачки. При этом выражение для амплитуды волн комбинационных частот принимает вид

$$P_{\pm} = \frac{\pi \varepsilon v_0 P_c f_n L}{R c_0^3} I(\theta),$$

где  $v_0$  – амплитуда смещения поверхности поршня;  $R$  – расстояние от излучателя до приемника;  $I(\theta)$  – дифракционный интеграл, описывающий пространственное распределение акустического поля комбинационных частот.

Вторая модель функционирования классической параметрической приемной антенны, разработанная Берктеем, основана на перекачке энергии волны накачки в энергию

волн комбинационных частот, а информация о низкочастотном сигнале содержится в их спектральных составляющих. При этом ширина главного максимума характеристики направленности может быть определена как [138, 139]

$$\theta_{-3\text{дБ}} = 2\sqrt{\frac{\lambda_c}{L}}, \quad (2.1)$$

где  $\lambda_c$  – длина волны низкочастотного сигнала;  $L$  – протяженность области взаимодействия акустических волн (база КППА).

На рис. 2.3, а в качестве примера иллюстрируется диаграмма направленности классической параметрической приемной антенны, зарегистрированная при вращении излучателя высокочастотной волны накачки частотой 460 кГц, излучаемой электроакустическим преобразователем диаметром 25 мм. При этом в качестве источника полезного низкочастотного сигнала использовался низкочастотный электроакустический преобразователь частотой 5 кГц, находящийся в дальней зоне высокочастотного излучателя накачки. Возникающий в результате нелинейного взаимодействия сигнал разностной частоты 455 кГц принимался гидрофоном с диаметром 12,5 мм, находящемся на удалении 5,8 м от излучателя высокочастотной волны накачки на оси последнего.

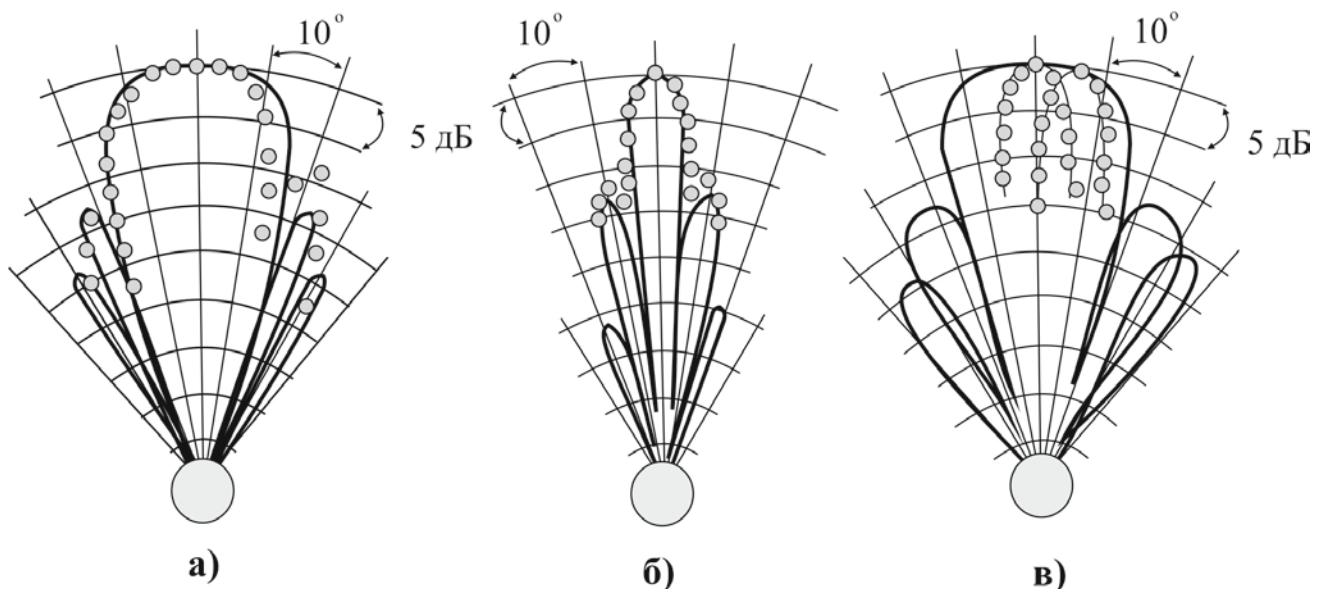


Рис. 2.3. Диаграммы направленности приемных параметрических антенн:

а – одноэлементная антенна; б – четырехэлементная антенна;

в – четырехэлементная антенна в режиме сканирования — (теория); ○ ○ ○ (эксперимент)

Как видно из рис. 2.3, а, измеренная диаграмма направленности оказалась несколько уже, чем вычисленная согласно уравнению (2.1), но расчетные значения амплитуды звукового давления на оси данной акустической системы хорошо согласуются с экспериментальными данными. Совершенно очевидно, что, применяя одновременно несколько элементарных акустических систем, каждая из которых состоит из излучателя высокочастотной волны накачки и высокочастотного приемника, можно получить параметрическую приемную антенную решетку.

На рис. 2.3, б приведены данные о направленности классической параметрической приемной антенны, которая состояла из 4 элементарных параметрических приемников. В соответствии с теорией обычных антенн увеличение числа элементов классической параметрической приемной антенны до 4 привело к заметному уменьшению ширины диаграммы направленности. При этом классическая параметрическая приемная антенна такого типа может работать в режиме сканирования. Для этого достаточно электрическим способом последовательно увеличивать фазовую задержку выходного сигнала каждого элемента.

На рис. 2.3, в приведен пример отклонения главного лепестка диаграммы направленности; угол между двумя положениями сканирующего лепестка диаграммы направленности составляет 60 град. Поскольку сектор сканирования ограничен шириной диаграммы направленности отдельного приемного элемента, то база каждой параметрической приемной антенны не должна быть слишком большой.

Для выяснения преимуществ классической параметрической приемной антенны сравним их с линейными аналогами.

Рассмотрим 4-элементную линейную антенну с такой же общей площадью электроакустических преобразователей, как у описанной выше 4-элементной классической параметрической приемной антенны. Диаграмма направленности линейной антенны, в отличие от классической параметрической приемной антенны, будет содержать интерференционные максимумы, уровень которых одинаков при отклонении от нормали как на 300, так и на 600. Сигналы и шум, приходящие на антенну с задней стороны или по направлениям, лежащим в вертикальной плоскости, не будут подавляться.

Теперь представим себе 4-элементную линейную антенну с такими же акустическими характеристиками, как у рассмотренной ранее параметрической приемной антенной решетки. Она должна будет состоять из 4 поршневых электроакустических преобразователей, наибольший размер которых равен 0,76 м, а площадь, занимаемая преобразователями, составит 1,8 м<sup>2</sup>, или почти в 720 раз больше, чем у классической параметрической приемной антенны. Не следует считать, что линейные размеры электроакустических преобразователей и их стоимость единственные факторы, которые нужно учитывать при сравнении линейных и параметрических приемных антенн. Не стоит забывать о том, что в морской геофизике на границе «вода – осадок» – наиболее нелинейной областью среды может происходить эффективное параметрическое взаимодействие волн.

На рис. 2.4 представлены диаграммы направленности рассчитанные с использованием выражения (2.1) и экспериментально замеренные для основной частоты высокочастотной волны накачки 450 Гц (рис. 2.4, а), а также ее второй (рис. 2.4, б) и третьей (рис. 2.4, в) гармоник. Как видно из рис. 2.4, б, ширина основного максимума диаграммы направленности классической параметрической приемной антенны при использовании второй гармоники высокочастотной волны накачки уменьшается приблизительно в 1,5 раза и составляет величину 2,9.

Переход от использования второй гармоники высокочастотной волны накачки к третьей приводит лишь к незначительному сужению (примерно в 1,12 раза) основного максимума диаграммы направленности классической параметрической приемной антенны.

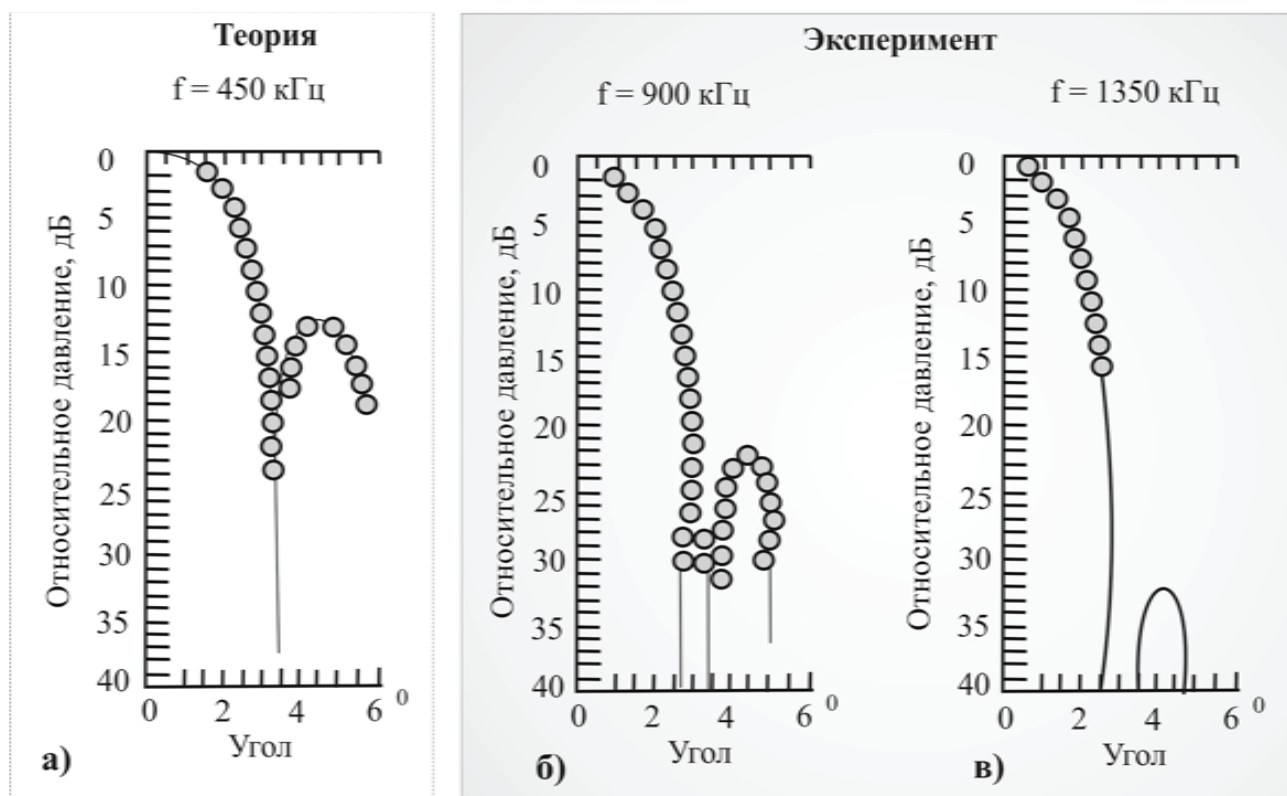


Рис. 2.4. Диаграмма направленности:

- а – на основной составляющей волны конечной амплитуды; б – на второй гармонике;
- в – на третьей гармонике, (уровень давления в точке излучения составлял – 127 дБ относительно 0,1Па<sub>1м</sub>, дистанция R = 102 м

Подводя итоги краткого рассмотрения физико-математических моделей классической параметрической приемной антенны можно отметить, что в выражение для амплитуды волн комбинационных частот входят в качестве сомножителей: параметр нелинейности воды и амплитуда давления в первичной волне. Остальные величины связаны или с размером высокочастотного излучателя накачки, или с расположением приемного элемента классической параметрической приемной антенны в той либо иной зоне излучателя. При этом основными недостатками классической параметрической приемной антенны, сдерживающими ее применение на практике, являются: низкая помехоустойчивость, недостаточная пороговая чувствительность, ограниченный снизу (35 Гц) диапазон частот регистрируемых сигналов, необходимость использования сложной аппаратуры обработки сигналов; невозможность размещения на корпусе подвижного носителя.

## 2.2. Параметрическая приемная антенна локационного типа

Попытка избавиться от некоторых недостатков, присущих классической параметрической приемной антенне, привела к предложениям использовать в качестве источника накачки какие-либо природные (пузырьки воздуха) объекты или искусственные (пластины, борт корабля) отражатели, облучаемые высокочастотной волной накачки с помощью источника, расположенного в непосредственной близости от приемного элемента антенны. Принцип действия параметрической приемной антенны «локационного» типа (ЛППА) основан на эффекте обратного нелинейного рассеяния звука.

Предложение об использовании локальной параметрической приемной антенны было впервые высказано Тернером – известным специалистом в области ультразвуковых методов исследования свойств различных сред, в работе [149], направленной на усовершенствование системы акустической визуализации. Впоследствии автор переработал данную техническую идею применительно к гидроакустической технике и предложил параметрический гидролокатор, который был предназначен для обнаружения морских целей по их первичному и вторичному акустическим полям. Тернером было получено выражение для соотношения между акустическим давлением в высокочастотной боковой полосе  $P_{\pm}$  и аналогичным параметром на низкой частоте полезного сигнала  $P_C$  в объеме взаимодействия акустических волн [149]:

$$\frac{P_{\pm}}{P_C} = \frac{\rho V_0 \omega_{\pm}^2}{4\pi R \eta_1 P_H} \exp(-\alpha_{\pm} R), \quad (2.2)$$

где  $V_0$  – элементарный объем;  $\omega_{\pm}$  – значения комбинационных частот;  $R$  – расстояние до точки наблюдения;  $\eta_1$  – поправка первого порядка к коэффициенту упругости среды;  $\alpha_{\pm}$  – коэффициент поглощения на комбинационной частоте.

Выражение (2.2) не имеет физического смысла. При  $P_C = \text{const}$   $P_H \rightarrow 0$ ,  $P_{\pm} \rightarrow \infty$ , т.е. при «выключении» несущей будем иметь бесконечное увеличение амплитуды боковых полос, чего просто не может быть. Кроме того, выражение ошибочно из-за несовпадения размерностей правой и левой части. Можно сделать вывод о том, что Тернером сформулирована общая идея построения локальной параметрической приемной антенны, основанная на известных принципах классического нелинейного взаимодействия звука со звуком.

После 1980 года предложений по применению локальной параметрической приемной антенны в США не встречалось. Более того, в научных кругах отнеслись к возможности использования локальной параметрической приемной антенны на практике скептически, если судить по материалам открытых публикаций. В середине 80-х годов вышел целый ряд работ, посвященных исследованиям эффекта обратного нелинейного рассеяния звука. В частности, сотрудниками Вашингтонской лаборатории ВМС США Пикетом и Ван-Буреном были выполнены исследования, основным результатом которых является вывод о том, что доплеровские составляющие в комбинационных частотах значительно меньше по уровню модуляционных составляющих.

При проведении экспериментальных исследований с классической параметрической приемной антенной, у которой в качестве приемного элемента использовалась линейная протяженная антенна, а источник высокочастотного сигнала накачки был ненаправленным, Роджерсом и Ван-Буреном было установлено, что характеристика направленности такой антенны определяется частотой сигнала накачки и волновыми размерами приемного элемента, то есть имеет место та же зависимость, что и у локальной параметрической приемной антенны.

Анализ последующих работ Роджерса и Ван-Бурена указывает на то, что в дальнейшем работами с классической параметрической приемной антенной они не занимались, а с начала 80-х годов включились в активные исследования по изучению эффектов комбинационного рассеяния на колеблющихся преградах различной конфигурации и жесткости, то есть проблемами, связанными с функционированием локальной параметрической приемной антенной.

Можно привести еще один пример такого же «неожиданного» изменения исследовательских интересов в сторону вопросов, связанных с реверберацией. Так, например, в 1985 году ведущий специалист Техасского университета в области нелинейной гидроакустики, один из создателей технологии «PARRAY», Голдсбери публикует статьи, в которых исследуются вопросы донного обратного рассеяния при малых углах скольжения.

Современное представление о природе параметрических явлений в локальной приемной антенне сводится к двум моделям взаимодействия акустических волн. Модель Цензора объясняет механизм образования волн комбинационных частот за счет граничных эффектов, возникающих при отражении высокочастотной накачки от колеблющихся с низкой частотой неоднородностей, расположенных в поле низкочастотной волны, и выражение для амплитуды волн комбинационных частот имеет вид

$$P_{\pm} = \frac{P_H P_C}{2\rho_0 c_0^3} (\omega_H \pm \Omega)x, \quad (2.3)$$

где  $P_H, P_C$  – амплитуда звукового давления накачки и сигнала;  $\omega_H, \Omega$  – частоты волн накачки и сигнала;  $\rho_0, c_0$  – плотность и скорость звука в однородной среде;  $x$  – протяженность области от рассеивателя до приемного элемента.

Проведенный анализ порядка величины амплитуды комбинационных составляющих для данной модели показал, что результат выражения (2.3) имеет тот же порядок, что и разность между координатами Эйлера и Лагранжа. Кроме того, данная модель не учитывает взаимодействие рассеянной высокочастотной накачки с волной низкочастотного сигнала при их коллинеарном распространении к приемному элементу и поэтому не может претендовать на адекватность.

Названные эффекты учитывает модель Пикьюта, основанная на решении нелинейного волнового уравнения второго порядка. Автором получено следующее выражение для амплитуды волн комбинационных частот:

$$P_{\pm} = \frac{\epsilon P_H P_C (\omega_H \pm \Omega)x}{4\rho_0 c_0^3}, \quad (2.4)$$

где  $P_H, P_C$  – амплитуды звукового давления волн ВЧ накачки и НЧ сигнала;  $\omega_H, \Omega$  – их соответствующие частоты;  $\epsilon$  – параметр нелинейности;  $\rho_0, c_0$  – плотность и скорость звука в однородной среде;  $X$  – расстояние от приемного элемента антенны до точки рассеивания (база ЛППА).

Анализ выражения (2.4) показывает, что амплитуда волн комбинационных частот возрастает по мере их распространения к локальной параметрической приемной антенне.

Из теории нелинейной гидроакустики известно, что при взаимодействии акустических волн высокочастотной накачки и низкочастотного сигнала амплитуда высокочастотных модуляционных компонент меньше уровня накачки на 140...170 дБ. В то же время известно, что для обнаружения высокочастотных боковых полос необходимо, чтобы уровень отраженной волны накачки составлял величину  $P_H = 10^4 \dots 10^6$  Па, что не реализуется на практике.

Краткий анализ свидетельствует о том, что существующие модели обратного нелинейного рассеяния звука, исходя из известных методов классической нелинейной аку-

стики, не могут быть применены для описания локальной параметрической приемной антенны.

Практика показывает, что подобные антенны работоспособны и, поэтому можно предположить – в основе их функционирования лежат неизвестные до сих пор физические механизмы.

### 2.3. Обработка гидроакустических сигналов в трактах ГАС с параметрическими приемными антеннами

Входная информация в трактах с параметрической приемной антенной (ППА) обрабатывается поэтапно. На первом этапе осуществляется пространственная обработка сигнала, имеющая целью увеличение отношения сигнал/помеха (С/П) за счет работы параметрической антенны в качестве пространственного фильтра. На втором этапе происходит фильтрация сигнала в частотной и временной областях. При этом одной из оценок улучшения отношения С/П с помощью параметрической приемной антенны является коэффициент помехоустойчивости антенны, определяемый в децибелах по формуле

$$\chi = 10 \lg \frac{S_{\text{ппа}}}{S_r}, \quad (2.5)$$

где  $S_{\text{ппа}}$ ,  $S_r$  – значения соотношения С/П на выходе ППА и гидрофона соответственно.

В изотропном поле помех значения коэффициента помехоустойчивости приблизительно равны коэффициенту концентрации (КК) антенны на соответствующей частоте. Так как выражение характеристики направленности классической параметрической приемной антенны представляет собой характеристику направленности антенны «бегущей волны» длиной  $L$ , то для больших размеров классической параметрической приемной антенны ее коэффициент концентрации асимптотически приближается к коэффициенту концентрации непрерывной антенны бегущей волны с той же апертурой:

$$\text{КК}_{\text{ппа}} = 10 \lg \frac{4L}{\lambda},$$

где  $L$  – волновые размеры антенны;  $\lambda$  – длина волны сигнала.

Как и любой акустический приемник, классическая параметрическая приемная антенна имеет определенный уровень собственных помех, обусловленных шумами акустических преобразователей и электронной аппаратуры. Очевидно, что для корректной оценки коэффициента помехоустойчивости по формуле (2.5) необходимо, чтобы уровень собственных помех классической параметрической приемной антенны был ниже шумов акустического происхождения. Только в этом случае можно полностью реализовать выигрыш в помехоустойчивости классической параметрической приемной антенны по сравнению с линейной антенной, получаемый за счет формирования узкой характеристики направленности в широком диапазоне частот.

Необходимо отметить, что для классической параметрической приемной антенны в отличие от линейных антенн, существует специфический вид мешающего воздействия, обусловленного влиянием интенсивного высокочастотного сигнала накачки на прием-



ный тракт. Дело заключается в том, что индекс фазовой модуляции в параметрической приемной антенне (КППА и ЛППА) составляет величину  $10^{-7} \dots 3 \cdot 10^{-9}$ , другими словами, отношение «боковая компонента/накачка» находится в пределах – 140...–170 дБ. Поэтому для того чтобы выделить низкочастотный полезный сигнал из высокочастотных комбинационных частот приходится излучать накачку большой интенсивности. Например, в современных классических параметрических приемных антеннах уровень звукового давления сигнала накачки находится в пределах 170...230 дБ относительно порогового уровня  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. Трудность обработки сигналов комбинационных частот заключается в том, что динамический диапазон лучших образцов отечественной и зарубежной аппаратуры не превышает 100...120 дБ. Если не принять соответствующих мер по подавлению несущей частоты, то возможны перегрузка приемного тракта и, как следствие этого, возникновение «паразитных» нелинейных эффектов.

В настоящее время используются три метода регистрации боковых полос, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к аппаратуре обработки информации при различных конструкциях классической параметрической приемной антенны. Каждый из этих методов имеет ряд преимуществ и недостатков, которые коротко будут рассмотрены ниже.

Полосовой приемник, структурная схема которого представлена на рис. 2.5, относительно прост и легко реализуем на практике. Известно, что в системах связи для получения сообщения достаточно выделения одной из боковых составляющих. Аналогичную процедуру обработки применяют и в полосовом приемнике. Для этого каскады кварцевых фильтров 1, 3 подавляют амплитуду несущей частоты, а малошумящие усилители 2, 4 обеспечивают «развязку» и усиление сигнала одной боковой полосы (ОБП) до уровня, достаточного для управления балансным демодулятором 6, на опорный вход которого подается напряжение с гетеродина 5. Демодулированный сигнал пропускается через фильтр низких частот 7, где осуществляется выделение низкочастотного сигнала из высокочастотных комбинационных частот.

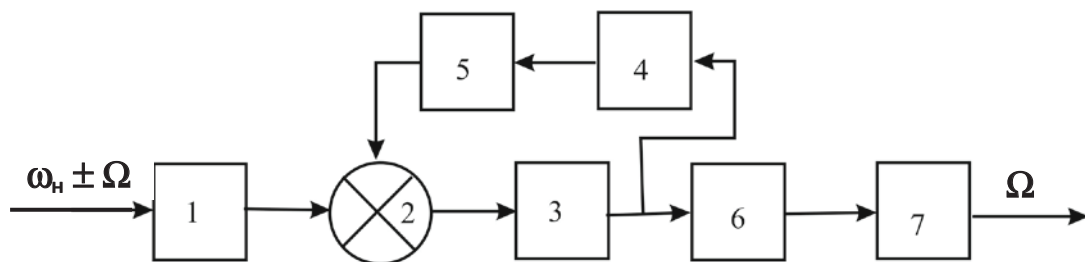


Рис. 2.5. Структурная схема полосового приемника

Одним из существенных недостатков рассмотренной выше процедуры выделения одной боковой полосы является то, что используемые кварцевые полосовые фильтры не имеют идеально прямоугольной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), что затрудняет выделение сигналов, составляющие которых отстоят от несущей частоты в пределах десятков герц. Данное обстоятельство ограничивает амплитудно-частотную характеристику приемного тракта в области низких частот. Другим недостатком полосового приемника является то, что максимально достигнутое с его помощью значение отношения амплитуды накачки к уровню шума в боковой полосе составляет величину 140...150 дБ, то есть чувствительность такой схемы обработки сигналов не высокая.

Рассмотрим конструкцию полосно-заграждающего приемника, обратившись к рис. 2.6. Данный тип приемного тракта с классической параметрической приемной антенной был использован сотрудниками Техасского университета (США) в экспериментах по программе «PARRAY» при использовании классической параметрической приемной антенны на полигоне озера Трэвис и в Мексиканском заливе, когда КППА была размещена на борту исследовательской подводной лодки SS-555 «Delfin».

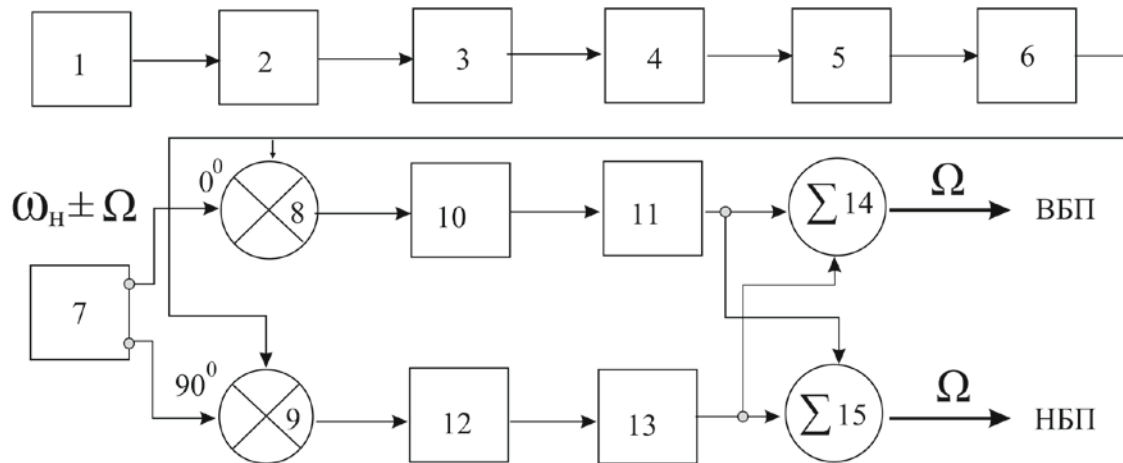


Рис. 2.6. Структурная схема полосно-заграждающего приемника

Основным узлом полосно-заграждающего приемника является специально разработанный для классической параметрической приемной антенны каскад кварцевых режекторных фильтров с полосой подавления около 64 Гц, что позволило снизить нижнюю границу амплитудно-частотной характеристики классической параметрической приемной антенны до 32 Гц. Подавление несущей и усиление боковых полос обеспечивается тремя каскадами режекторных фильтров 1, 3, 5 и малошумящих усилителей 2, 4, 6. Каждый фильтр осуществляет ослабление на 60 дБ при отклонении от несущей частоты менее чем на 10 Гц, тогда как сигналы, отличающиеся от частоты накачки более чем на 32 Гц, ослабляются на 3 дБ и менее. Таким образом, отклик данного приемника содержит сигнал, представляющий собой две боковые полосы с подавленной на 180 дБ несущей частотой. В дальнейшем этот сигнал подается на два балансных демодулятора 8, 9, работающих в режиме фазовой квадратуры. Опорные сигналы на частоте накачки генерируются с помощью гетеродина 7. В дальнейшем низкочастотные сигналы в обоих каналах сдвигаются по фазе на  $90^\circ$  относительно друг друга с помощью широкополосных квадратурных фазовращателей 10, 11, 12, 13. После чего происходит их сложение в соответствующей полярности на сумматорах 14, 15, на выходе которых образуются составляющие верхней (ВБП) и нижней (НБП) боковых полос.

Рассмотренный полосно-заграждающий приемник является эффективным устройством обработки информации в параметрической приемной антенне. Он способен выделять сигналы с гораздо меньшим индексом модуляции по сравнению с любым другим из имеющихся в настоящее время приемников. Наиболее существенным недостатком данной схемы обработки сигналов является то обстоятельство, что используемые кварцевые фильтры имеют высокое входное сопротивление, а их согласование с приемным элементом КППА вызывает существенные технические трудности.

Схемам обработки сигналов, проанализированным выше, присущ еще один общий недостаток, заключающийся в том, что их эффективность значительно снижается в случае, если приемный элемент параметрической приемной антенны подвержен вибрации. Если волна является идеально гармонической, то сигнал  $S(t)$  на приемном элементе можно представить в виде

$$S(t) = \cos[\omega_H t + \varphi(t) + \psi], \quad (2.6)$$

где  $\varphi(t)$  – фазовая модуляция, обусловленная нелинейностью воды;  $\psi$  – фазовый сдвиг, связанный с задержкой за счет распространения накачки от излучателя до приемного элемента параметрической приемной антенны;  $\omega_H$  – частота накачки;  $t$  – время.

Для удобства анализа выражение (2.6) можно преобразовать к виду

$$S(t) = \cos(\omega_H t + \psi) - \varphi(t) \cos(\omega_H t + \psi).$$

Если излучатель накачки и приемный элемент классической параметрической приемной антенны тесно не связаны между собой, то сдвиг фазы ( $\psi$ ) непостоянен и может быть определен как

$$\psi(t) = \psi_0 + \psi_m(t),$$

где  $\psi_0$  – начальный сдвиг фазы;  $\psi_m(t)$  – изменение фазы, вызванное вибрацией преобразователя.

Таким образом, «паразитная» фазовая модуляция, возникающая вследствие вибрации преобразователя, может вызвать искажение принимаемых сигналов.

Для устранения данного недостатка и была разработана схема с фазовой автоподстройкой, структурная схема которой представлена на рис. 2.7. Сигнал с приемного элемента классической параметрической приемной антенны поступает на вход согласующего трансформатора 1 и подается на двойной балансный диодный смеситель 2 с большим динамическим диапазоном (в 100 дБ и более).

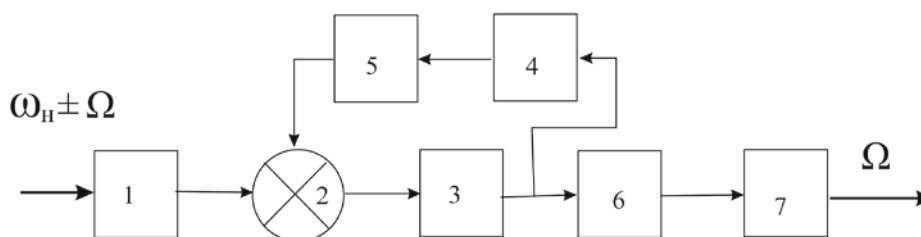


Рис. 2.7. Структурная схема приемника с фазовой автоподстройкой

Выходной сигнал смесителя усиливается в усилителе 3 и пропускается через фильтр низких частот 4 с целью получения управляющего напряжения для маломощного генератора 5, формирующего опорный сигнал для смесителя. Сигналы на выход схемы обработки поступают с выхода усилителя через фильтр низких частот 6 и окончательный усилитель 7.

Испытания такого приемника показали, что уровень шумов в данном устройстве составляет величину –160 дБ, то есть чувствительность схемы с фазовой автоподстройкой уступает только аналогичному параметру полосно-заграждающего приемника.

## 2.4. Методы повышения эффективности параметрических приемных антенн

Одним из существенных недостатков классической параметрической приемной антенны, как уже было отмечено выше, является их низкая помехоустойчивость, поэтому основные усилия специалистов в настоящее время сосредоточены на решении этой проблемы.

Добиться некоторого улучшения соотношения сигнал/помеха можно за счет увеличения протяженности области взаимодействия волн. Анализ работы классической параметрической приемной антенны с «многокилометровой базой» показал, что попытка сузить диаграмму направленности классической параметрической приемной антенны была «нейтрализована» тем обстоятельством, что амплитуда сигналов комбинационных частот оказывается намного меньше уровня электрических шумов современной регистрирующей аппаратуры. Это утверждение относится к случаям, когда применяется только высокочастотная накачка среды (десятки килогерц и выше). Низкочастотная накачка в этом случае и ее эффективность не рассматриваются.

Как уже отмечалось ранее, достигнуть улучшения качества пространственной обработки сигналов можно путем применения параметрических приемных антенных решеток (ППАР), которые представляют собой несколько пар «элементарных КППА», ориентированных в одном направлении. Кроме того, при использовании ППАР появляется возможность электронного сканирования ХН за счет обычной задержки сигнала от элементарных КППА. При этом выражение для пространственного распределения волн комбинационных частот в ППАР имеет вид

$$P_{\pm}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{1}{2}nd\frac{\Omega}{C_0}\sin\theta\right)}{n\sin\left(\frac{1}{2}nd\frac{\Omega}{C_0}\sin\theta\right)},$$

где  $n$  – число пар «излучатель–приемник»;  $d$  – диаметр электроакустического преобразователя;  $\Omega$  – частота НЧ сигнала;  $\theta$  – угол между взаимодействующими волнами;  $C_0$  – скорость звука в однородной среде.

Следует заметить, что существенным недостатком параметрической приемной антенной решетки является взаимное влияние полей излучения высокочастотной накачки на соседние приемные элементы. Эти эффекты приводят к значительному расширению основного максимума характеристик направленности параметрической приемной антенной решетки.

Рассмотрим один из путей повышения эффективности применения локальной параметрической приемной антенны. Из теории помехоустойчивости известно, что повышение качества приема можно добиться путем увеличения базы обрабатываемых сигналов. При этом понятие «база сигналов» подразумевает произведение их длительности на занимаемую ими полосу частот. Исходя из этого повышение помехоустойчивости локальной параметрической приемной антенны возможно за счет применения «сложных» высокочастотных сигналов накачки среды.

Следует отметить, что увеличение базы высокочастотного сигнала накачки при ее непрерывном излучении можно достичь путем расширения полосы частот, занимаемых

ею. Существуют методы повышения эффективности такого типа антенн за счет применения специальных широкополосных сигналов накачки. Так, например, предлагается использовать эффект образования высших гармоник при распространении высокочастотной волны накачки конечной амплитуды. При этом процедура приема заключается в независимой обработке модуляционных процессов на каждой из гармоник сигналов накачки с последующим суммированием откликов частотных каналов приемного тракта. Интересен тот факт, что использование широкополосных высокочастотных сигналов накачки, помимо эффекта повышения помехоустойчивости локальной параметрической приемной антенны, позволяет осуществлять электронное сканирование подобной антенны относительно простым способом.

Параметрическая приемная антенная решетка на базе элементарных локальных параметрических приемных антенн, структурная схема которой представлена на рис. 2.8, была впервые предложена Робертсоном.

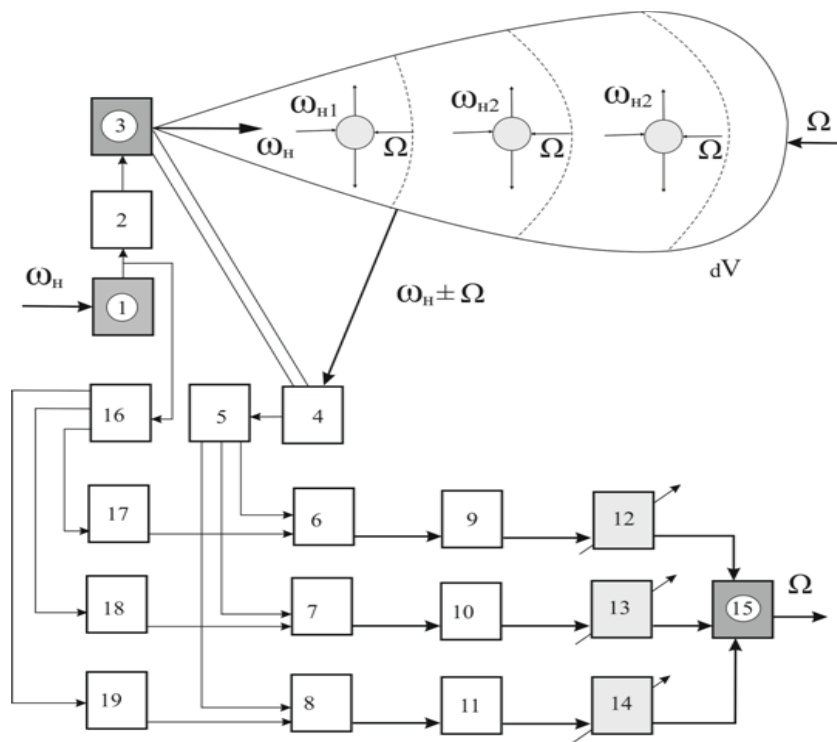


Рис. 2.8. Структурная схема параметрической приемной антенной решеткой

Принцип действия данного устройства заключается в том, что с помощью генератора широкополосных сигналов 1, усилителя 2 и излучателя 3 в водную среду навстречу низкочастотному полезному сигналу  $\Omega$  излучается высокочастотный сигнал накачки  $\omega_{H_i}$ , представляющий собой, в простейшем случае, звукоряд гармоник основной частоты  $\omega_H$ . Одновременно с этим широкополосный сигнал  $\omega_{H_i}$  подается на вход многоканального полосового фильтра 16.

Модуляционный процесс ( $\omega_{H_i} \pm \Omega$ ) из озвученного объема  $dV$  принимается приемным элементом 4 и поступает в блок полосовых фильтров 5, каждый из которых настроен на частоту определенной гармоники высокочастотного сигнала накачки  $\omega_{H_i}$ . Далее обработка сигналов осуществляется в независимых частотных каналах, включающих в себя балансные демодуляторы 6, 7, 8 и фильтры низких частот 9, 10, 11. В качестве опорных сигналов для демодуляторов каждой из частотных ветвей используются

соответствующие гармоники, генерируемые задающим генератором и отфильтрованные при помощи соответствующих полосовых фильтров.

Принцип управления характеристиками направленности подобной антенны состоит в том, что опорные сигналы получают определенную временную задержку для каждой из гармоник с помощью соответствующих задерживающих цепей 17, 18, 19.

Получается, что в каждой из частотных ветвей обрабатывается высокочастотный сигнал накачки, рассеянный от определенной области озвученного пространства  $dV_i$ , удаленной от источника на расстояния  $R_i$ , соответствующие заданной временной задержке. Другими словами, формируется своего рода «бестелесная» антенная решетка, каждый элемент которой возбуждается на определенной частоте, а сканирование характеристик направленности подобной антенны осуществляется путем выравнивания фазы выделенного низкочастотного сигнала  $\Omega$  с помощью устройства временной задержки сигналов 12, 13, 14, отклики которых складываются на сумматоре 15. ЛППА Робертсона, помимо эффекта относительно простого способа управления сканированием характеристик направленности антенны, позволяет улучшить качество приема сигналов за счет использования сложного высокочастотного сигнала накачки путем синфазного сложения откликов независимых частотных каналов с различными корреляционными свойствами помех.

*Во второй главе:*

– проведен анализ классических методов и средств высокочастотной нелинейной акустики;

– даны результаты их реализации в гидроакустических станциях приема и измерения характеристик гидрофизических полей морской среды;

– показано, что тракты обработки и выделения измеряемых информационных волн обеспечивают повышение чувствительности и направленности параметрического приема волн в широком диапазоне частот, составляющем десятки-сотни герц. Такое преимущество достигается за счет применения высокочастотной накачки среды, увеличивающей объем рабочей зоны параметрической приемной антенны, а также за счет применения в приемных системах специальных трактов формирования и электронного сканирования характеристики направленности антенны.

Помехоустойчивость приема сигналов в данных системах также недостаточна, что объясняется низким уровнем формируемых параметрических составляющих (как носителей информационных волн) на фоне интенсивных электрических и других, например, вибрационных помех и наводок в приемном тракте станций в рабочем диапазоне частот.

Исходя из этого необходимо дальнейшее совершенствование классических методов и средств высокочастотной нелинейной гидроакустики.

### 3. РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ПРИЕМНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

#### 3.1. Реверберация при непрерывном излучении высокочастотного сигнала накачки

Рассматривая один из аспектов физической модели, а именно реверберацию, следует отметить, что приведенные в литературе ее значения получены экспериментальным путем только для импульсных сигналов. Проанализируем влияние непрерывного излучения ВЧ накачки на формирование комбинационных частот в условиях поверхностной и объемной реверберации. Известно, что интенсивность поверхностной реверберации при импульсном излучении сигнала может быть оценена с помощью выражения

$$I_{Ps} = \frac{S_s h W_a \eta}{32\pi\beta r^3} e^{-4\beta r},$$

где  $S_s$  – коэффициент поверхностной реверберации;  $h$  – глубина излучателя;  $W_a$  – акустическая мощность излучения;  $\eta$  – параметр направленности излучателя;  $\beta$  – коэффициент пространственного затухания;  $r$  – расстояние до точки рассеяния.

Применительно к РППА интенсивность волн комбинационных частот может быть определена как

$$I_{\pm} = \left( \frac{\varepsilon \omega_n r P_n}{2\rho c} \right)^2 \frac{I_0 S_s}{r^3} \frac{c \tau_n \psi(\theta, \varphi)}{2} e^{-4\beta r},$$

где  $I_0$  – интенсивность, приведенная к расстоянию 1 м от излучателя;  $\psi(\theta, \varphi)$  – эквивалентная ДН;  $\tau_n$  – длительность импульса;  $r$  – расстояние до точки рассеяния;  $\omega_n$  – частота ВЧ сигнала накачки;  $\varepsilon$  – параметр нелинейности;  $P_n$  – амплитуда звукового давления накачки;  $\rho, c$  – плотность и скорость звука в среде.

Из последнего выражения можно получить коэффициент преобразования  $G$ , характеризующий отношение амплитуды звукового давления ВЧ волн комбинационных частот к аналогичному параметру НЧ волны полезного сигнала:

$$G = \frac{P_{\pm}}{P_c} = \sqrt{\frac{I_{\pm}}{I_c}} = \frac{\varepsilon \omega_n P_n}{2\rho c^3} \sqrt{\frac{S_s c \tau_n \sqrt{\lambda_c}}{2}} r^{-3/4},$$

где  $P_{\pm}, P_c$  – амплитуды звукового давления волн комбинационных частот и НЧ сигнала;  $I_{\pm}, I_c$  – соответствующие им интенсивности звука;  $\lambda_c$  – длина волны НЧ сигнала.

Проанализируем случай, когда плоская волна НЧ сигнала взаимодействует с ВЧ волной накачки, рассеянной на объемных неоднородностях среды. Интенсивность сигнала реверберации может быть определена с помощью выражения

$$I_{Pv} = \frac{S_v W_a \eta}{16\beta r^2} e^{-4\beta r},$$

где  $S_v$  – коэффициент объемной реверберации;  $W_a$  – акустическая мощность излучателя;  $\beta$  – коэффициент пространственного затухания;  $r$  – расстояние до точки рассеяния.

Для импульсного сигнала пространственные размеры объема  $V$ , в котором взаимодействуют волны, могут быть определены как

$$V = \frac{c\tau_{и}}{2} \psi(\theta, \varphi) r^2,$$

где  $\psi(\theta, \varphi)$  – эквивалентная ДН с учетом направленности преобразователей;  $\tau_{и}$  – длительность импульса;  $c$  – скорость звука;  $r$  – расстояние до точки рассеяния.

Тогда величины  $I_{\pm}$  и  $G$  могут быть найдены как

$$I_{\pm} = \left( \frac{\varepsilon \omega_{н} r P_{н}}{2\rho c^3} \right)^2 \frac{I_0 S_v}{r^2} V e^{-4\beta r},$$

$$G = \frac{\varepsilon \omega_{н} P_{н}}{2\rho_0 c_0^3} \sqrt{\frac{\pi S_v c \tau_{и} \lambda_c}{2r}},$$

где  $\varepsilon$  – параметр нелинейности среды;  $\omega_{н}$  – частота ВЧ сигнала накачки;  $P_{н}$  – амплитуда звукового давления ВЧ накачки;  $I_0$  – интенсивность, приведенная к расстоянию 1 м от излучателя;  $S_v$  – коэффициент объемной реверберации;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и скорость звука в среде;  $\lambda_c$  – длина волны НЧ сигнала.

Проведенный анализ показывает, что в данном случае величина коэффициента  $G$  возрастает на порядок по сравнению с аналогичным параметром для поверхностного рассеяния. Несомненно, что еще более значительные величины комбинационного рассеяния могут быть получены при работе РППА в непрерывном режиме излучения ВЧ сигнала накачки за счет увеличения пространственных размеров объема взаимодействующих волн. Элементарный объем  $dr$  будет создавать акустическое поле комбинационных частот, интенсивность которого для поверхностной реверберации может быть определена с помощью выражения

$$dI_{\pm} = \left( \frac{\varepsilon \omega_{н} \tau_{и} P_c}{2\rho c^3} \right)^2 \frac{I_0 S_s}{r^3} \sqrt{\frac{\lambda_c}{2}} dr,$$

где  $\varepsilon$  – параметр нелинейности среды;  $\omega_{н}$  – частота ВЧ сигнала накачки;  $\tau_{и}$  – длительность сигнала;  $P_c$  – амплитуда звукового давления НЧ сигнала;  $I_0$  – интенсивность, приведенная к расстоянию 1 м от излучателя;  $S_s$  – коэффициент поверхностной реверберации;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и скорость звука в среде;  $\lambda_c$  – длина волны НЧ сигнала.

Произведя интегрирование от  $r_0$  до  $r_3$ , получим

$$I_{\pm} = \left( \frac{\varepsilon \omega_{н} P_c}{2\rho c^3} \right)^2 \frac{2I_0 S_s \sqrt{\lambda_c}}{\sqrt{r_0}},$$



где  $r_0, r_3$  – минимальное и максимальное расстояния, с которых осуществляется прием сигнала. Величина коэффициента  $G$  будет равна

$$G = \frac{\varepsilon \omega_H P_c}{\rho c^3} \sqrt{\frac{S_S}{2}} \sqrt{\frac{\lambda_c}{r_0}},$$

где  $P_c$  – амплитуда звукового давления ВЧ накачки.

При этом величина коэффициента преобразования возрастает уже на два порядка по сравнению с импульсным излучением ВЧ сигнала в условиях поверхностной реверберации.

### 3.2. Нелинейность морской среды и ее влияние на эффективность параметрических приемных антенн

Рассматривая следующий аспект физической модели РППА – нелинейность среды, следует заметить, что различного рода микронеоднородности (газовые пузырьки, зоо- и фитопланктон, взвеси и др.) могут приводить к увеличению этого параметра на 1...2 порядка [141, 142].

Термодинамическая нелинейность является универсальной характеристикой, присущей любым средам. В квадратичном приближении известное уравнение Лайтхилла можно представить в виде

$$P = P_0 + A \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho} + \frac{B}{2} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right)^2,$$

где  $(\rho - \rho_0)$  – изменение плотности среды;  $P_0$  – атмосферное давление;  $A$  и  $B$  – константы, равные

$$A = \rho_0 \left( \frac{dP}{d\rho} \right)_s = \rho_0 c^2,$$

$$B = \rho_0^2 \left( \frac{d^2 P}{d\rho^2} \right)_s = P_0^2 \left( \frac{dc^2}{d\rho} \right)_s,$$

где  $c$  – скорость звука;  $\rho_0$  – плотность в невозмущенной среде;  $A$  – константа, определяемая обратной адиабатической сжимаемостью  $\beta$ :

$$\rho_0 c^2 = 1/\beta,$$

$$\text{где } \beta = (1/\rho)(d\rho/dP)_s.$$

Таким образом, величины  $A$  и  $\beta$  связаны между собой соотношением

$$A = \rho_0 c^2 = 1/\beta.$$

В общем случае константа  $A$  определяет линейное поведение волны, а константа  $B$  характеризует отклонение от линейности и определяется второй производной от плотности или первой производной от скорости звука по плотности либо по давлению:

$$B = \frac{\rho_0}{c^2} \left( \frac{dc^2}{d\rho} \right)_s = \rho_0 \left( \frac{dc^2}{dP} \right)_s = 2\rho_0 c \left( \frac{dc}{dP} \right)_s,$$

где  $P$  – акустическое давление;  $S$  – энтропия.

В качестве показателя отклонения от линейности вводят понятие параметра нелинейности  $\Gamma = B / A$ :

$$\Gamma = \frac{\rho_0}{c^2} \left( \frac{d^2c}{d\rho} \right)_s = \rho_0 \left( \frac{dc^2}{dP} \right)_s = 2\rho_0 c \left( \frac{dc}{dP} \right)_s.$$

Благодаря нелинейности возможно искажение профиля звуковой волны, вплоть до образования ударных волн. В случае плоских волн расстояние разрыва  $R^*$  может быть определено с помощью уравнения

$$R^* = 1/\varepsilon \cdot k \cdot M,$$

где  $k = \omega / c$  – волновое число;  $M$  – число Маха, равное

$$M = V / c = P / (\rho c^2).$$

Расстояние разрыва не очень велико, и на высоких частотах нелинейные эффекты начинают играть существенную роль уже вблизи излучателя накачки. Особый практический интерес представляет изучение акустической нелинейности жидкости с пузырьками газа. Для такой среды А.М. Сутиным было введено понятие «эффективный нелинейный параметр»  $\varepsilon_{ef}$ :

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_0 + \varepsilon,$$

где  $\varepsilon_0$  – нелинейность, обусловленная наличием пузырьков в жидкости:

$$\varepsilon_0 = \pi^2 \left( \frac{c}{\omega} \right)^4 \left[ i \frac{2}{\eta^2} g_1(R_\Omega) + \frac{3\gamma + 2}{(\delta - i\eta)} g_2(R_\omega) \right], \quad (3.1)$$

где  $g(R_\Omega), g(R_\omega)$  – функции распределения пузырьков по радиусам для НЧ и ВЧ сигналов;  $R_\Omega, R_\omega$  – радиусы пузырьков для НЧ и ВЧ частот;  $\gamma$  – показатель адиабаты газа;  $c$  – скорость звука в среде;  $\delta$  – постоянная затухания.

Как видно из формулы (3.1), в зависимости от вида функции распределения  $g(R)$  изменяется характер частотной зависимости параметра нелинейности морской среды. Для приближенной оценки параметра нелинейности среды с пузырьками воздуха Л.М. Мясниковым предложено использовать выражение

$$\varepsilon \cong 10^8 \cdot \mu,$$

где  $\mu$  – содержание по объему газа в жидкости.

Как видно из последнего выражения, при содержании в воде воздуха всего 0,01 % по объему, параметр нелинейности для такой среды составляет величину приблизительно равную  $10^6$ . Рассмотрим значение скорости звука – третьего аспекта физической модели РППА. При решении задач распространения звуковых волн в однородной среде принято использовать уравнение гидроакустики, которое не учитывает нелинейные члены высших порядков, обусловленные эффектами сжимаемости среды. Скорость звука выражается известной зависимостью

$$c = \frac{1}{\sqrt{K_0 \rho}},$$

где  $K_0$  – коэффициент адиабатической сжимаемости.

Так как среда с дисперсией частично сжимаема, то будет изменяться и скорость распространения звуковой волны. По данным Л.М. Мясникова, скорость звука в дисперсионной среде резко падает при увеличении концентрации пузырьков и достигает минимума равного 20 м/с. При этом даже в случае присутствия в воде воздуха, составляющего всего 0,01 % по объему, скорость звука уменьшается на 53 % от аналогичного параметра в воде, не содержащей воздух. Значение скорости звука для такой среды может быть представлено зависимостью

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho[(\mu_1 - 1)K_0\mu_1K_1]}}$$

где  $\mu_1$  – относительный объем газа в воде;  $K_0$  и  $K_1$  – константы характеризующие упругость воды и растворенного в ней газа.

В заключение можно сформулировать следующее:

Наличие в морской среде и донных осадках фазовых включений приводит к возникновению новых физических закономерностей, связанных с распространением, рассеянием и взаимодействием акустических волн.

Интенсивность реверберации ВЧ непрерывного сигнала накачки в РППА, нелинейность среды, плотность и скорость звука в ней являются взаимосвязанными и частотно-зависимыми величинами, которые могут существенно превосходить свои средние значения.

Процесс взаимодействия акустических волн в неоднородных средах открывает возможность разработки новых способов излучения и приема НЧ акустических сигналов с

помощью параметрических антенн. Наиболее перспективна в этом смысле ППА «реверберационного» типа, использующая в процессе своего функционирования непрерывный ВЧ сигнал накачки на частотах, близких к резонансным частотам рассеивателей звука, доминирующих в прилегающей к антенне области среды.

Исходя из современного состояния теории нелинейной гидроакустики становится очевидным возможность разработки эффективных активно-пассивных параметрических гидролокаторов, использующих информацию, содержащуюся в гидрофизических и различных акустических полях для исследования морских осадков, а также наличия в грунте скоплений углеводородных залежей [145, 146].

### **3.3. Физико-математическая модель реверберационной параметрической приемной антенны**

Сформулируем физическую модель РППА применительно к морской геофизике следующим образом. В неоднородной морской среде (приповерхностный пузырьковый слой) с помощью ВЧ излучателя, установленного на корпусе судна, излучается ВЧ волна накачки на частоте  $\omega_H$ , близкой к резонансной частоте рассеивателей звука  $\omega_S$ , доминирующих в объеме среды протяженностью несколько десятков метров, непосредственно прилегающей к РППА. Рассеиваясь на неоднородностях водной среды, ВЧ волна накачки взаимодействует с отраженной волной НЧ сигнала, сформированной и излученной ранее при помощи ПИ с образованием ВЧ волн комбинационных частот, и принимается вторым ВЧ акустическим преобразователем, пространственно совмещенным с ВЧ излучателем накачки.

Математическое описание физических процессов, лежащих в основе функционирования РППА, будем производить на основе соотношений, характеризующих механизмы генерации волн комбинационных частот, формирования суммарной помехи и направленных свойств РППА. Адекватность модели будем оценивать на основании экспериментальных результатов и отношения эффективности рассеяния на комбинационной частоте к линейному рассеянию ВЧ волны накачки.

Механизм генерации волн комбинационных частот в РППА заключается в том, что под воздействием волн ВЧ накачки и НЧ полезного сигнала элементарный рассеиватель будет совершать колебания монополярного типа в направлении коллинеарного распространения волны сигнала и рассеянной волны накачки. В связи с тем, что рассеяние происходит во множестве точек пространства, ограниченного с одной стороны излучателем накачки, а с другой – расстоянием затухания, то в объеме взаимодействия волн образуется множество элементарных параметрических приемников звука с виртуальными излучателями накачки.

Линейное рассеяние в гидроакустике принято оценивать при помощи коэффициента объемного рассеяния, определяемого известным выражением

$$m_v^{(1)} = \frac{\pi R_\omega^3 g_\omega}{2\delta_\omega},$$

где  $R_\omega$  – радиус пузырька;  $g_\omega$  – функция распределения пузырьков по характерным размерам;  $\delta_\omega$  – постоянная затухания; (1) – индекс, соответствующий линейным процессам.

В случае нелинейного взаимодействия волн на частотах накачки  $\omega_H$  и сигнала  $\Omega$  наблюдается генерация волн комбинационных частот  $\omega_{\pm}$ . Коэффициент рассеяния звука на комбинационных частотах определяется как резонансными характеристиками самих включений, так и функцией распределения по характерным размерам. Сечение нелинейного рассеяния на одиночном включении можно представить в виде

$$v_{\omega_{\pm}}^{(2)} \cong \frac{R^2}{|g_{\omega} g_{\Omega} g_{\pm}|^2} \left( \frac{\omega_H}{\omega_s} \right)^8 \left[ \frac{3}{2} (\gamma + 1) \left( \frac{\omega_s}{\omega_H} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{\Omega}{\omega_H} \right) \right]^2 K^2 P_H P_c,$$

где  $P_H, P_c$  – амплитуды звукового давления волн накачки и сигнала, соответственно;  $\omega_H, \Omega$  – их соответствующие частоты;  $K$  – адиабатическая сжимаемость рассеивателя;  $R$  – радиус рассеивателя (пузырька);  $\omega_s$  – резонансная частота рассеивателя;  $\gamma$  – показатель адиабаты газа.

Для нахождения коэффициента нелинейного объемного рассеяния звука можно использовать формулу

$$m_{v_{\omega_{\pm}}}^{(2)} = \int v_{\omega_{\pm}}^{(2)} g(R) dR,$$

где  $g(R)$  – функция распределения пузырьков по характерным размерам;  $R$  – радиус рассеивателя (пузырька); (2) – индекс, соответствующий нелинейным процессам.

Следует заметить, что вклад в суммарное рассеяние звука на комбинационных частотах вносят как резонансные включения на частотах  $\omega_H$  и  $\Omega$ , так и на частоте  $\omega_{\pm}$ . В связи с тем, что  $\omega_H \cong \omega_{\pm}$ , то  $m_{v_{\omega_{\pm}}}$   $\cong m_{v_{\omega_{\pm}, \pm}}$ , где второй индекс указывает частоту, на которой резонансные включения вносят основной вклад в суммарное рассеяние. В итоге общее выражение для  $m_{v_{\pm}}^{(2)}$  можно представить в следующем виде:

$$m_{v_{\pm}}^{(2)} = \frac{\pi^2}{2} K^2 P_H P_c \left[ \frac{(3\gamma + 2)^2}{9} \frac{g_H R_H^3}{v_H} + \left( \frac{\Omega}{\omega} \right)^2 \frac{g_c \cdot R_c^3}{4v_c} \right], \quad (3.2)$$

где  $g_H, g_c$  – функции распределения рассеивателей звука на частотах накачки и сигнала.

Из выражения (3.2) видно, что вклад в коэффициент нелинейного рассеяния на частотах  $\omega_{\pm}$  вносят как включения на частоте накачки  $\omega_H$ , так и на частоте сигнала  $\Omega$ .

Следует обратить внимание на второе слагаемое в формуле (3.2), где имеется малый коэффициент  $(\Omega/\omega_H) \ll 1$ . Поэтому, при плавной функции распределения рассеивателей по размерам, второе слагаемое можно не учитывать. В случае если функция  $g(R)$  имеет максимум, когда  $R_{\Omega} > R_{\omega_H}$ , то вклад от второго слагаемого будет существенно выше, чем от первого.

Воспользовавшись выражениями для коэффициентов линейного и нелинейного рассеяния звука, можно определить уровень рассеянных ВЧ сигналов на соответствующих частотах  $\omega_H$  и  $\omega_H \pm \Omega$ .

При оценке линейного рассеяния воспользуемся выражением

$$\left| P_{S_{\omega_H}}^{(1)} \right|^2 = \int \frac{m_V^{(1)} \left[ P_{\omega_{Hi}}^{(x)} \right]^2}{X^2} dV, \quad (3.3)$$

где  $x$  – расстояние;  $V$  – объем;  $P_{\omega_{Hi}}$  – амплитуда акустического давления, действующего на рассеиватели звука, определяемая как

$$P_{\omega_{Hi}} = P_H \frac{L_H}{X} D_H(\theta) e^{-\alpha_{\omega_H} x},$$

где  $P_H$  – амплитуда звукового давления волны накачки;  $L_H$  – длина зоны Фраунгофера на частоте накачки;  $\alpha_{\omega_H}$  – коэффициент поглощения на частоте  $\omega_H$ ;  $D_H(\theta)$  – ДН излучателя на частоте накачки  $\omega_H$ , определяемая как

$$D_H(\theta) = \int a_H^2(\theta) \sin \theta d\theta,$$

где  $a_H$  – волновые размеры излучателя накачки.

Элемент объема  $dV$  можно представить в виде

$$dV = X^2 \sin \theta dx d\theta d\varphi, \quad (3.4)$$

где  $\theta$ ,  $\varphi$  – углы ориентации элементарного объема в пространстве;  $X$  – расстояние.

Подставляя выражение (3.4) в формулу (3.3), при однородном коэффициенте  $m_V^{(1)}$  имеем

$$\left| P_{S_{\omega_H}}^{(1)} \right|^2 = 2\pi m_{V_H}^{(1)} (P_H L_H)^2 D_H(\theta) F_H(x), \quad (3.5)$$

где  $P_H$  – амплитуда звукового давления волны накачки;  $L_H$  – длина зоны Фраунгофера на частоте накачки.

При этом функция  $F_H(x)$  определяет суммирование накачки по пространству рассеивателей при непрерывном излучении накачки и может быть определена как

$$\begin{aligned} F_H(\omega_H) &= \int_0^\infty \frac{e^{-2\alpha_H x}}{x^2} dx \cong \int_0^{L_H} \frac{dx}{x^2} + \int_{L_H}^\infty \frac{e^{-2\alpha_H x}}{x^2} dx \cong \\ &\cong \frac{1}{2\alpha_H L_H^2} \left( 2\alpha_H L_H + e^{-2\alpha_H L_H} \right), \end{aligned}$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент поглощения на частоте накачки;  $K$  – адиабатическая сжимаемость рассеивателя;  $x$  – расстояние.

В случае  $\alpha_n L_n \ll 1$  имеем

$$F_n(\omega_n) \cong \frac{1}{2\alpha_n L_n^2}$$

Выполнив необходимые преобразования, получим

$$\left| P_{s\omega_n}^{(1)} \right|^2 = 2\pi m_{v_n}^{(2)} D_n(\theta) \frac{P_n^2}{2\alpha_n},$$

где  $m_{v_n}^{(2)}$  – коэффициент нелинейного рассеяния звука;  $D_n(\theta)$  – ДН излучателя накачки.

Для расчета среднего квадрата амплитуды рассеянного сигнала на комбинационной частоте  $\omega_{\pm}$  в приближении однократного рассеяния (борновское приближение) можно воспользоваться формулой (3.5), где вместо коэффициента линейного рассеяния используется коэффициент, определяемый с помощью выражения (3.2). Исходя из этого, получим выражение

$$\left| P_{s_{\pm}}^{(2)} \right|^2 = \int \frac{m_{v_{\pm}}^{(2)} |P_{H_i}(x)|^2}{x^2} dV = \int \frac{\tilde{m}_{v_{\pm}}^{(2)} |P_{H_i}^2(x) P_{c_i}^2(x)|}{x^2} dV, \quad (3.6)$$

где  $\tilde{m}_{v_{\pm}}^{(2)}$  – нормированный коэффициент объемного рассеяния на комбинационных частотах;  $P_{H_i}$ ,  $P_{c_i}$  – амплитуды звукового давления волн ВЧ накачки и НЧ сигнала в точке рассеяния;  $x$  – расстояние до точки рассеяния.

Интегрируя выражение (3.6) по объему взаимодействия акустических волн ВЧ накачки и НЧ сигнала, получим

$$\left| P_{s_{\pm}}^{(2)} \right|^2 = 2\pi \tilde{m}_{v_{\pm}}^{(2)} D_{\pm}(\theta) (P_n L_n)^2 (P_c L_c)^2 F_{\pm}(\omega_{\pm}), \quad (3.7)$$

где  $L_n$ ,  $L_c$  – длины зон Фраунгофера для частот накачки и сигнала;  $D_{\pm}(\theta)$  – ДН элементарного параметрического приемника, определяемая с помощью выражения

$$D_{\pm}(\theta) = \int a_n^2(\theta) a_c^2(\theta) \sin \theta d\theta,$$

где  $a_n$ ,  $a_c$  – волновые размеры излучателей накачки и сигнала.

Нормированный коэффициент нелинейного рассеяния звука, определяется с помощью выражения

$$\tilde{m}_{v_{\pm}}^{(2)} = m_{v_{\pm}}^{(2)} / P_H P_c = \frac{\pi^2}{2} K^2 \left[ \frac{(3\gamma+2)^2}{9} \frac{g_H R_H^3}{v_H} \left( \frac{\Omega}{\omega_H} \right)^2 \frac{g_c R_c^3}{4v_c} \right].$$

$F_{\pm}$  – функция, определяющая суммирование волн комбинационных частот по пространству:

$$F_{\pm} = \frac{e^{-2\alpha_c l}}{\tilde{\alpha} L_c^2 L_H^2} (e^{-\tilde{\alpha} L_H} + \tilde{\alpha} L_H);$$

$$\tilde{\alpha} = 2(\alpha_H - \alpha_c),$$

где  $\tilde{\alpha}$  – нормированный коэффициент поглощения на разностной частоте. В случае  $\tilde{\alpha} L_H \cong 2\alpha_H L_H \ll 1$  имеем

$$F_{\pm} \cong \frac{e^{-2\alpha_c l}}{\tilde{\alpha} L_c^2 L_H^2}.$$

Окончательно выражение (3.7) можно записать в виде

$$\left| P_{s_{\pm}}^{(2)} \right|^2 = 2\pi \tilde{m}_{v_{\pm}}^{(2)} D_{\pm}(\theta) (P_H L_H)^2 (P_c L_c)^2 \frac{e^{-2\alpha_c L_c}}{\tilde{\alpha} L_c^2 L_H^2}. \quad (3.8)$$

Следует отметить, что выражения (3.7) – (3.8) поясняют механизм образования волн комбинационных частот в направлении на источник НЧ сигналов. Интегрирование формулы (3.7) при углах  $\theta \neq 0^\circ$  позволяет представить пространственное распределение интенсивности акустического поля волн комбинационных частот в виде

$$\frac{dI_{\pm}}{d\Omega^*} = L_H \int_{L_H}^{\infty} \frac{dx}{x^3 \left(1 + \frac{x}{l}\right)^2 - \frac{2x}{l} \cos \theta \cos \varphi} =$$

$$= \left[ 1 + \frac{L_H^2}{l^2} \frac{1}{2\sqrt{2} \sin \frac{\Psi}{2}} \left( \arctg \frac{l^*/l}{\sqrt{2} \sin \frac{\Psi}{2}} - \arctg \frac{L_c/l}{\sqrt{2} \sin \frac{\Psi}{2}} \right) \right],$$

$$\cos \Psi = \cos \theta \cos \varphi; \quad d\Omega^* = \sin \theta d\theta d\varphi; \quad l^* \leq \frac{l}{\alpha_c};$$



где  $l$  – расстояние между РППА и источником сигнала;  $\alpha_c$  – коэффициент пространственного затухания на частоте НЧ сигнала;  $L_n, L_c$  – пространственная протяженность зон Фраунгофера для частот ВЧ накачки и НЧ сигнала.

Сформулированная выше модель характеризует пространственное распределение акустического поля комбинационных частот при относительно малых (десятки-сотни метров) расстояниях от РППА до источника НЧ сигналов. При этом существует накапливающееся с расстоянием комбинационное взаимодействие сферических волн, рассеянных отдельными рассеивателями на частоте накачки, с квазиплоской волной НЧ полезного сигнала. Причем взаимодействие акустических волн имеет ярко выраженную направленность вдоль распространения квазиплоской НЧ волны. В случае монодисперсного распределения рассеивателей осуществляется некогерентное сложение акустического поля комбинационных частот в точке нахождения РППА, и его пространственное распределение можно представить как

$$\frac{d|P_{\pm}|^2}{d\Omega^*} = \left(\frac{\varepsilon}{\rho c^2}\right)^2 \frac{1}{4} \left(P_c \frac{L_c}{l}\right)^2 (P_n L_n)^2 \left(\frac{\rho \omega_n^2 R^2 K}{3q_n}\right)^2 \times$$

$$\times (K_n R)^n \int_0^{\infty} e^{-2\alpha_n x} \left[ \frac{\sin\left(K_c x \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)}{K_c x \sin^2 \frac{\theta}{2}} \right]^2 dV, \quad (3.9)$$

где  $n$  – количество рассеивателей в единице объема;  $x$  – расстояние;  $q_n = 1 - \frac{K}{3} \rho \omega_n^2 R^2 (1 + i\delta)$  – резонансный множитель.

Интегрируя выражение (3.9) по пространству, получим

$$\frac{d|P_{\pm}|^2}{d\Omega^*} = \left(\frac{\varepsilon}{\rho c^2}\right)^2 \frac{1}{4} \left(P_c \frac{L_c}{l}\right)^2 (P_n L_n)^2 \left(\frac{\rho \omega_n^2 R^2 K}{3q_n}\right)^2 \times$$

$$\times (K_n R)^n \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{2K_c \sin \frac{\theta}{2}}, \quad \theta > \sqrt{\frac{\alpha_n}{K_c}} \\ \frac{1}{2\alpha_n}, \quad \theta < \sqrt{\frac{\alpha_n}{K_c}} \end{array} \right\}, \quad (3.10)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент пространственного затухания на частоте сигнала накачки;  $K_c$  – волновое число для НЧ сигнала;  $R$  – размеры различных рассеивателей звука.

В случае наличия резонансных включений с монотонной функцией распределения  $g(R)$  выражение (3.10) следует дополнительно проинтегрировать по  $g(R)$ . Тогда имеем

$$\frac{d|P_{\pm}|^2}{d\Omega^*} = \frac{1}{36} \left( \frac{\varepsilon}{\rho c^2} \right)^2 \left( P_c \frac{L_c}{1} \right)^2 (K_H R_0)^2 \frac{g_H R_0}{\delta_H} \times \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\pi}{2K_c \sin \frac{\theta}{2}}, & \theta > \theta^* \\ \frac{1}{2\alpha_H}, & \theta < \theta^* \end{array} \right\}, \quad (3.11)$$

где  $\theta^* = \sqrt{\alpha_H / K_c}$ ;  $R_0$  – размеры резонансных рассеивателей.

Важным обстоятельством является то, что в выражения (3.9)–(3.11) входит параметр нелинейности среды  $\varepsilon$ , который, в свою очередь, зависит от концентрации рассеивателей звука (приповерхностный пузырьковый слой, глубинный и придонный биологические звукорассеивающие слои) и может существенно превосходить значения  $\varepsilon_0$  для однородной среды.

Для оценки адекватности разработанной физико-математической модели РППА введем коэффициент  $B_{\pm}$ , характеризующий эффективность нелинейного рассеяния на комбинационной частоте по отношению к линейному рассеянию на частоте накачки:

$$B_{\pm} = \sqrt{2\pi} K P_c \frac{3\gamma + 2}{3} \left[ 1 + \frac{9}{4(3\gamma + 2)^2} \left( \frac{\Omega}{\omega_H} \right)^2 \frac{g_c R_c^3 \delta_H}{g_H R_H^3 \delta_c} \right], \quad (3.12)$$

где  $R_c = \sqrt{\frac{3}{K} \frac{1}{\Omega}}$ ;  $R_H = \sqrt{\frac{3}{K} \frac{1}{\omega_H}}$  – резонансные размеры рассеивателей звука на частотах НЧ и ВЧ сигналов;  $P_c$  – амплитуда звукового давления НЧ сигнала в точке расположения РППА;  $\omega_H$ ,  $\Omega$  – частоты ВЧ накачки и НЧ сигнала;  $R_H$ ,  $R_c$  – размеры рассеивателей звука на частотах накачки и сигнала;  $\delta_H$ ,  $\delta_c$  – коэффициенты затухания на частотах накачки и сигнала;  $g_H$ ,  $g_c$  – функции распределения рассеивателей по размерам на частотах ВЧ накачки и НЧ сигнала.

Формула (3.12) упрощается в 2 предельных случаях, когда:

- основной вклад в рассеяние на комбинационной частоте вносят рассеиватели, резонансные на частоте накачки  $\omega_H$ , совпадающей с комбинационными частотами  $\omega_{\pm}$ ;
- основной вклад в рассеяние вносят рассеиватели, резонансные на частоте полезного сигнала  $\Omega$ .

Применительно к РППА имеем

$$B_{\pm} \cong \sqrt{2\pi} K P_c \left( \frac{\omega_H}{\Omega} \frac{g_c}{g_H} \frac{\delta_H}{\delta_c} \right)^{1/2}, \quad (3.13)$$

где  $K$  – сжимаемость среды,  $K = 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ .

Оценим величину  $B_{\pm}$ , используя типовые значения частот и уровней звукового давления волн НЧ сигнала и ВЧ накачки.

Пусть частоты НЧ полезного сигнала и ВЧ накачки соответственно равны  $\Omega = 1$  кГц и  $\omega_n = 64$  кГц, уровень аддитивной помехи на частоте накачки в полосе 1 Гц при ненаправленном приеме –  $6 \cdot 10^{-5}$  Па, уровень помехи в диапазоне НЧ сигнала –  $7,8 \cdot 10^{-3}$  Па, диаметры излучателя сигнала накачки и приемного элемента РППА (преобразователи поршневого типа) – 0,06 м. Амплитуда звукового давления комбинационной составляющей, с учетом приведения звукового давления волн в точку рассеяния накачки, составляет  $3,8 \cdot 10^{-3}$  Па, а расстояние затухания  $L_{\text{зат}} = 108$  м. Тогда

$$B_{\pm} \cong 10^{-5} \cdot 0,3(64 \cdot 10^3 \cdot 10)^{1/2} \cong 0,3 \cdot 10^{-5} \cdot 8 \cdot 10^2 \cong 2,4 \cdot 10^{-3}.$$

Данная величина хорошо согласуется с оценочными значениями, полученными с использованием выражения (3.13). На качество приема сигналов в РППА будут влиять два вида помех: аддитивные помехи воздействуют на приемный тракт и представляют собой шумы, обусловленные влиянием носителя антенны, блока обработки сигналов, а также акустических и гидрофизических характеристик водной среды; мультипликативные помехи возникают вследствие нелинейного взаимодействия акустических волн ВЧ накачки и измеряемого НЧ сигнала. Рассмотренные в разделе физико-математические разработки завершились созданием и реализацией в корабельных средствах параметрических реверберационных антенн [133 – 137].

### **3.4. Методы повышения эффективности применения реверберационной приемной параметрической антенны**

Один из путей повышения помехоустойчивости РППА связан с многоканальной пространственно-временной обработкой ВЧ модуляционного процесса (рис. 3.1).

Сущность разработанного метода, применительно к условиям многолучевого распространения НЧ полезного сигнала, иллюстрируется на рис. 3.1 и заключается в следующем.

С помощью генератора 1, усилителя мощности 2, блока согласования 3 и излучателя 4 формируется, усиливается не направленно, в том числе и встречно НЧ многолучевому сигналу  $\Omega$ , излучается ВЧ сигнал накачки на частоте  $\omega_n$ , близкой к резонансной частоте рассеивателей звука  $\omega_0$ , доминирующих в области взаимодействия акустических волн. Рассеиваясь на неоднородностях водной среды, ВЧ волна накачки взаимодействует с НЧ многолучевой волной с образованием волн комбинационных частот  $\omega_n \pm \Omega$ .

В многоэлементной приемной антенне 5 осуществляется пеленгование наиболее «энергонесущих» (с наибольшим соотношением С/П) акустических лучей. В основном усилителе 6 гидроакустического средства (ГАС) наблюдения с РППА осуществляется усиление ВЧ модуляционных сигналов  $\omega_n \pm \Omega$ . В блоках 7, 8, 9 производится формирование и осуществляется независимое электронное сканирование в вертикальной плоскости нескольких (трех на рис. 3.1) ХН антенны. В дальнейшем, при помощи полосовых фильтров 10, 13, 16, соответствующих им амплитудных детекторов с большим динамическим диапазоном 11, 14, 17 и усилителей НЧ 12, 15, 18 осуществляется выделение НЧ полезного сигнала  $\Omega$  из ВЧ модуляционного процесса  $\omega_n \pm \Omega$  методом детектирования по трем пространственным каналам. Затем благодаря соответствующим линиям задержки 19, 20 на сумматоре 21 осуществляется синфазное сложение НЧ сигналов.

Таким образом, при помощи высокой пространственной избирательности РППА может осуществлять прием отдельных лучей (или групп лучей). В этом случае выигрыш в помехоустойчивости, по сравнению с одноканальной обработкой, достигается за счет различия законов суммирования сигнала и помехи при их усреднении.

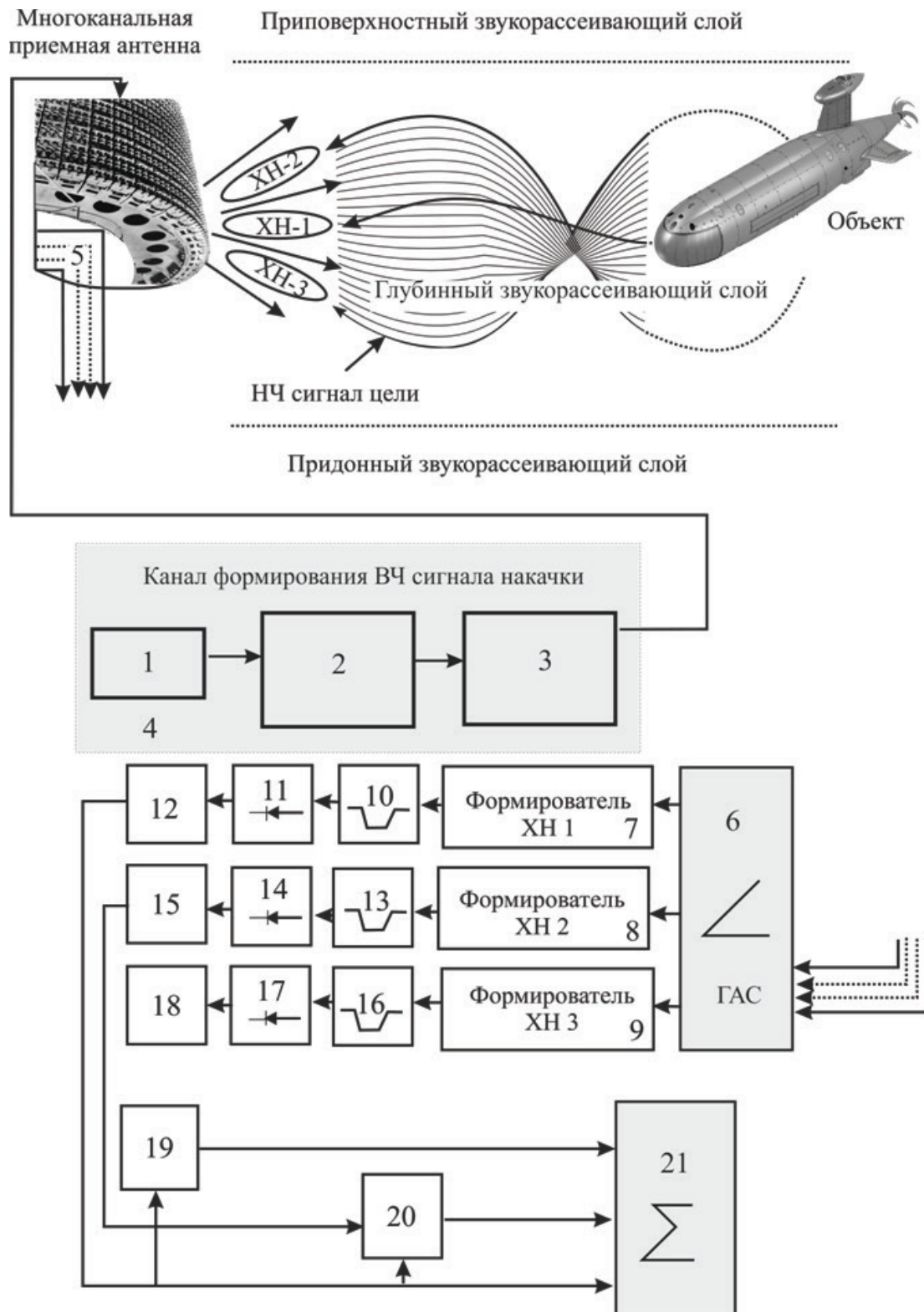


Рис. 3.1. Структурная схема ППА «реверберационного» типа с многоканальной пространственной обработкой принимаемых (модулированных) сигналов накачки

Сигнал практически во всех случаях оказывается полностью когерентным, в то время как помеха ведет себя либо как некогерентная, либо как частично когерентная. На выходе суммирующего устройства получим

$$Q = m\gamma_c \frac{S_0^2}{N_0^2},$$

где  $m$  – число каналов;  $\gamma$  – коэффициент корреляции по сигналу;  $\frac{S_0}{N_0}$  – соотношение сигнал/помеха.

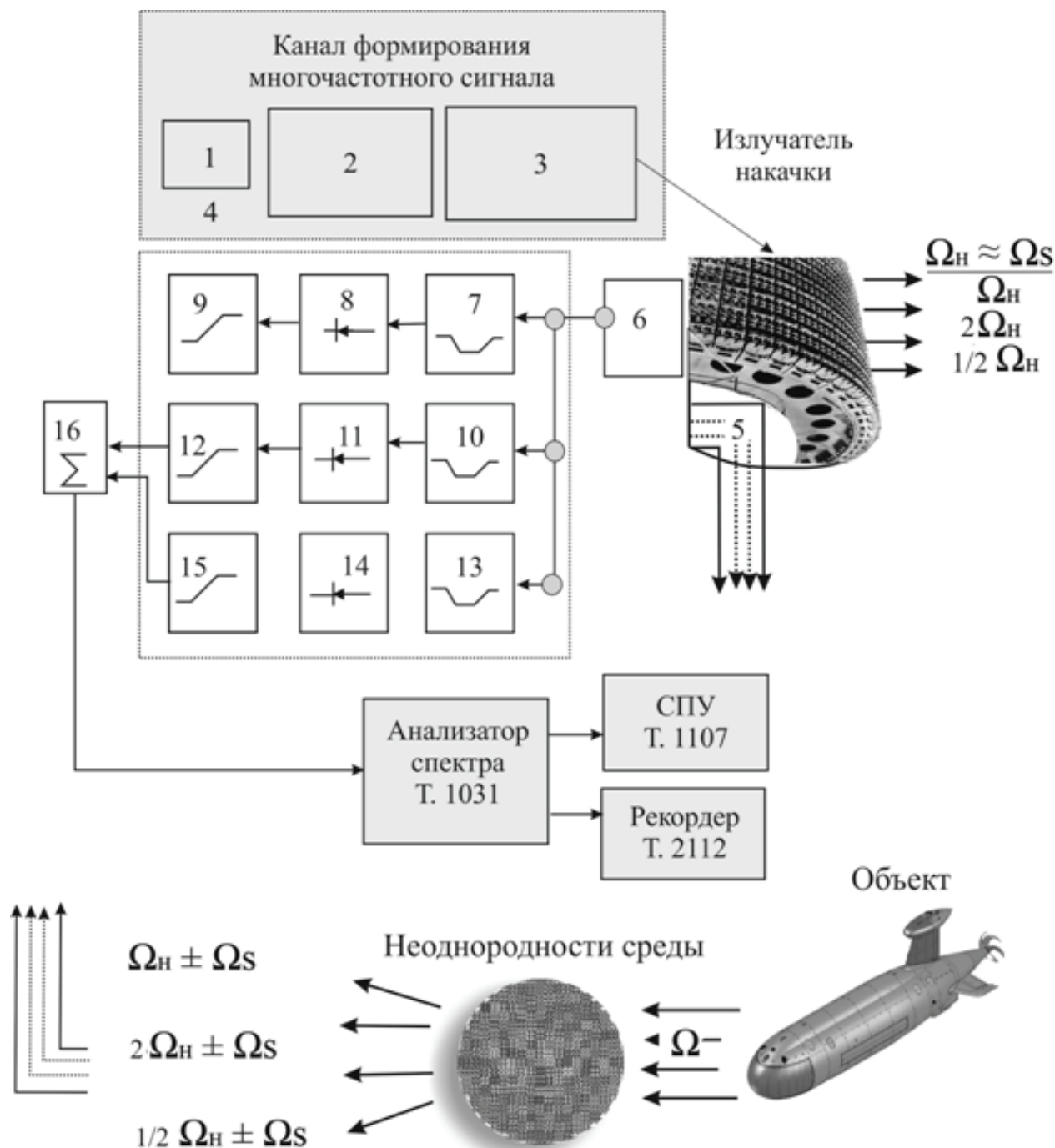
Экспериментальным путем установлено, что в случае применения РППА с тремя ХН, ориентированными определенным образом в вертикальной плоскости, в реальных гидроакустических условиях выигрыш в помехоустойчивости, по сравнению с одноканальной обработкой сигнала, составлял величину 6...8 дБ.

Указанный выше метод может быть успешно применен при реализации разнесенного в пространстве научно-исследовательского судна (НИС) с РППА и буксируемого за НИС устройства с РППА, при многоканальном параметрическом приеме НЧ сигнала, сформированного и излученного ранее при помощи ПИ и отраженного от дна. Добиться эффективного подавления акустических помех мультипликативного характера можно за счет использования многочастотного ВЧ сигнала накачки  $\omega_n$ . С этой целью предлагается следующий способ повышения эффективности применения РППА, сущность которого иллюстрируется на рис. 3.2 и заключается в следующем.

С помощью генератора 1, усилителя 2, блока согласования 3 и излучателя 4 формируется, усиливается не направленно, в том числе и встречно НЧ полезному сигналу  $\Omega$ , излучается ВЧ сигнал накачки на частоте  $\omega_n$ , ее второй гармонике ( $2\omega_n$ ) и субгармонике ( $1/2\omega_n$ ). При этом базовая частота ВЧ сигнала накачки  $\omega_n$  соответствует резонансной частоте  $\omega_0$  рассеивателей звука (приповерхностный пузырьковый слой, глубинный и придонный биологические звукорассеивающие слои), доминирующих в области взаимодействия акустических волн. Рассеиваясь на неоднородностях водной среды многочастотный ВЧ сигнал накачки взаимодействует с НЧ полезным сигналом с образованием волн на комбинационных частотах:  $\omega_n \pm \Omega$ ;  $2\omega_n \pm \Omega$  и др. В многоэлементной приемной антенне 5 осуществляется пеленгование, а в основном усилителе 6 – усиление ВЧ модуляционных сигналов на соответствующих частотах.

В дальнейшем, при помощи полосовых фильтров 7, 10, 13, соответствующих им амплитудных детекторов с большим динамическим диапазоном 8, 11, 14 и усилителей НЧ 9, 12, 15 осуществляется выделение НЧ полезного сигнала  $\Omega$  из ВЧ модуляционного процесса методом детектирования по трем частотным каналам (рис. 3.2) с последующим синфазным сложением НЧ сигнала на сумматоре 16.

При проведении экспериментальных исследований обычно использовались три компоненты ВЧ сигнала накачки:  $1/2\omega_n$ ,  $\omega_n$  и  $2\omega_n$ . В этом случае выигрыш в помехоустойчивости РППА находился в пределах 3...5 дБ по сравнению с одноканальной обработкой сигнала. Предварительными исследованиями показано, что добиться более значительного повышения коэффициента помехоустойчивости РППА возможно за счет одновременной многоканальной и многочастотной обработки ВЧ модуляционных процессов.



Взаимное расположение антенны и объекта поиска

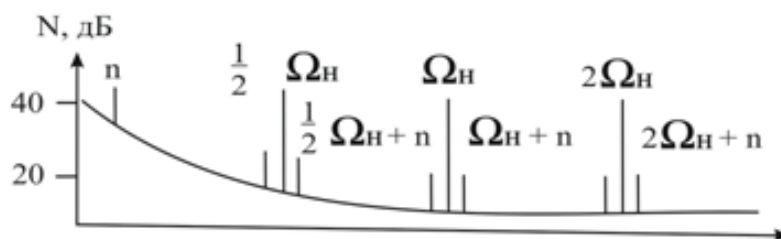


Рис. 3.2. Структурная схема ППА «реверберационного» типа с многоканальной частотной обработкой принимаемых (промодулированных) сигналов накачки

Повышение помехоустойчивости РППА по отношению к аддитивным помехам может производиться по следующим направлениям: снижение спектральной плотности акустической помехи в заданном диапазоне частот; усиление (в том числе искусственным путем) глубины модуляции при взаимодействии акустических волн в нелинейной среде и др.

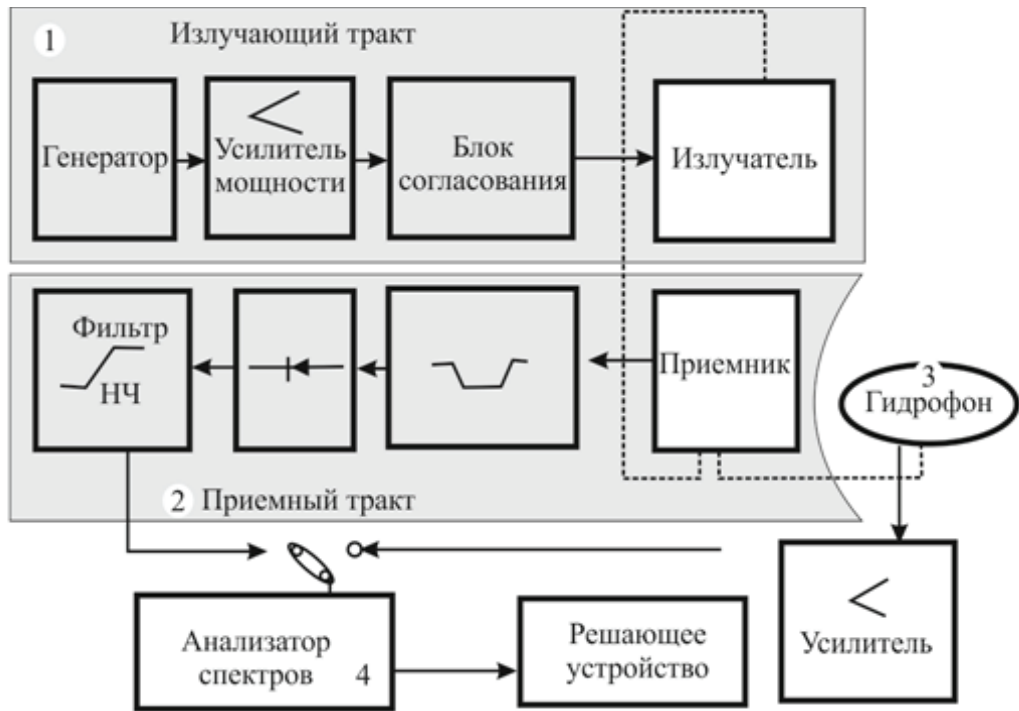
Как уже отмечалось ранее, при определенных условиях ВЧ компоненты комбинационных частот могут быть замаскированы собственной помехой ППА, обусловленной интермодуляционными искажениями в электронной аппаратуре. Данный вид мешающего воздействия является специфическим для всех видов параметрических антенн и вносит наибольший вклад в суммарный уровень помех. В данное время с целью борьбы с «паразитной» модуляцией применяются методы, исключающие попадание на вход приемного тракта ППА воздействия на частоте  $\Omega$ . Это достигается путем включения на вход приемного элемента ППА фильтра верхних частот. Данный способ позволяет свести к минимуму взаимодействие в электронной аппаратуре, но не исключает паразитное взаимодействие на приемном преобразователе ППА за счет нелинейных свойств пьезокерамики.

Предлагается использовать фильтрующие свойства преобразователей, применяемых в качестве приемного элемента ППА, которые имеют в своей амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) ВЧ резонансы. Излучение ВЧ волны накачки  $\omega_n$  на одной или нескольких, резонансных частотах позволит избавиться от воздействия прямого НЧ сигнала  $\Omega$  уже на входе ППА, в то время как ВЧ сигнал накачки  $\omega_n$  и его комбинационные частоты  $\omega_n \pm \Omega$  будут поступать в схему обработки беспрепятственно.

Полученные экспериментальные результаты подтвердили высокую эффективность разработанного метода и позволили на 4...6 дБ повысить помехоустойчивость РППА. Для корректного измерения параметров НЧ полезного сигнала  $\Omega$ , непосредственного в процессе функционирования РППА, разработан следующий способ градуировки РППА с трактом обработки сигналов. С помощью излучающего тракта 1 формируется и в непосредственной близости от приемного элемента тракта 2 РППА излучается НЧ калибровочный сигнал на частоте  $\Delta\Omega$  (рис. 3.3, а). Величину  $\Delta\Omega$  выбирают такой, чтобы разность  $\Omega - \Delta\Omega$  укладывалась в пределах резонансной кривой АЧХ приемного элемента РППА с учетом того, что частота соответствует резонансу. Уровень излучения, контролируемый с помощью измерительного гидрофона 3, устанавливают таким образом, чтобы развиваемое на поверхности приемного элемента РППА звуковое давление отвечало соответствующему параметру на выходе гидрофона. На выходе фильтра НЧ, являющегося выходом приемного тракта 2, сравнивают амплитуды дискретных составляющих (ДС) на частотах  $\Omega$  и  $\Omega - \Delta\Omega$ . Если амплитуда ДС на частоте  $\Omega$  больше соответствующей величины на частоте  $\Omega - \Delta\Omega$  (рис. 3.3, в), то делают вывод о том, что принятый сигнал на частоте  $\Omega$  носит акустический характер.

В противном случае (рис. 3.3, г) считают, что принятый сигнал  $\Omega$  имеет электромагнитное происхождение и принимают меры для устранения «паразитной» модуляции в блоке обработки сигналов: изменяют частоту и уровень звукового давления [137, 141, 142].

Преимуществом данного метода является высокая точность калибровки РППА, определяемая точностью считывания информации с экрана анализатора спектров сигналов 4 и уровнем боковых компонент  $\omega_n \pm \Omega$  (рис. 3.3 б), возникающих при взаимодействии ВЧ волн накачки  $\omega_n$  и НЧ калибровочного сигнала  $\Omega - \Delta\Omega$ . Кроме того, достигается возможность определения уровня собственных помех РППА в процессе ее функционирования.



а) Структурная схема системы параметрического приема сигналов с устройством определения уровня «паразитной» модуляции

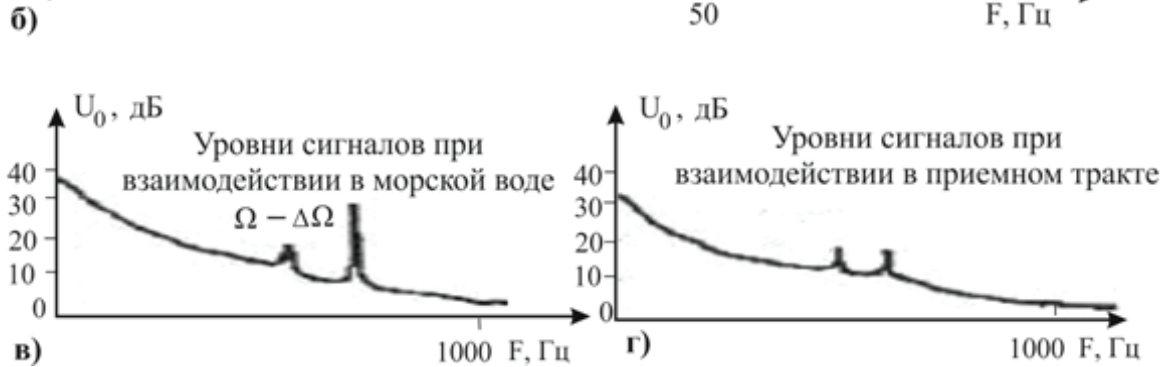
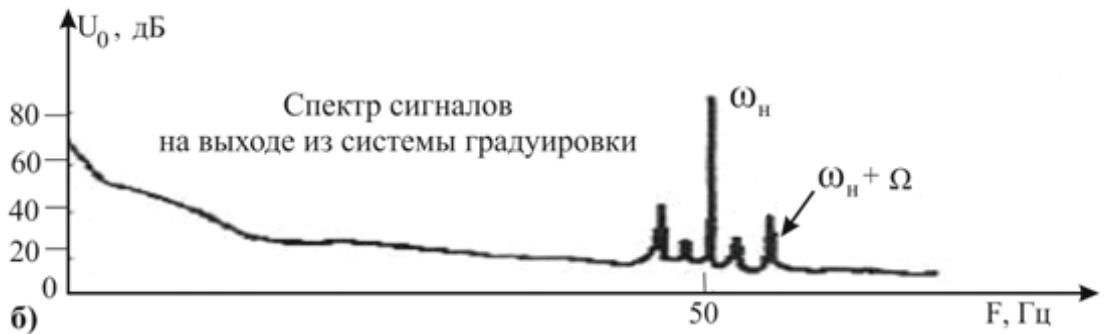


Рис. 3.3. Способ и система градуировки параметрической приемной антенны «реверберационного» типа

Как уже отмечалось ранее, в параметрическом режиме работы ГАС используется большинство основных приборов шумопеленгатора, функционирующего в обычном (линейном) режиме работы. В этой связи для более полного использования потенциальных возможностей ГАС разработано устройство, совмещающее режимы параметрического и линейного приема широкополосных гидроакустических излучений.

На рис. 3.4 представлена структурная схема комбинированной системы, позволяющей более эффективно использовать преимущества параметрического режима работы в



инфразвуковом (до 20 Гц) диапазоне (ИЗД) частот и линейного режима работы в звуковом (выше 2 кГц) диапазоне частот. Другими словами, в данном устройстве достоинства РППА компенсируют недостатки линейной антенны и наоборот.

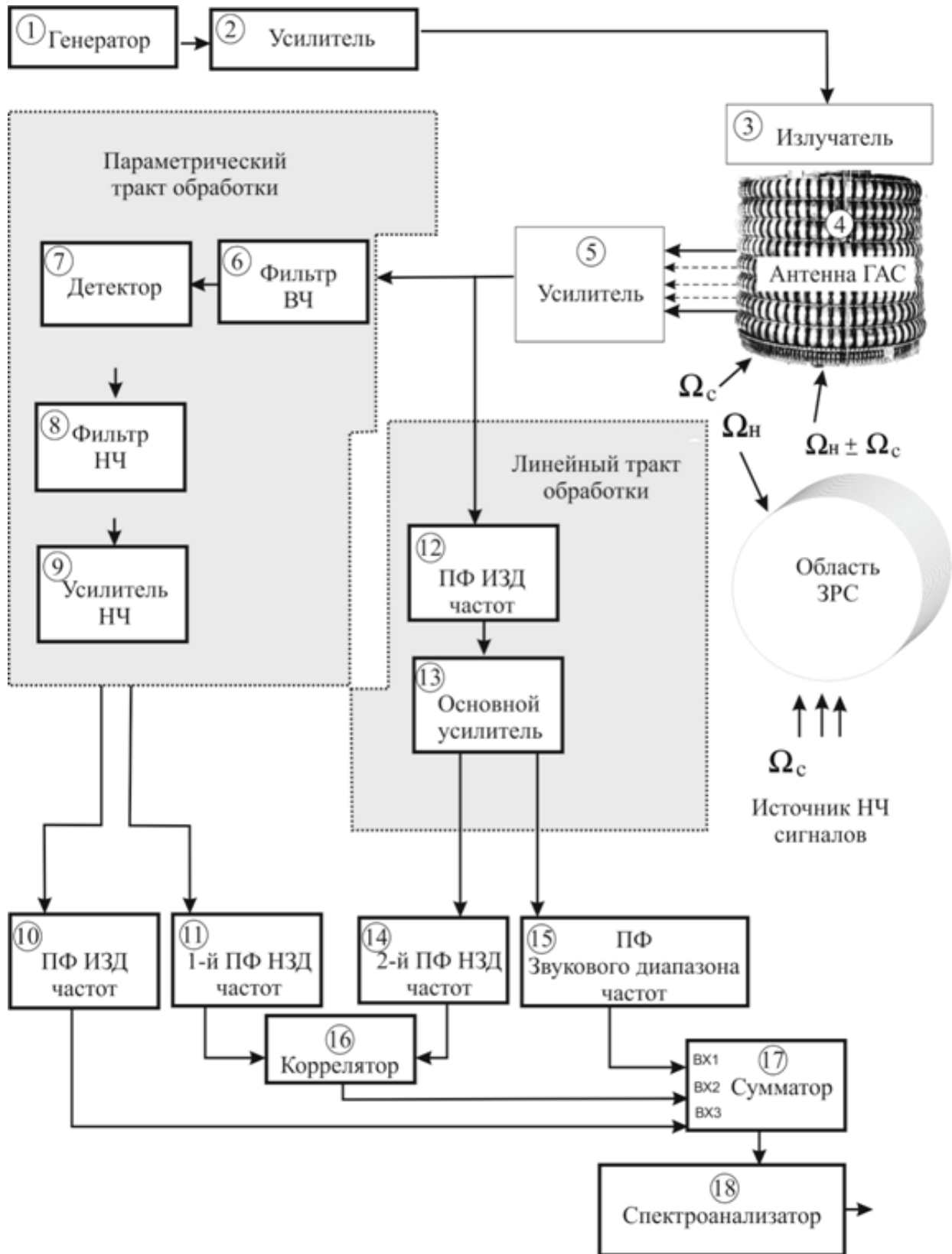


Рис. 3.4. Структурная схема комбинированной (линейной и параметрической) гидроакустической системы приема информационных волн низкой частоты

При этом в диапазоне частот от 16 Гц до 2 кГц используются режимы параметрической или линейной обработки сигналов в зависимости от помех и гидролого-акустических условий в данном районе.

Применительно к задачам морской геофизики устройство функционирует следующим образом. С помощью генератора 1, усилителя 2 и излучателя 3 формируется, усиливается и излучается на частоте  $\omega_n$  ВЧ сигнал накачки встречно отраженному от дна НЧ полезному сигналу  $\Omega$ , ранее сформированному и излученному при помощи ПИ. При этом частота ВЧ сигнала накачки  $\omega_n$  соответствует резонансной частоте  $\omega_0$  рассеивателей звука, доминирующих в области взаимодействия акустических волн (приповерхностный пузырьковый слой, биологические приповерхностные, глубинные и придонные слои). Рассеиваясь на неоднородностях водной среды, ВЧ волна накачки взаимодействует с НЧ волной с образованием волн на комбинационных частотах  $\omega_n \pm \Omega$ . В многоэлементной приемной антенне 4 осуществляется пеленгование, а в усилителе 5 – усиление сигналов. При помощи фильтра ВЧ 6, амплитудного детектора 7 с большим динамическим диапазоном, фильтра НЧ 8 и усилителя НЧ 9 осуществляется выделение НЧ полезного сигнала  $\Omega$  из ВЧ модуляционного процесса методом детектирования.

В дальнейшем НЧ сигнал поступает на вход полосового фильтра (ПФ) ИЗД частот 10 и на 1-й полосовой фильтр низкого звукового диапазона (НЗД) частот 11. С выхода последнего НЧ сигнал поступает на 1-й вход коррелятора 16. Одновременно с этим с выхода усилителя 5 НЧ сигнал, не подвергнутый нелинейной обработке, поступает на вход полосового фильтра 12 и далее на основной усилитель 13. С выхода последнего НЧ сигнал поступает на 2-й полосовой фильтр НЗД частот 14 и далее на 2-й вход коррелятора 16, а параллельно – на полосовой фильтр звукового диапазона частот 15. На сумматоре 17 осуществляется сложение сигналов в широком диапазоне частот, а в блоке 18 – его анализ [140 – 144].

Следует заметить, что параметрический и линейный режимы работы системы не оказывают отрицательного влияния друг на друга.

*В третьей главе:*

– рассмотрена физика процессов формирования нелинейных свойств морской среды и выявлены следующие закономерности. Наличие в морской среде и донных осадках фазовых включений приводит к возникновению новых физических закономерностей, связанных с распространением, рассеянием и взаимодействием акустических волн. Интенсивность реверберации ВЧ непрерывного сигнала накачки в РППА, нелинейность среды, плотность и скорость звука в ней являются взаимосвязанными и частотно-зависимыми величинами, которые могут превосходить свои средние значения [147, 148];

– показано, что процесс взаимодействия акустических волн в неоднородных средах открывает возможность разработки новых способов излучения и приема НЧ акустических сигналов с помощью параметрических антенн. Наиболее перспективной является параметрическая приемная антенна «реверберационного» типа, использующая в процессе функционирования непрерывный ВЧ сигнал накачки на частотах, близких к резонансным частотам рассеивателей звука, доминирующих в прилегающей к антенне области среды. Исходя из современного состояния теории нелинейной гидроакустики, становится очевидной возможность разработки эффективных активно-пассивных параметрических гидролокаторов, использующих информацию, содержащуюся в гидрофизических полях, при исследовании характеристик морской среды;

– экспериментальными исследованиями показано, что добиться значительного повышения коэффициента помехоустойчивости РППА возможно за счет одновременной многоканальной и многочастотной обработки ВЧ модуляционных процессов. Повышение помехоустойчивости РППА по отношению к аддитивным помехам может производиться по следующим направлениям: снижение спектральной плотности акустической помехи в заданном диапазоне частот; усиление (в том числе искусственным путем) глубины модуляции при взаимодействии акустических волн в нелинейной среде [149].

При определенных условиях ВЧ компоненты комбинационных частот могут быть замаскированы собственной помехой ППА, обусловленной модуляционными искажениями в электронной аппаратуре. Такой вид воздействия является специфическим для всех видов параметрических антенн и вносит наибольший вклад в суммарный уровень помех. Для борьбы с «паразитной» модуляцией могут применяться методы, исключающие попадание на вход приемного тракта ППА воздействия на частоте  $\Omega$ . Это достигается путем включения в приемный тракт фильтра верхних частот. Данный способ позволяет свести к минимуму взаимодействие волн в электронной аппаратуре, но не исключает паразитное взаимодействие волн на приемном преобразователе ППА, возникающее за счет нелинейных свойств материала пьезокерамики.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

### 4.1. Общая методика проведения исследований

В качестве критериев оценки нелинейного взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды (в отличие от волн конечной амплитуды – для КППА и ЛППА), лежащих в основе функционирования РППА, были выбраны:

– превышение индекса модуляции, обусловленного взаимодействием акустических волн ВЧ накачки и НЧ сигнала в нелинейной водной среде по сравнению с уровнем «паразитной» модуляции, обусловленной взаимодействием электрических сигналов ВЧ накачки и НЧ сигналов в приемном тракте (главный критерий);

– выигрыш в направленности РППА по сравнению с линейной антенной, обладающей аналогичными волновыми размерами, что и РППА;

– выигрыш в помехоустойчивости РППА по сравнению со значением данного показателя на выходе линейной антенны.

Общая методика проведения исследований заключалась в измерении перечисленных выше параметров:

– в различных географических районах, а также в зависимости от времени года и суток для одного и того же района;

– в зависимости от гидрофизических условий среды (пресная или морская вода; вода, насыщенная пузырьками воздуха или без них; вода с различной температурой, нелинейностью, электропроводимостью и др.);

– при изменении протяженности области нелинейного взаимодействия – акустических волн ВЧ накачки и НЧ сигнала;

– в зависимости от геометрии (взаимного расположения излучателя ВЧ накачки и приемного элемента антенны) построения РППА;

– в зависимости от параметров (частота, амплитуда звукового давления, форма сигнала и др.) ВЧ сигнала накачки и НЧ полезного сигнала;

– в зависимости от способа выделения НЧ сигнала из ВЧ волн комбинационных частот (фазовая или амплитудная демодуляции);

– при подаче электрического аналога ВЧ сигнала накачки на вход предварительных усилителей ГАС при наличии акустического НЧ сигнала;

– при излучении калибровочного НЧ сигнала в непосредственной близости от приемного элемента РППА и др.

Методика измерений параметров НЧ сигнала заключалась в том, что по максимальному методу производилось пеленгование его источника, а затем осуществлялась синхронная запись процессов на выходе параметрического и линейного трактов ГАС, а также на выходе измерительного гидрофона, размещенного в непосредственной близости от РППА. Запись производилась на компьютер с предварительным преобразованием аналогового сигнала в цифровой или измерительный магнитофон (аналоговый или цифровой).

Обработка информации включала в себя вывод временных зависимостей уровня НЧ сигнала и НЧ помехи на выходе РППА, линейной антенны и гидрофона, получаемых путем настройки узкополосного фильтра на частоту сигнала и помехи.

Измерения ХН линейной антенны и РППА производились путем сканирования в горизонтальной и вертикальной плоскости электрическим (с помощью линий задержки) или механическим (поворотом антенны) способом.

Измерения коэффициентов помехоустойчивости антенн производились с помощью анализатора спектров типа «2031» фирмы «Брюль и Кьер» путем осреднения по ансамблю уровней сигнала и помехи в фиксированные моменты времени на выходах РППА и линейной антенны с аналогичными волновыми размерами, а также измерительного гидрофона.

## **4.2. Результаты исследований характеристик реверберации морской среды при непрерывном излучении высокочастотного сигнала**

Методика экспериментальных исследований реверберации при непрерывном излучении ВЧ волны накачки включала в себя измерение и расчет на ЭВМ характеристик направленности излучателя накачки и приемного элемента РППА, оценку эффективности гидроакустического экрана и аналитический расчет амплитуды звукового давления ВЧ волны на комбинационной частоте. В дальнейшем производилась сравнительная оценка экспериментально полученных результатов с расчетными значениями для различных значений параметров ВЧ накачки и НЧ сигнала.

Совокупность параметров рассеивателей звука можно условно разделить на две группы. К первой относятся: коэффициент обратного рассеяния, сила слоя и резонансная частота, являющаяся переменной величиной не только для определенного географического района, но и для сезона года, времени суток, горизонтов расположения источника и приемника звука. Ко второй группе, определяющей положение биологического звукорассеивающего слоя (ЗРС) в толще вод и закономерности его изменения, относятся: пространственная протяженность слоя, глубина его залегания и др.

Проведенными теоретическими, модельными и экспериментальными исследованиями в натуральных условиях было установлено, что необходимым условием для регистрации эффекта взаимодействия акустических волн в неоднородной морской среде является наличие звукорассеивающих слоев (приповерхностный пузырьковый слой, приповерхностный, глубинный или придонный биологические ЗРС) в области взаимодействия акустических волн ВЧ накачки и НЧ сигнала, удаленной от РППА на расстояние (десятки-сотни метров), с которого может быть принят рассеянный ВЧ сигнал накачки. При этом характерными объектами рассеяния звука в диапазоне частот единиц килогерц являются рыбы; в диапазоне частот десятки килогерц – пузырьки воздуха, образующиеся в приповерхностном слое за счет ветрового волнения моря; в более высокочастотном диапазоне (сотни килогерц) – продукты жизнедеятельности биологических объектов.

На рис. 4.1 иллюстрируются структурные схемы параметрических приемных и излучающих антенн, используемых для акустической спектроскопии рассеивателей звука и определения параметра нелинейности морской среды. Напомним, что КППА (рис. 4.1, а) представляет собой два жестко связанных ненаправленных ВЧ акустических преобразователей «И» и «П», разнесенных на некотором расстоянии в пространстве L. Принцип действия КППА основан на изменении фазы ВЧ колебаний волны накачки  $\omega_n$ , сформированных и излучаемых с использованием линии приборов, включающей гене-

ратор (Г), усилитель мощности (УМ) и излучатель (И). Работа КППА проходит при одновременном воздействии НЧ волны полезного сигнала  $\Omega$ . При этом, обработка ВЧ волн комбинационных частот в простейшем случае осуществляется с помощью последовательно электрически соединенных: усилителя ВЧ (УВЧ), полосового фильтра (ПФ), фазового детектора (ФД), усилителя НЧ (УНЧ) и анализатора спектров (СА).

Достоинствами КППА являются широкая полоса и небольшие волновые размеры излучателя ВЧ волны накачки и приемника ВЧ волн комбинационных частот. Основными недостатками КППА являются: низкая помехоустойчивость и недостаточная пороговая чувствительность, обусловленные использованием ненаправленных акустических преобразователей; необходимость применения сложной аппаратуры обработки сигналов из-за использования в качестве ВЧ сигнала накачки акустической волны конечной амплитуды  $\omega_n$ ; невозможность размещения на корпусе подвижного носителя из-за больших (сотни метров) габаритов КППА при работе в НЧ диапазоне частот; большой уровень собственных помех работе КППА и невозможность его контроля в процессе функционирования антенны; невозможность обнаружения и пеленгования источника НЧ сигналов в диапазоне частот ниже 35 Гц.

Принцип действия ППА локационного типа (рис. 4.1, б) основан на использовании эффекта обратного нелинейного рассеяния звука. Как видно из рис. 4.1, а, б, схема обработки сигналов в КППА и ЛППА практически одинакова. И хотя преимущества ЛППА перед КППА очевидны, остаются не устраненными вышеуказанные недостатки подобных антенн. Стремление избавиться от принципиальных недостатков, присущих КППА и ЛППА, привело к предложению использовать в качестве «источника» накачки природные резонансные включения: пузырьки воздуха определенного размера в приповерхностном пузырьковом, а также в глубинном и придонном биологических звукорассеивающих слоях, облучаемые менее (на порядок) интенсивной (чем в КППА и ЛППА) ВЧ волной накачки с помощью направленного (за счет волновых размеров преобразователей, использования специальных гидроакустических экранов и др.) излучателя накачки, расположенного в непосредственной близости от приемного элемента антенны.

Принцип действия РППА в процессе непрерывного контроля уровня «паразитной» модуляции иллюстрируется на рис. 4.1, в и основан на нелинейном взаимодействии ВЧ накачки  $\omega_n$  и НЧ сигнала  $\Omega$  на резонансных включениях ЗРС – типа «газовый пузырек». При этом информация о НЧ полезном сигнале содержится в основном в изменении амплитуды ВЧ сигнала накачки. Обработка ВЧ волн комбинационных частот осуществляется с помощью последовательно электрически соединенных: УВЧ, перестраиваемого ПФ, амплитудного детектора (АД) с большим динамическим диапазоном. Основными достоинствами РППА (по отношению к ЛППА) являются: более высокие помехоустойчивость и пороговая акустическая чувствительность, обусловленные высоким ( $10^{-2} - 10^{-3}$ ) уровнем рассеянного в обратном направлении ВЧ сигнала накачки; использование простой аппаратуры обработки сигналов, из-за использования в качестве ВЧ накачки акустической волны относительно малой амплитуды; невысокий уровень собственных помех работе РППА и возможность его контроля непосредственно в процессе функционирования антенны; возможность обнаружения и пеленгования источника НЧ сигналов в диапазоне частот от долей герц до десятков килогерц.

Принцип действия параметрической излучающей антенны (ПИА) иллюстрируется на рис. 4.1, г и в простейшем случае заключается в следующем. С помощью генераторов Г1 и Г2 осуществляется формирование импульсных ВЧ сигналов на близких частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , а с помощью соответствующих усилителей мощности (УМ1 и УМ2) – их

усиление до необходимого уровня. В согласующем устройстве ( $\Sigma$ ) обеспечивается независимое излучение данных сигналов с помощью одного излучателя (И). В процессе совместного распространения, из-за нелинейности воды, ВЧ волны накачки начинают взаимодействовать друг с другом, при этом образуются волны на комбинационных частотах  $\omega_1 \pm \omega_2$ .

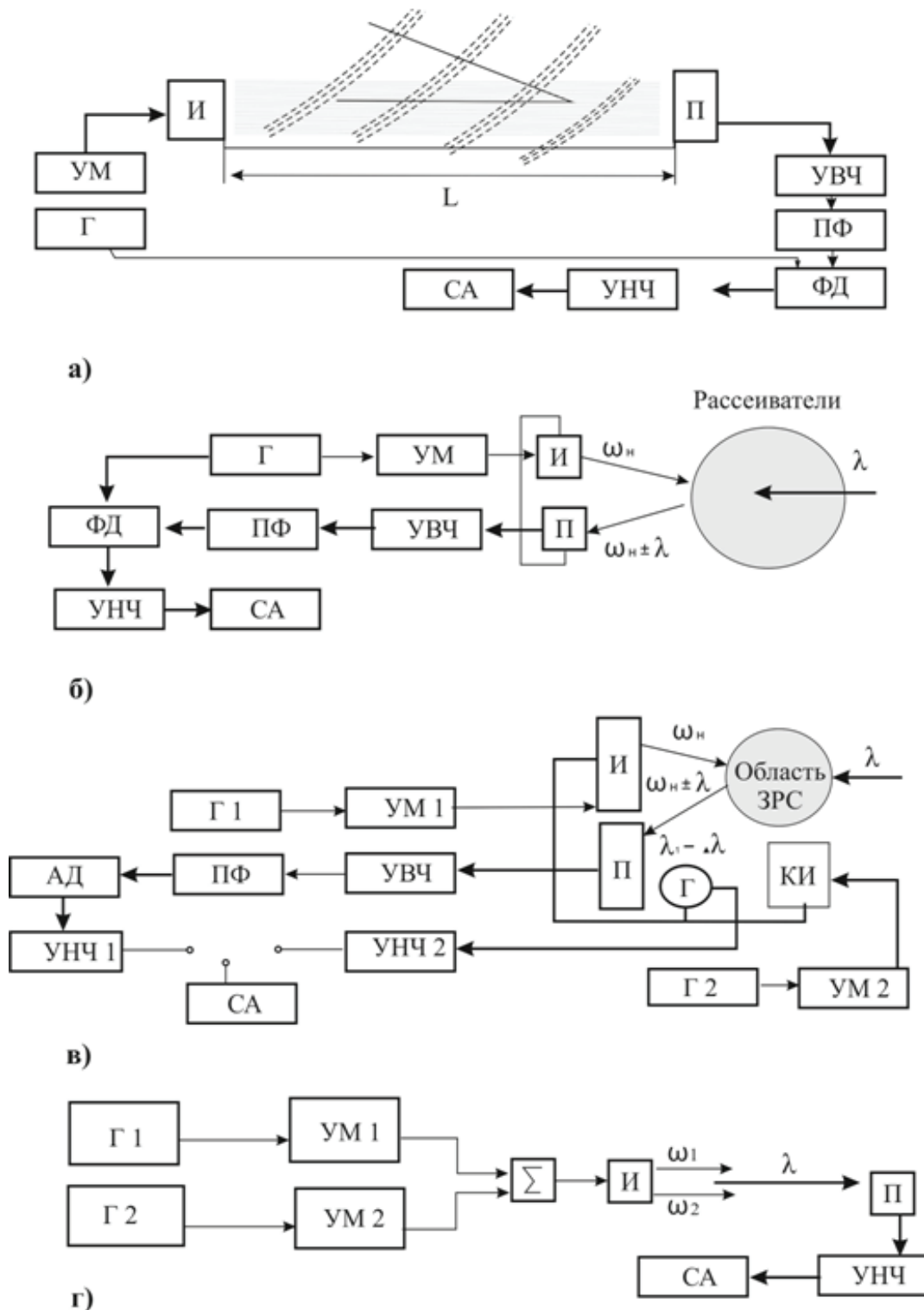


Рис. 4.1. Структурные схемы параметрических антенн:  
 а – приемная антенна классического типа; б – приемная антенна локационного типа;  
 в – приемная антенна реверберационного типа; г – излучающая антенна

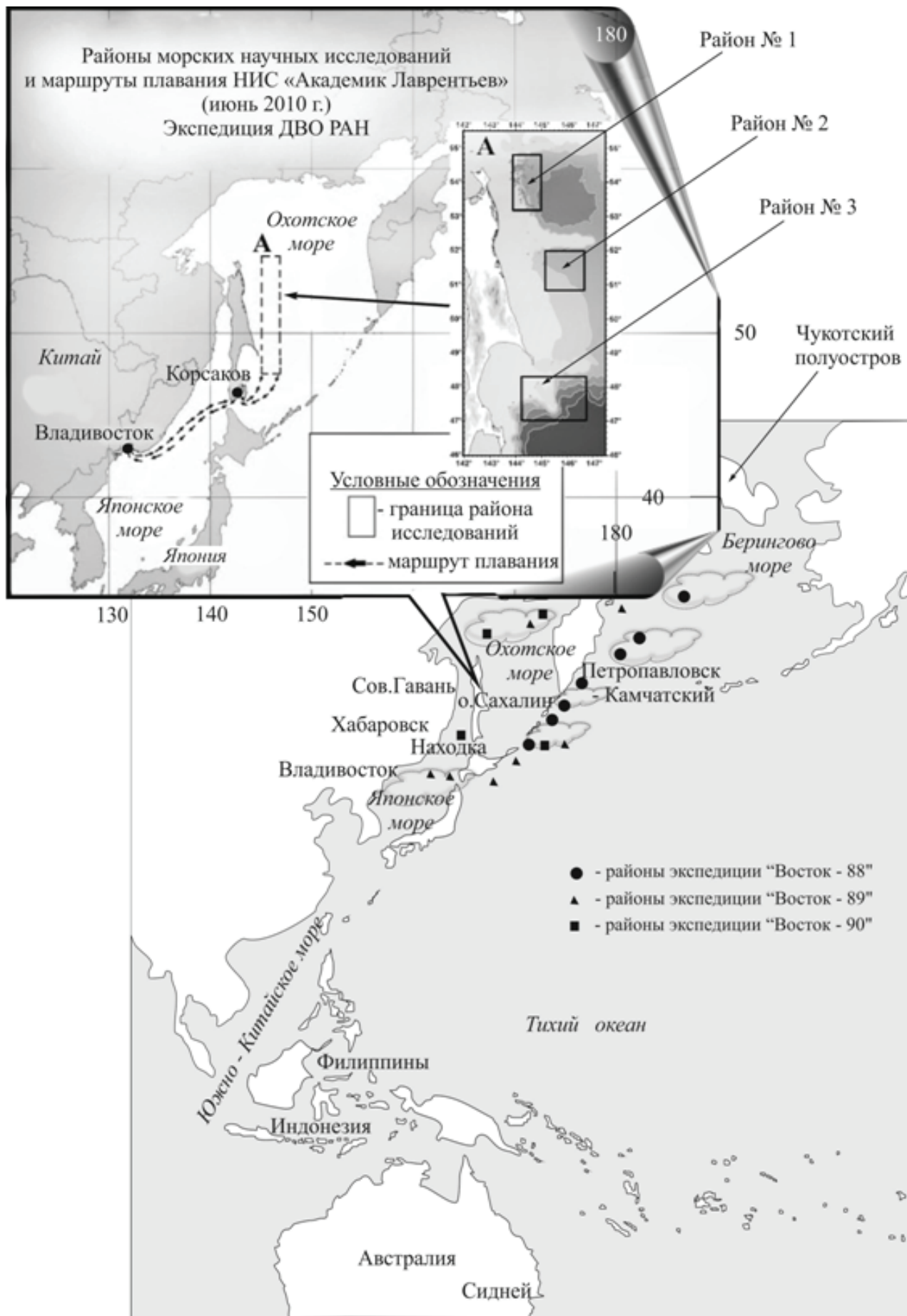


Рис. 4.2. Карта районов морских исследований



Возмущения на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$  являются высокочастотными, и они на определенном расстоянии от ВЧ источника сигнала накачки поглощаются водной средой, а НЧ волна разностной частоты  $\Omega$  продолжает распространяться на значительное расстояние. Основными достоинствами ПИА, являющейся уникальным инструментом при решении многих задач прикладной гидроакустики, в частности для определения параметра нелинейности морской среды и акустической спектроскопии рассеивателей звука, являются: широкополосность (2–3 октавы), отсутствие бокового излучения, незначительные габариты.

Проанализируем некоторые результаты экспериментальных исследований, полученных, в первую очередь, с использованием РППА.

На рис. 4.2 представлена географическая карта Тихоокеанского региона, на которой геометрическими фигурами «круг», «треугольник» и «квадрат» указаны районы проведения экспериментальных исследований в рамках научных экспедиций, сплошными и пунктирными линиями обозначены границы специальных районов, цифрами – условные номера этих районов. Как видно из рис. 4.2, научные экспедиции выполнялись в районах, представляющих собой интерес в морской геофизике.

В табл. 4.1 представлены данные, характеризующие повторяемость (в процентах) волнения моря силой не менее 3 баллов в указанных на рис. 4.2 географических районах. Эта информация очень важна с практической точки зрения. О влиянии газосодержания на нелинейность морской воды говорилось ранее при теоретическом обосновании некоторых положений нелинейной гидроакустики, и на это будет обращено внимание в дальнейшем, с точки зрения эффективного использования РППА в условиях подвижного носителя (НИС) для исследований морских осадков. Повторяемость волнения моря в районах – силой не менее 3 баллов.

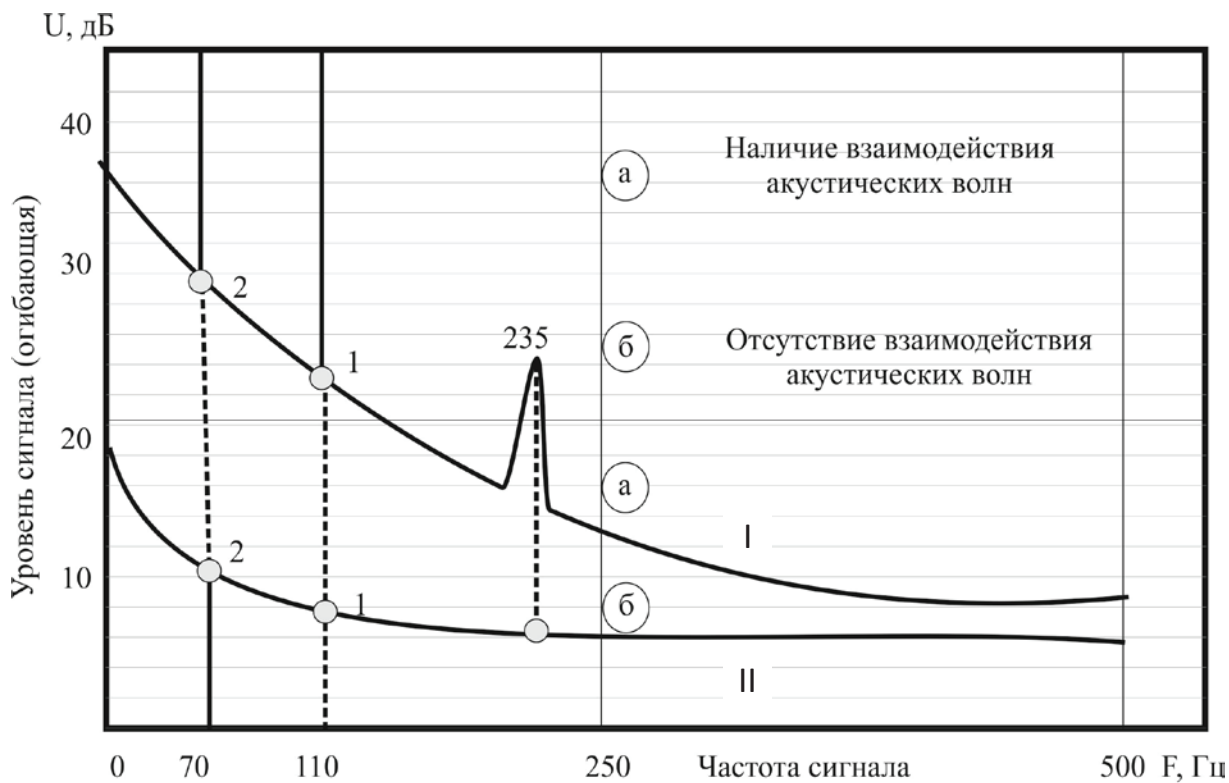
Таблица 4.1

Номер геогр. района	Период года			
	декабрь – апрель	май – июнь	июль – сентябрь	октябрь – ноябрь
1	92,50	82,75	62,50	79,75
2	93,50	92,50	73,75	88,75
3	94,00	78,50	79,75	79,75
4	85,00	85,00	76,25	85,00
5	Лед	81,25	62,50	62,50
6	81,25	88,65	80,25	90,25
7	81,25	82,75	62,50	81,25
8	96,25	86,50	70,00	88,75
9	89,50	94,75	85,00	88,75
10	86,50	96,25	70,00	88,75

Как видно из табл. 4.1, повторяемость волнения моря силой 3 балла и выше в данных географических районах достаточно высокая (за исключением ледового периода), что позволяет с уверенностью говорить о том, что верхний слой моря (до 30...50 м) достаточно интенсивно насыщается воздухом в процессе своего перемешивания. В связи с этим анализ данных, представленных на рис. 4.2 и в табл.4.1, позволяет оценить обеспеченность проявления исследуемого эффекта нелинейного взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды, лежащих в основе применения РППА в различных географических районах Тихоокеанского региона в зависимости от ветрового волнения (приповерхностный пузырьковый слой) и наличия биологического ЗРС в придонном слое моря, также спрогнозировать эффективность применения РППА, размещенных на НИС и буксируемом носителе.

Оценка коэффициента обратного рассеяния при непрерывном излучении высокочастотной волны накачки на частотах, близких к резонансным частотам рассеивателей звука, целенаправленно проводилась в рамках морских экспедиций. Макет РППА, структурная схема которого представлена на рис. 4.1, в, погружался на горизонты до 50 м при глубинах районов от 200 до 1500 м, а частоты ВЧ накачки варьировались в пределах от 8 до 200 кГц. Экспериментальным путем было установлено, что коэффициент обратного линейного рассеяния при непрерывном излучении высокочастотной накачки для РППА находится в пределах  $10^{-2}...10^{-3}$  1/м, что на 2–3 порядка выше для импульсного сигнала на произвольных частотах. При этом модуляционные составляющие, характеризующие эффективности нелинейного взаимодействия акустических волн ВЧ накачки и НЧ сигнала, были всего на 30...50 дБ (а не на 140...170 дБ, как в КППА) меньше уровня рассеянной на неоднородностях морской среды ВЧ накачки.

Влияние уровня реверберации на эффективность применения РППА очевидно, так как чем выше амплитуда рассеянного ВЧ сигнала, тем значительнее, при постоянном индексе модуляции, уровень комбинационных частот, то есть тем больше соотношение боковая полоса/шум, а значит, выше помехоустойчивость подобных антенн. Наличие резонансных рассеивателей звука в области взаимодействия акустических волн приводит также и к повышению эффективности преобразования акустической энергии ВЧ накачки в акустическую энергию НЧ волны разностной частоты. Экспериментальным путем было установлено, что существует прямая зависимость между коэффициентом помехоустойчивости РППА ( $\alpha$ ) и амплитудой НЧ спектрального максимума ( $U$ ), которая иллюстрируется на рис. 4.3. При этом на рис. 4.3, а соответственно цифрами I и II обозначены режимы эффективного и нецелесообразного применения РППА при данных параметрах ВЧ сигнала накачки, а также в данных гидролого-акустических и помехосигнальных условиях при обнаружении и пеленговании НЧ полезного сигнала частотой 235 Гц.



а)

б)

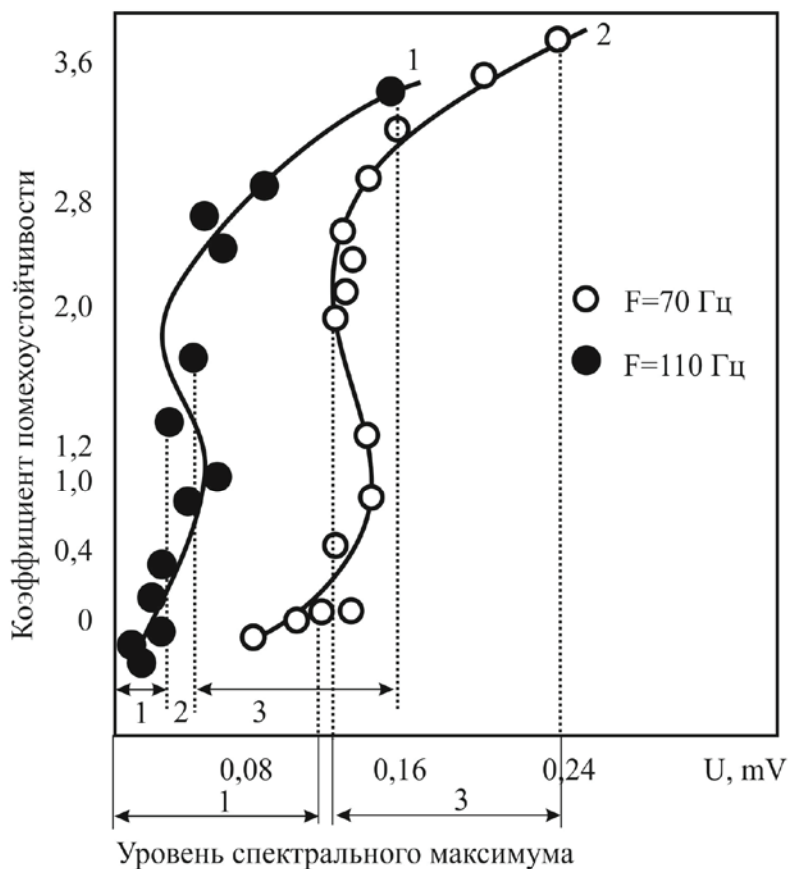


Рис. 4.3. Экспериментально измеренная зависимость коэффициента помехоустойчивости параметрической антенны от амплитуды сигнала накачки: а – спектрограммы сигналов на выходе РППА; б – результаты измерений

На рис. 4.3, б по эмпирическим данным нанесены кривые 1 и 2, отражающие зависимость коэффициента помехоустойчивости РППА  $\chi$  от амплитуды спектрального максимума  $U$  для двух «реперных» частот – 70 и 110 Гц соответственно. Использование графиков, представленных на рис. 4.3 б, позволяет осуществить оценку целесообразности применения РППА при данных параметрах ВЧ сигнала накачки, а также в тех или иных гидролого-акустических и помехосигнальных условиях. Будем полагать, что указанная антенна способна решить поставленную задачу, если амплитуда спектрального максимума на «реперных» частотах имеет значения в пределах участков, обозначенных на рис. 4.3, б цифрой 3. В случае если уровень НЧ реверберационного максимума укладывается в пределах участка, обозначенного на рис. 4.3, б цифрой 1 ( $\chi < 1$ ), то необходимо изменить параметры (частоту, амплитуду звукового давления, форму спектра сигнала) ВЧ накачки.

### **4.3. Экспериментальная оценка влияния гидрофизических характеристик среды на эффективность нелинейного взаимодействия волн**

Анализ и обобщение научных результатов по вопросу влияния гидрофизических характеристик морской среды на эффективность взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды показали, что существует определенная зависимость между уровнем реверберации ВЧ накачки в РППА и значением гидрофизических характеристик среды в районе проведения измерений. Как уже отмечалось ранее, газовые пузырьки, образованные за счет перемешивания верхнего слоя океана или в процессе жизнедеятельности морских биологических объектов, могут приводить к существенному увеличению параметра нелинейности среды на определенных частотах. Данное обстоятельство однозначно повышает эффективность применения реверберационной параметрической приемной антенны (РППА) и параметрической излучающей антенны (ПИА) [140–143].

В качестве примера на рис. 4.4 представлены типовые зависимости параметра нелинейности морской среды от частоты зондирующего сигнала и горизонта расположения излучателя акустических колебаний, характерные для южных (рис. 4.4, а) и северных (рис. 4.4, б) географических районов. Экспериментальные данные получены при использовании ПИА для акустической спектроскопии пузырьков воздуха, находящегося в приповерхностном слое моря, в разных географических районах. Как видно из рис. 4.4, а, на глубинах 20–30 м в южных географических районах параметр нелинейности морской среды достигает величины около 220, что на 2 порядка выше, чем для однородной среды, и имеет ярко выраженный резонансный характер на частоте 32 кГц. В то же время с увеличением глубины нахождения акустической системы «излучатель – приемник» до 60 м параметр нелинейности уменьшается в 5 раз от вышеуказанных значений.

В то же время в северных географических районах параметр нелинейности в приповерхностном слое океана существенно (почти в 2 раза) ниже, чем в южных географических районах; имеет менее выраженный резонансный характер, но занимает более широкий спектр частот: от 25 до 50 кГц (см. рис. 4.4, б). Анализируя собственные результаты исследований по оценке влияния нелинейности среды на эффективность применения РППА, следует отметить, что полученные величины также на порядок и более превосходили значения данного параметра для однородной среды. Подобная зависимость просле-

живалась для РППА и в том случае, когда исследуемый эффект нелинейного взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды, в месте установки прибора для измерения параметра нелинейности морской воды, либо усиливался, либо вообще только регистрировался в указанный период времени. Данное обстоятельство связано с суточными миграциями по глубине биологических звукорассеивающих слоев (ЗРС).

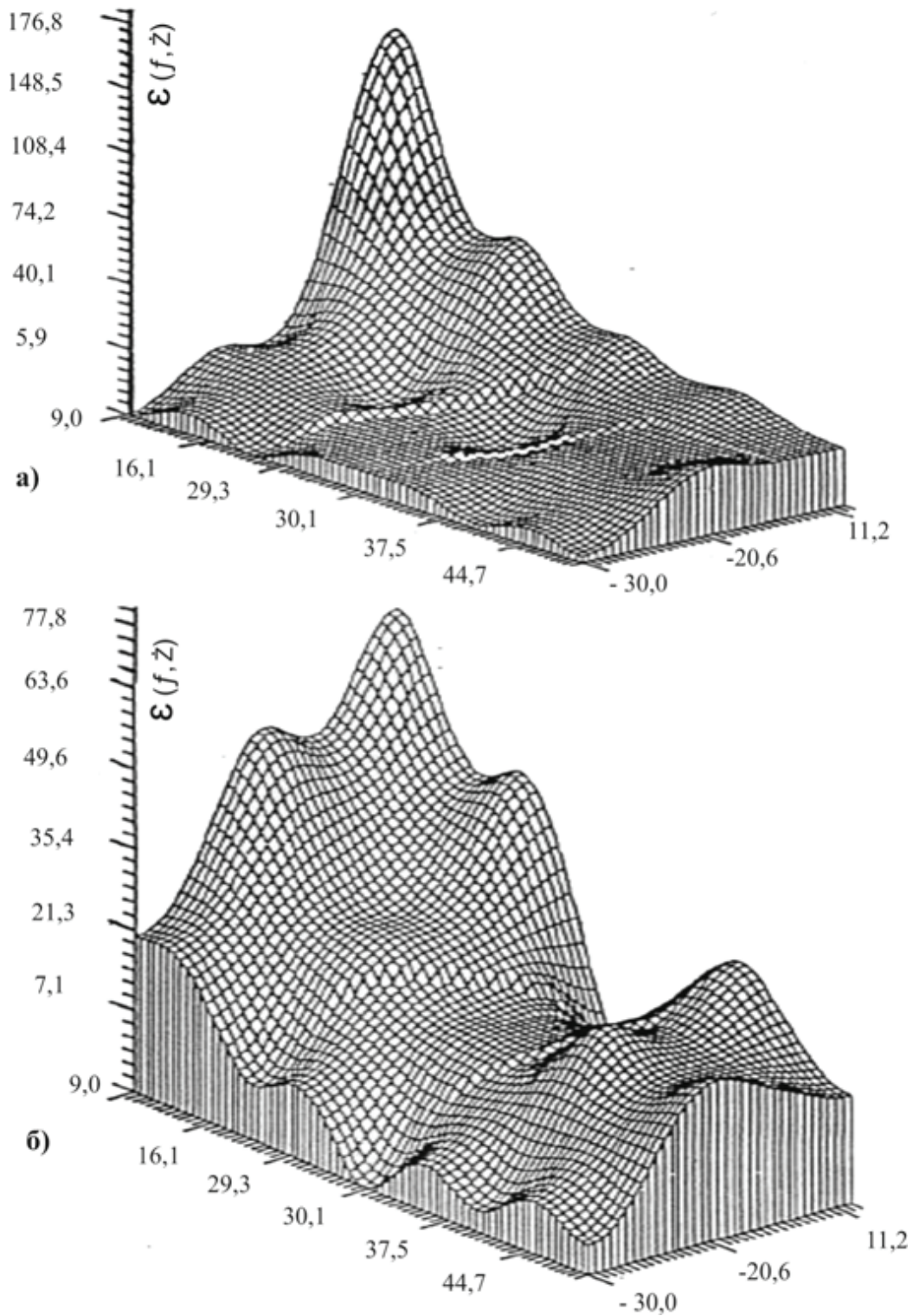


Рис. 4.4. Зависимость параметра нелинейности морской среды от частоты и горизонта расположения излучателя сигналов накачки:  
 а – южные географические районы; б – северные географические районы

На рис. 4.5, а, в, д, ж представлено вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) по глубине в диапазоне значений от 10 до 400 м в 4 географических районах Охотского моря. На рис. 4.5, б, г, е, з обозначены соответствующие ВРСЗ эхограммы ВЧ импульсных сигналов на частоте 124 кГц, зарегистрированные на выходе научно-исследовательского эхолота. Как видно из рис. 4.5, а, б, при отсутствии эффекта взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды было зарегистрировано равномерное уменьшение скорости звука по глубине, а на эхограмме отсутствовали сигналы от рассеивателей.

В то же время при расположении РППА в приповерхностном слое (на глубинах 20–50 м) исследуемый эффект регистрировался в 3 других географических районах. Причем на этом же горизонте наблюдался скачок скорости звука (см. рис. 4.5, в, г, д, ж), а также регистрировались сигналы реверберации и эхосигналы от приповерхностного звукорассеивающего слоя (см. рис. 4.5, г, е, ж). Как видно из рис. 4.5, д, е, ж, з, РППА эффективно можно было бы использовать не только в приповерхностном слое, но и на горизонтах 160–220 м в двух последних географических районах. Таким образом, неоднородности водной среды являются своеобразным «индикатором» наличия слоя скачка скорости звука, а также своеобразным «критерием» эффективного применения РППА на соответствующем горизонте при данных параметрах (частоте и др.) ВЧ сигнала накачки.

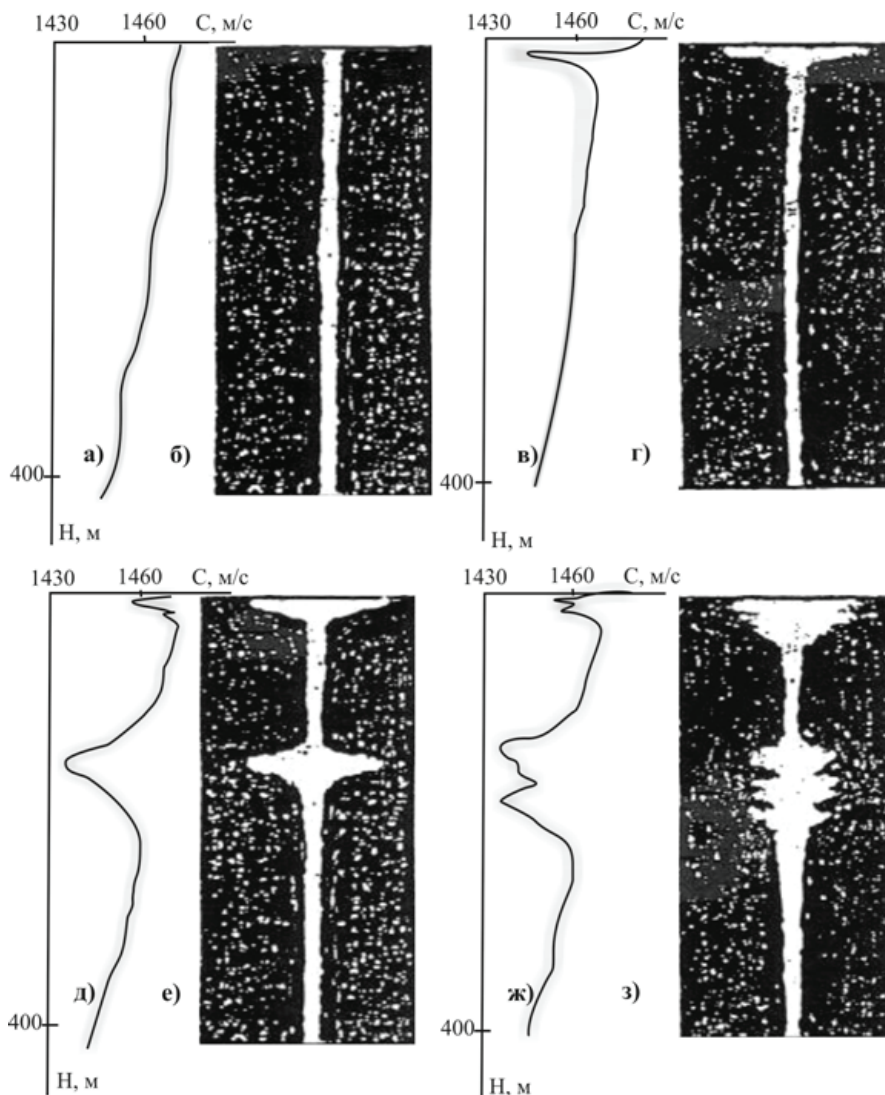


Рис. 4.5. Эхограммы импульсных сигналов накачки в зависимости от вертикального распределения скорости звука

На рис. 4.6, а, б представлена количественная оценка зависимости характера вертикального распределения скорости звука по глубине (кривая 1) и вертикального распределения уровня реверберации ВЧ сигнала накачки на частоте 32 кГц (кривая 2) для двух географических районов Охотского моря, в которых исследуемый эффект взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды регистрировался наиболее устойчиво при нахождении РППА на горизонте 40–50 м.

Как видно из рис. 4.6, а, при излучении ВЧ сигнала накачки уровень его реверберации возрастает на 20 дБ при изменении глубины от 0 до 50 м на фоне уменьшения на 35...40 м/с скорости звука в воде. Во втором географическом районе уровень реверберации ВЧ накачки возрастает на 15 дБ при изменении глубины от 0 до 50 м на фоне уменьшения на 30...35 м/с скорости звука в воде. Применительно к РППА, в случае совпадения горизонтов нахождения антенны, звукорассеивающего слоя и максимальных градиентов скорости звука, эффект взаимодействия акустических волн наиболее ярко выражен и устойчив по времени.

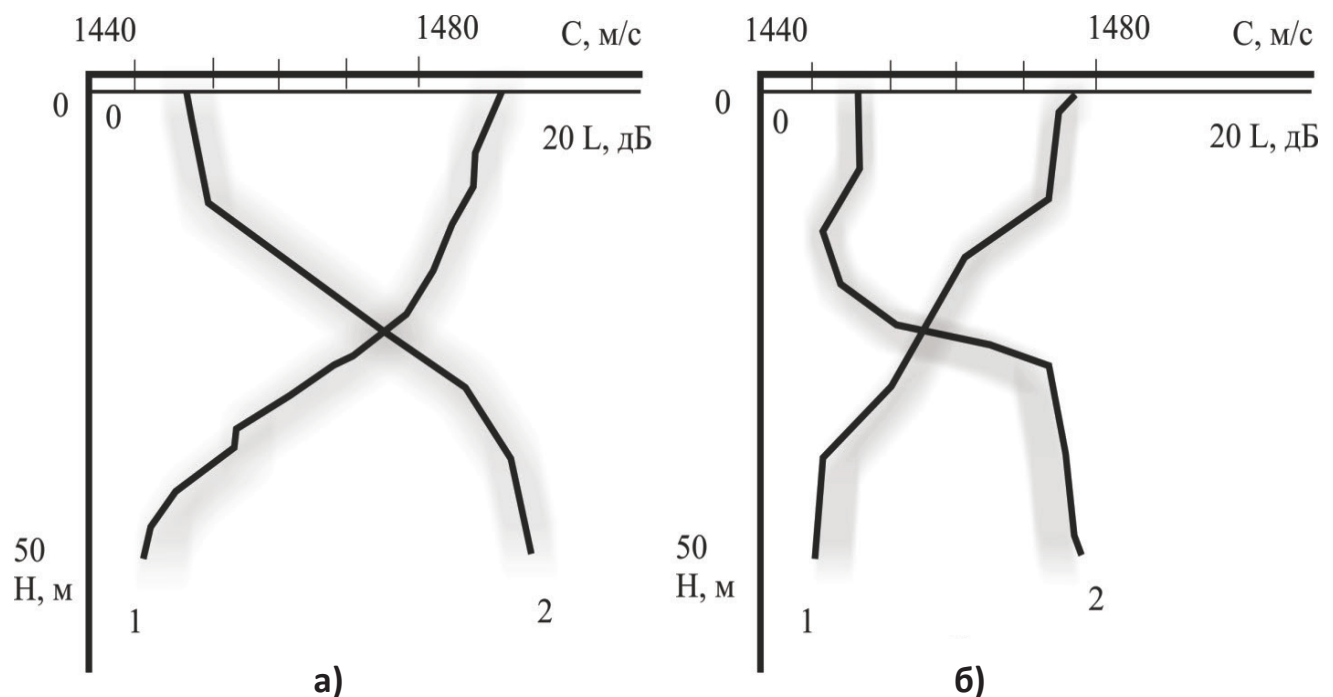


Рис. 4.6. Вертикальное распределение скорости звука (1) и уровни реверберации (2) высокочастотного сигнала накачки для районов Охотского моря: а – района 1; б – района 2

На рис. 4.7 представлены результаты исследований, проведенных отечественными специалистами под руководством Л.М. Мясникова, скорости звука (рис. 4.7, а) и удельного акустического сопротивления смеси «вода-воздух» (рис. 4.7, б) для среды, содержащей пузырьки воздуха. Как видно из рис. 4.7, а, при одинаковом содержании в объеме воды и воздуха (по 50 %) скорость звука достигает своего минимального значения (20 м/с), что в 17 раз меньше, чем в чистом воздухе, и в 75 раз меньше, чем в однородной водной среде. Кроме того, при повышенном содержании воздуха в воде на 2–3 порядка уменьшается удельное акустическое сопротивление такой среды (см. рис. 4.7, б). При этом достаточно наличия всего одной миллионной части воздуха в объеме воды, чтобы скорость звука в такой среде уменьшилась

на 20 %. Данное обстоятельство очень важно в теоретическом аспекте при обосновании принципиальной возможности взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды в неоднородных средах, так как скорость звука в таких средах, входящая в основные уравнения нелинейной акустики, находится в знаменателе и имеет 3-ю степень. То есть если скорость звука уменьшается на порядок (например, с 1500 до 150 м/с), то амплитуда волн комбинационных частот в РППА возрастет не менее чем на 3 порядка.

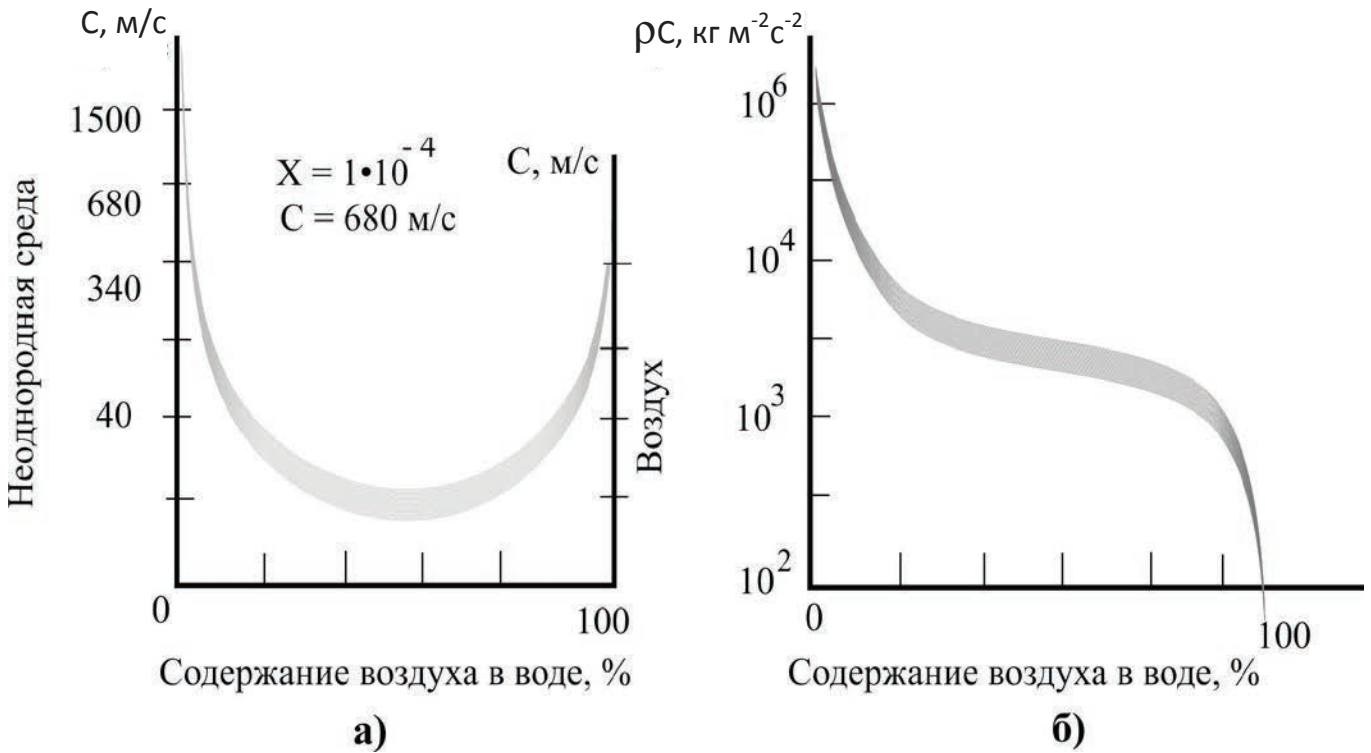


Рис. 4.7. Зависимость скорости звука от удельного акустического сопротивления в газонасыщенной воде

На рис. 4.8 иллюстрируются временные зависимости температуры морской воды, зарегистрированные с помощью прибора АЦИТТ (автономный цифровой измеритель температуры и течения воды) при отсутствии (рис. 4.8, а) и наличии (рис. 4.8, б) исследуемого эффекта взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды. Как видно из рис. 4.8, б, взаимодействие акустических волн наиболее эффективно происходит при наличии определенных градиентов температуры морской воды. При этом многочисленные экспериментальные данные указывают на отсутствие влияния абсолютного значения температуры морской воды на процесс взаимодействия волн. На рис. 4.9 представлена графическая зависимость коэффициента помехоустойчивости РППА ( $\alpha$ ) от температурного градиента морской воды ( $\Delta T$ ), обобщающая экспериментальные данные экспедиций серии «Восток». Как видно из рис. 4.9, существует достаточно хорошая корреляция между указанными выше величинами.



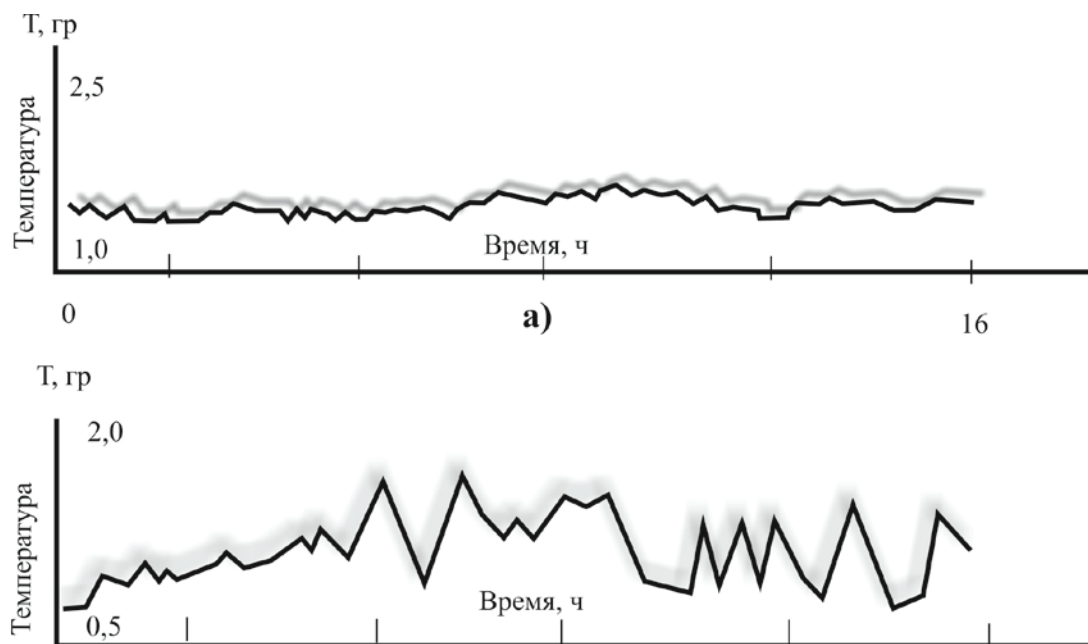


Рис. 4.8. Температура морской воды в ходе эксперимента с РППА:  
 а – при наличии эффекта взаимодействия акустических волн;  
 б – при при отсутствии эффекта взаимодействия акустических волн

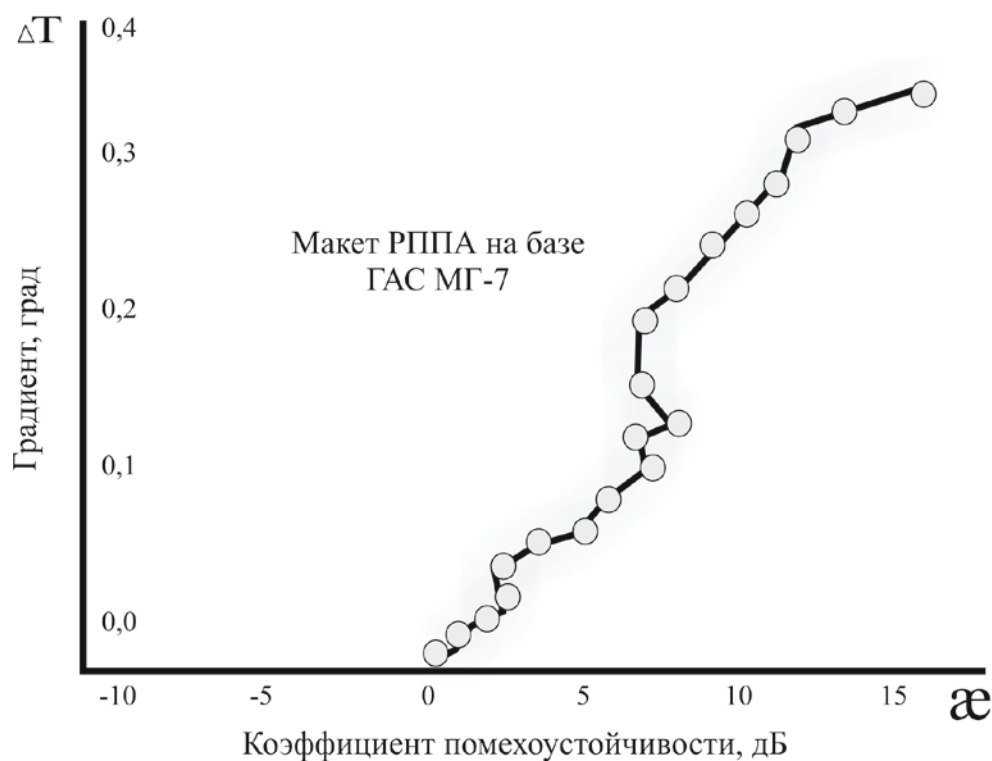


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента помехоустойчивости РППА ( $\alpha$ ) от температурного градиента морской воды ( $\Delta T$ )

Можно считать, что эффект взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды в неоднородной морской среде имеет место, а применение РППА и ПИА целесообразно, если на горизонте расположения данных параметрических антенн регистрируется градиент температуры морской воды, превышающий величину 0,05 град/м.

#### 4.4. Направленность и помехоустойчивость параметрических приемных антенн

Экспериментальные исследования по оценке помехоустойчивости и направленных свойств выполнялись с различными типами РППА [133–137]. Частоты полезных сигналов  $\Omega$ , излучаемые специальными акустическими преобразователями, находились в пределах от 28 Гц (ниже граничной частоты КППА и ЛППА) до 1,5 кГц (принятая на практике в качестве верхней границы НЧ диапазона) при уровне звукового давления  $P_c = 0,001 \dots 100$  Па в точке приема, а параметры ВЧ сигнала накачки  $\omega_n$  изменялись в пределах от 8 до 200 кГц – по частоте и от 10 Па до 10 кПа – по акустическому давлению в точке излучения.

Известно выражение для оценки ширины основного максимума ХН линейных антенн различного типа:

$$\theta_{-3\text{дБ}} \cong n \arcsin a \left( \frac{\lambda_c}{D} \right),$$

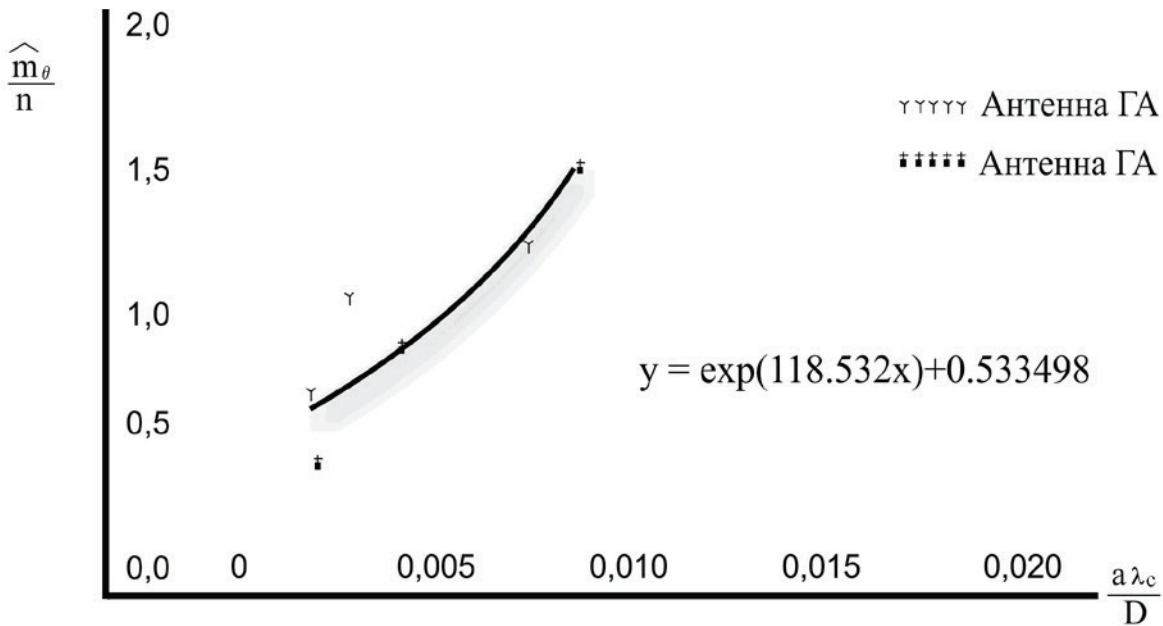
где  $n = 2; 3; 4$ ;  $a = 0,45; 0,175; 0,64$  – коэффициенты для линейной, рупорной и цилиндрической антенн;  $\lambda_c$  – длина волны сигнала;  $D$  – волновой размер антенны.

После проведения экспериментальных исследований с РППА в составе различных гидроакустических средств проводилась их статистическая обработка результатов измерения. Задача анализа состояла в измерении ширины основного максимума ХН антенн различного (цилиндрических, плоских, рефлекторных и др.) типа с целью вычисления оценок математического ожидания  $m_\theta$  и построения графика зависимости:

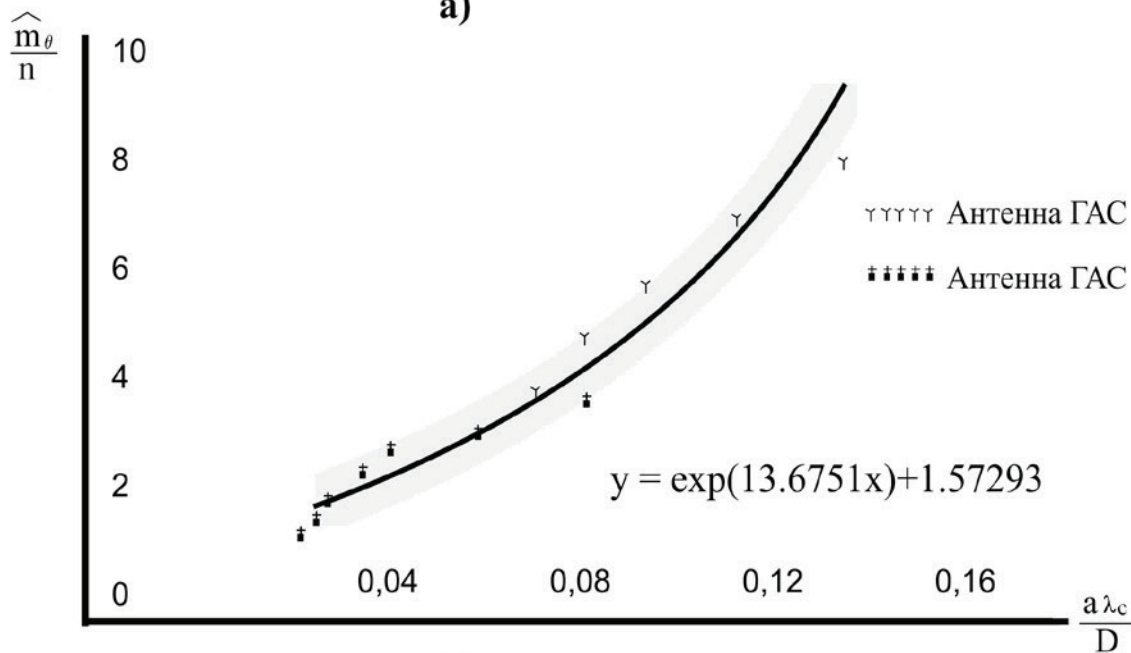
$$\frac{\hat{m}_\theta}{n} = F\left(\frac{a\lambda_c}{D}\right).$$

На рис. 4.10, а, б кривыми аппроксимированы указанные выше зависимости для антенн с обтекателем (см. рис. 4.10, а) и без обтекателя (см. рис. 4.10, б). Взяв за основу полученные результаты, можно оценить направленность РППА, в качестве приемного элемента которой используется акустическая система различного типа и с различными волновыми размерами, используемая в составе ГАС. В качестве примера на рис. 4.10, в представлен отклик РППА, при ее механическом сканировании в горизонтальной плоскости (3 оборота) и при наведении антенны на НЧ источник гидроакустических сигналов частотой около 28,5 Гц. Как видно из рис. 4.10, в, данная РППА при волновых размерах приемного элемента 0,45 м имеет направленность при пеленговании сигналов в инфразвуковом диапазоне частот, что не реализуемо для КППА и ЛППА, а также линейных антенн с аналогичными волновыми размерами.

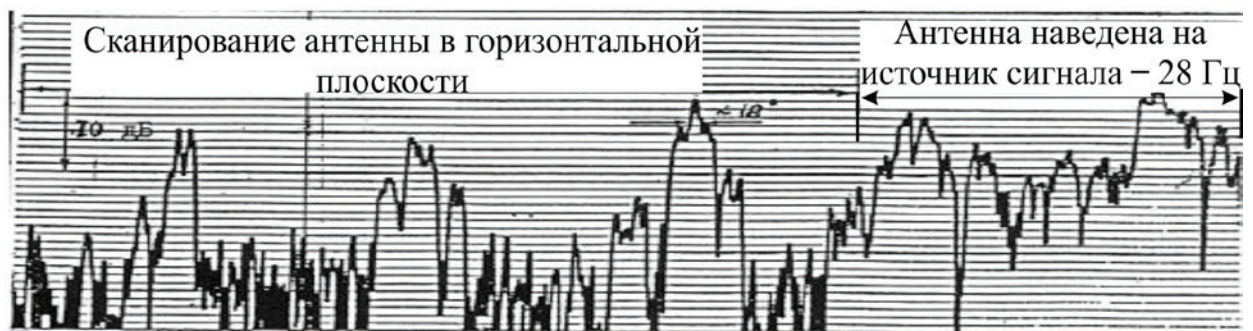
Напомним, что нижняя граничная частота тракта обработки сигналов в КППА и ЛППА составляет 35 Гц.



а)



б)



в)

Рис. 4.10. Результаты экспериментальной оценки направленных свойств параметрических приемных антенн: а – с обтекателем; б – без обтекателя; в – отклик антенны на базе ГАС МГ–329

На рис. 4.11, а, б представлены отклики той же РППА при пеленговании источника НЧ сигнала с частотой  $\Omega = 635$  Гц в линейном (см. рис. 4.11, а) и параметрическом (см. рис. 4.11, б) режимах работы. Как видно из рис. 4.11, б в последнем случае произошло уменьшение в 6 раз ширины основного максимума ХН антенны. На рис. 4.11, в обозначен отклик РППА при пеленговании сигнала частотой 28,5 Гц. Изменение частоты НЧ сигнала с 635 до 28,5 Гц не вызывает существенного изменения ширины основного максимума ХН РППА. Данный параметр находится в пределах  $16\text{--}20^\circ$  на уровне  $-3$  дБ и определяется в основном волновыми размерами приемного элемента РППА, частотой и уровнем звукового давления ВЧ сигнала накачки, а также протяженностью области взаимодействия акустических волн. Таким образом, регистрация тонального НЧ сигнала на частоте  $\Omega = 28,5$  Гц (см. рис. 4.11, в, г), заведомо не попадавшего в частотный диапазон тракта линейной обработки сигналов ГАС, свидетельствует о том, что с помощью РППА осуществлена регистрация волн комбинационных частот  $\omega_n \pm \Omega$ , образованных в неоднородной морской среде за счет нелинейного взаимодействия волн накачки и сигнала. Напомним, что для того чтобы сформировать направленность в  $20^\circ$ , по аналогии с описанным выше экспериментом с РППА, в классической ППА требуется достичь соотношения базы КППА к длине волны НЧ сигнала равного 20. Другими словами, база КППА (расстояние между ВЧ излучателем накачки и ВЧ акустическим приемником) при пеленговании источника НЧ сигнала частотой около 28,5 Гц с направленностью в  $20^\circ$  должна составлять около 1052 м. В то время как волновые размеры приемного элемента в РППА составляют величину 0,45 м. Таким образом, выигрыш по данному показателю эффективности у РППА по сравнению с КППА составляет 2338 раз.

Проведем сравнительную оценку в помехоустойчивости РППА по отношению к линейным антеннам, обладающим теми же волновыми размерами. Известно, что коэффициент помехоустойчивости  $\chi$  является одним из основных показателей любой антенны и представляет собой выраженную в децибелах разность в соотношении С/П на выходе антенного устройства и гидрофона. При проведении экспериментальных исследований в качестве частного показателя эффективности РППА использовался выигрыш в соотношении С/П на ее выходе по отношению к аналогичному параметру на выходе линейной антенны, обладающей аналогичными волновыми размерами. В результате обработки статистического материала установлено, что величина данного частного показателя зависит от многих факторов и находится в пределах 20...28 дБ – в диапазоне частот от единиц герц до 200 Гц, 12...20 дБ – в диапазоне частот от 200 до 450 Гц, 6...12 дБ – в диапазоне частот от 450 Гц до 1,5 кГц и 3...6 дБ – в диапазоне частот от 1,5 до 7,0 кГц при одноканальной обработке модуляционного процесса.

На последнее обстоятельство обратим особое внимание, так как указанные цифры будут использоваться нами при разработке способов повышения эффективности применения РППА за счет многоканальной (пространственной и частотной) обработки модуляционного процесса, а также при расчете дальности действия ГАС с РППА.

Оценим эффективность применения РППА от протяженности области взаимодействия, а также от параметров ВЧ накачки и НЧ полезного сигнала. Для начала проанализируем влияние протяженности области взаимодействия акустических волн на амплитуду ВЧ волны комбинационной частоты на входе блока обработки сигналов. Методика проведения исследований заключалась в изменении геометрии взаимного расположения излучателей НЧ сигнала и ВЧ накачки, а также приемного элемента РППА. При этом с помощью гидрофона контролировалось изменение уровней напряжений, подводимых к соответствующим гидроакустическим излучателям, и поддерживалось постоянство уровней НЧ сигнала и ВЧ накачки на приемном элементе РППА.

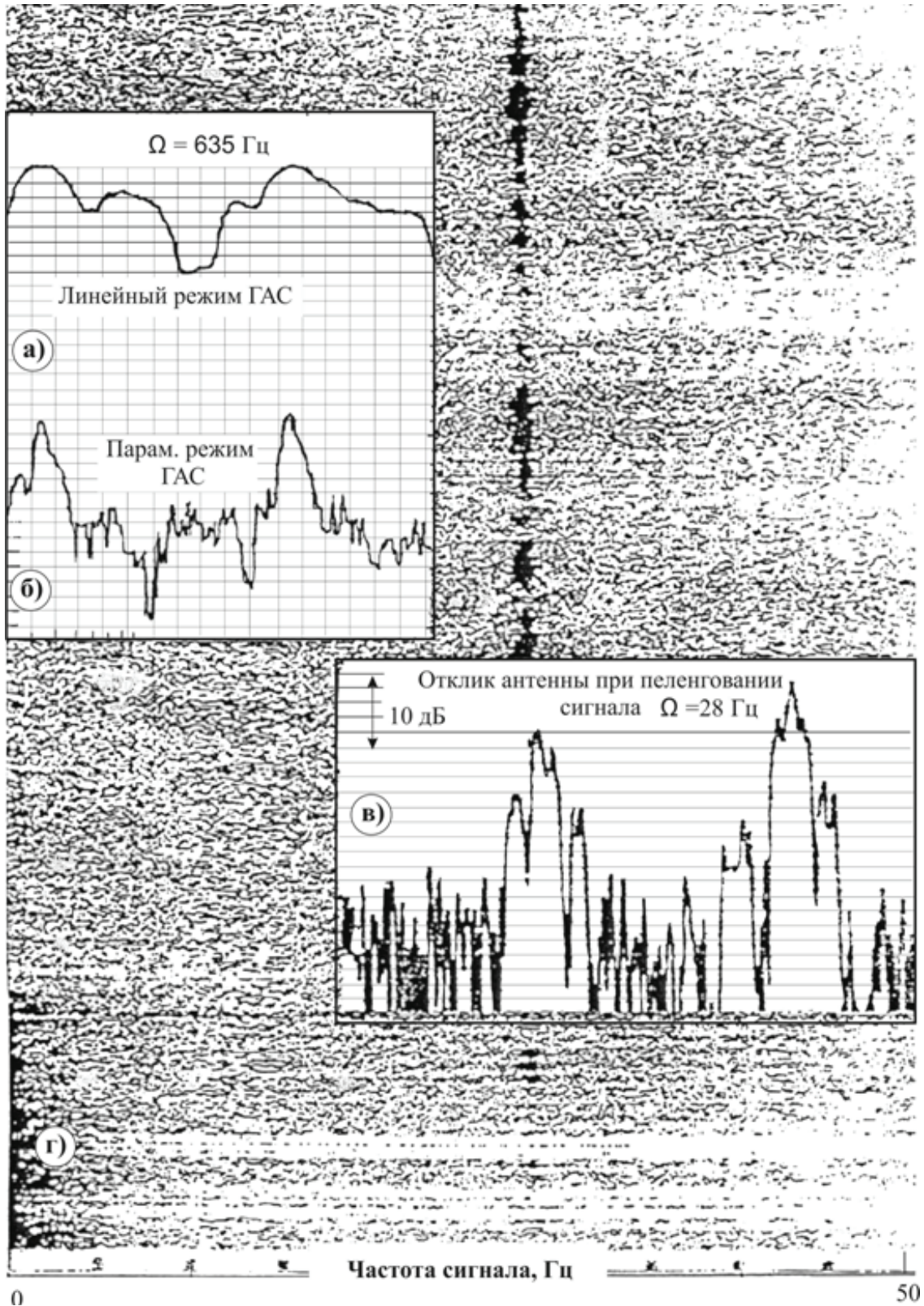


Рис. 4.11. Результаты экспериментальных исследований работы ГАС в линейном режиме, а также с использованием РППА

На рис. 4.12 представлены значения амплитуды звукового давления волн комбинационных частот в зависимости от базы РППА, изготовленной на базе ГАС МГ-7, для различных (64 и 28 кГц) частот ВЧ накачки. Как видно из рис. 4.12, а, существует оптимальное (10–90 м при  $\omega_n = 64$  кГц) расстояние, на котором амплитуда ВЧ волны комби-

национной частоты имеет пороговое значение  $15 \cdot 10^{-4}$  Па, характеризующее двукратный (6 дБ) выигрыш в помехоустойчивости РППА по сравнению с линейной антенной, обладающей теми же волновыми размерами. При этом уменьшение частоты ВЧ сигнала накачки в 2,3 раза (с 64 до 28 кГц), при неизменных других условиях, дополнительно повышает на 3–4 дБ помехоустойчивость РППА и изменяет границы эффективной базы РППА с 10–90 м (см. рис. 4.12, а) до 30–180 м (см. рис. 4.12, б).

Протяженность области взаимодействия акустических волн ВЧ накачки и НЧ сигнала определяется влиянием диссипации, потерями акустической энергии при распространении и рассеянии ВЧ, а также соотношениями между различными величинами: длиной волн ВЧ накачки и НЧ сигнала, направленностью излучателя накачки и приемного элемента РППА.

Оценим эффективность применения РППА в зависимости от параметров ВЧ накачки и НЧ полезного сигнала, обратившись к рис. 4.13. В частности, на рис. 4.13, а в виде гистограммы иллюстрируются оптимальные (с точки зрения выбранного ранее критерия) частоты ВЧ накачки для 5 макетов РППА в диапазоне частот от 8 до 124 кГц при нахождении последних в приповерхностном слое моря (на горизонтах до 50 м).

Как видно из рис. 4.13, а, для данных типов РППА предпочтительными являются частоты 16 и 32 кГц.

Ранее нами уже отмечалось, что именно эти частоты соответствуют резонансной частоте 32 кГц (и ее субгармонике 16 кГц) рассеивателей звука, находящихся в приповерхностном пузырьковом слое. На рис. 4.13, б в виде обобщенных графиков для тех же макетов РППА иллюстрируется зависимость выигрыша в соотношении С/П на выходе РППА, по сравнению со значением данного параметра на выходе линейной антенны с аналогичными волновыми размерами, от частоты НЧ полезного сигнала в диапазоне от 28 Гц до 1,5 кГц при близких параметрах ВЧ сигнала накачки. Как видно из рис. 4.13, б, данный параметр для РППА находится в обратно пропорциональной зависимости от частоты НЧ сигнала, т.е. чем ниже частота НЧ полезного сигнала, тем больше выигрыш в помехоустойчивости РППА.

При этом еще раз напомним, что вне рабочего диапазона частот, который для различных типов ГАС исчисляется десятками и сотнями герц, с помощью линейной антенны (с аналогичными РППА волновыми размерами) просто невозможно определить направление на источник НЧ полезного сигнала. На рис. 4.14, а, б представлены графики, характеризующие зависимость соотношения С/П на выходе РППА при пеленговании источника НЧ сигналов на частотах 1015 и 405 Гц соответственно, в зависимости от дискретных (с интервалом 4 кГц в диапазоне частот от 4 до 72 кГц) частот ВЧ сигнала накачки. Как видно из рис. 4.15, наиболее предпочтительными, с точки зрения максимального соотношения С/П, являются частоты 32 и 16 кГц. Кроме того, выигрыш в соотношении сигнал/помеха на выходе РППА, по сравнению с линейной антенной, увеличивается по мере уменьшения частоты НЧ полезного сигнала.

Большую практическую значимость для обнаружения и распознавания источника НЧ полезного сигнала имеет информация о характере спектра ВЧ модуляционных частот, зарегистрированных на входе блока нелинейной обработки сигналов.

Для примера на рис. 4.15 представлены спектрограммы: суммарных (акустических и электрических) помех работе РППА (рис. 4.15, а); ВЧ сигнала накачки при отсутствии источника НЧ сигналов (рис. 4.15, б); ВЧ сигнала накачки с ВЧ комбинационными частотами при наличии 2 различных (по диапазону частот) источников НЧ сигналов (рис. 4.15, в, г), зарегистрированных на входе блока нелинейной обработки сигналов.

Как видно из рис. 4.15, б, при излучении ВЧ сигнала накачки и при отсутствии НЧ полезного сигнала регистрируется дискретная составляющая на частоте ВЧ сигнала накачки при полном отсутствии боковых полос.

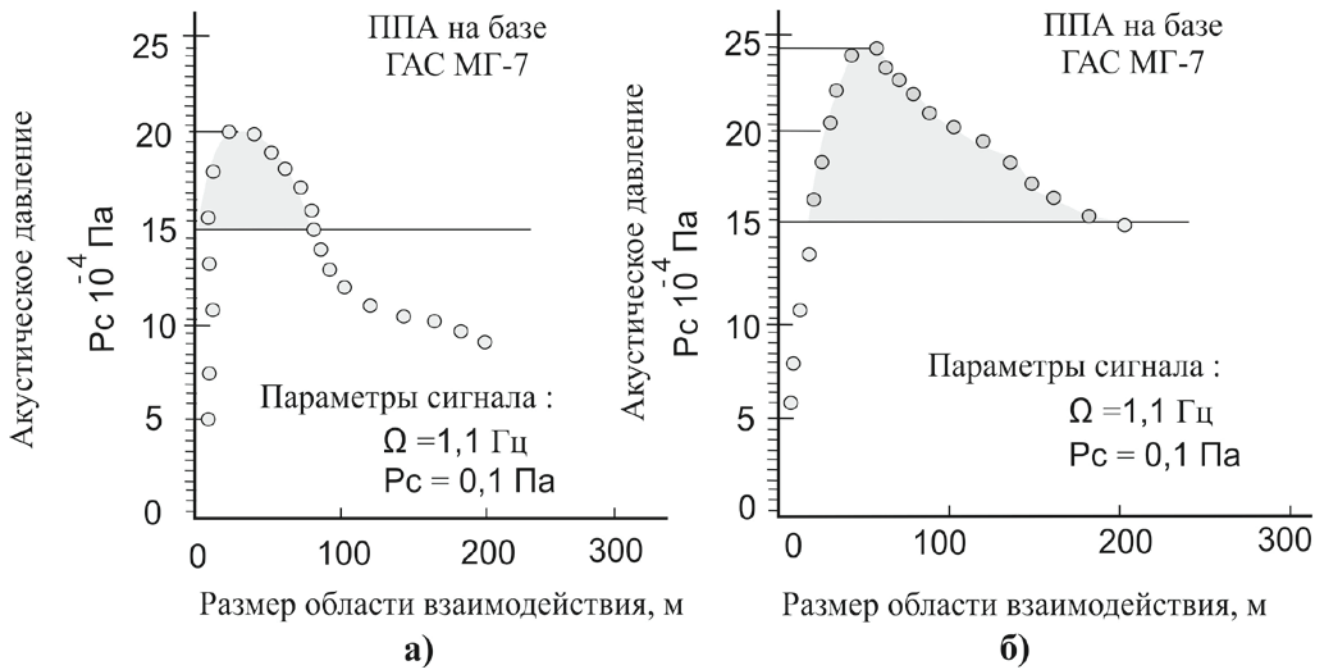


Рис. 4.12. Значения амплитуды комбинационных частот в зависимости от протяженности базы РППА для двух частот сигнала накачки: а – частота накачки 64 кГц; б – частота накачки 28 кГц

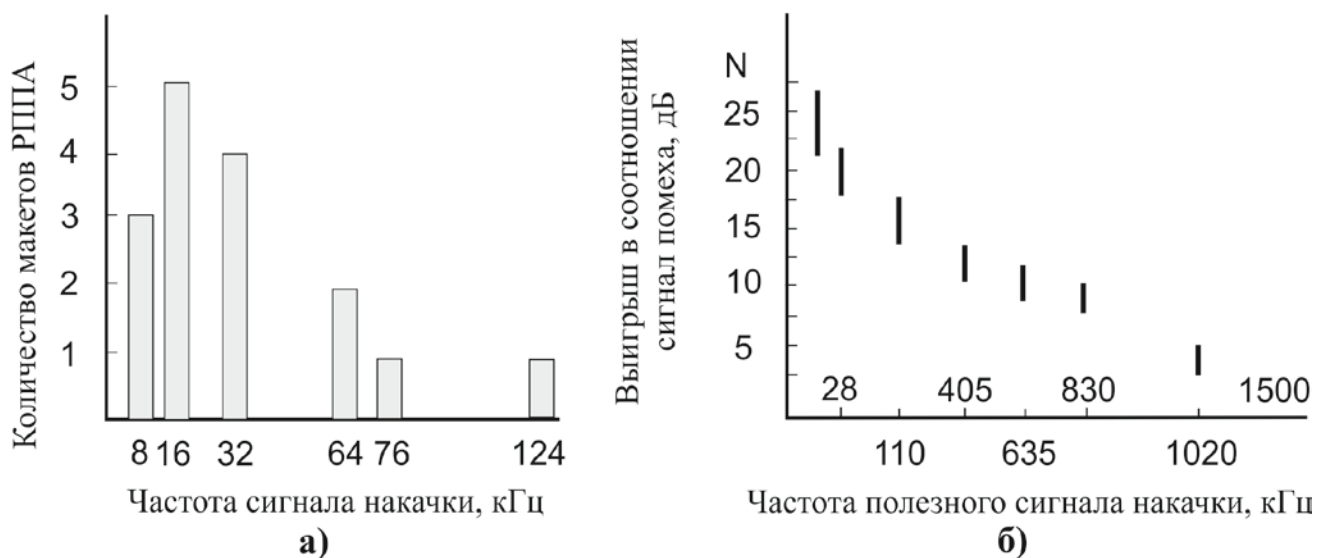
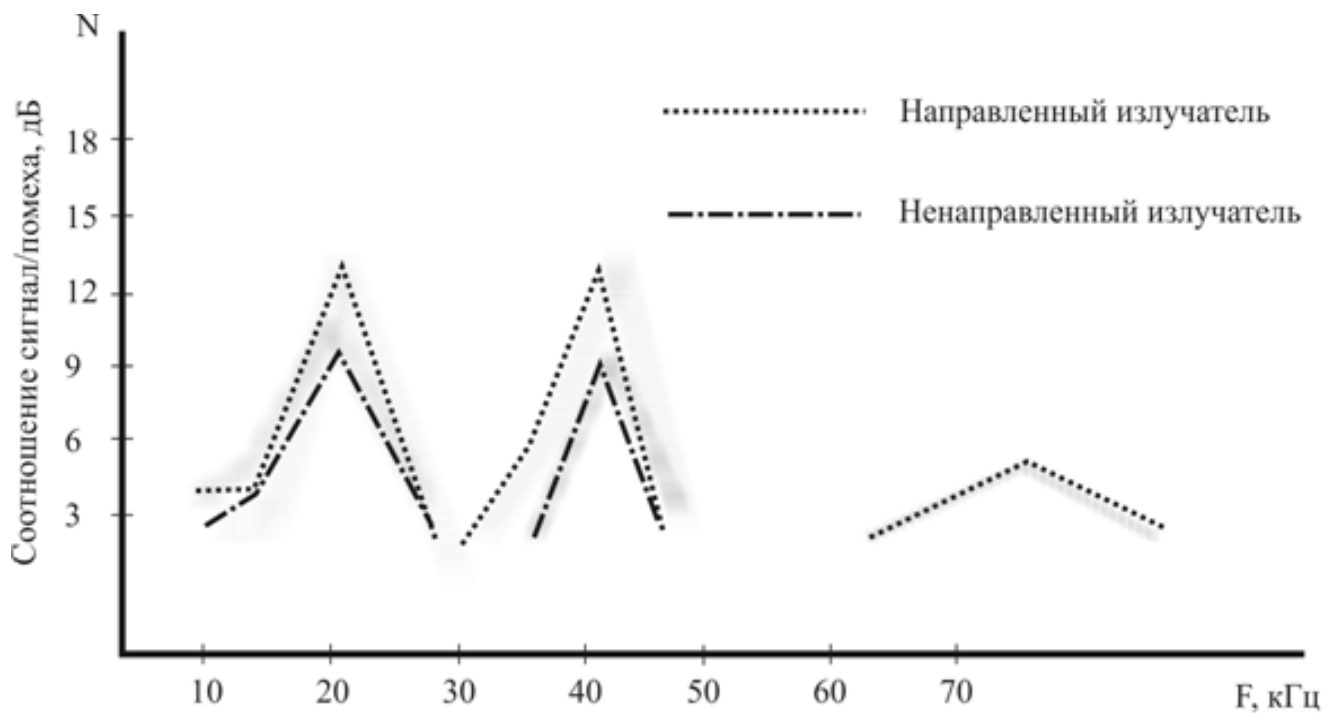
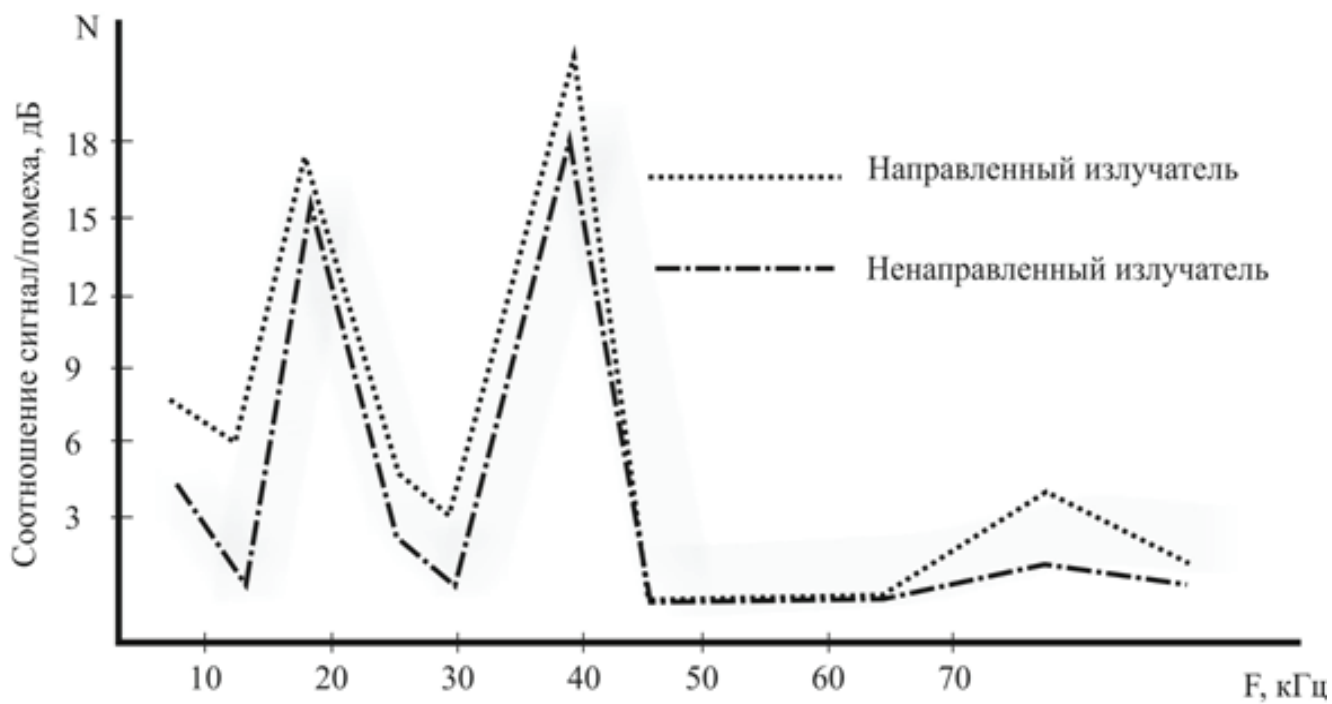


Рис. 4.13. Результаты оценки эффективности РППА в зависимости от частоты принимаемого НЧ сигнала и ВЧ накачки: а – влияние частоты ВЧ сигнала накачки для различных макетов РППА; б – влияние частоты НЧ полезного сигнала для различных макетов РППА



а)



б)

Рис. 4.14. Зависимость отношения сигнал/помеха на выходе РППА при пеленговании источника информационных волн (1015 и 405 Гц) от частоты ВЧ накачки: а – частота сигнала – 1015 Гц; б – частота сигнала – 405 Гц



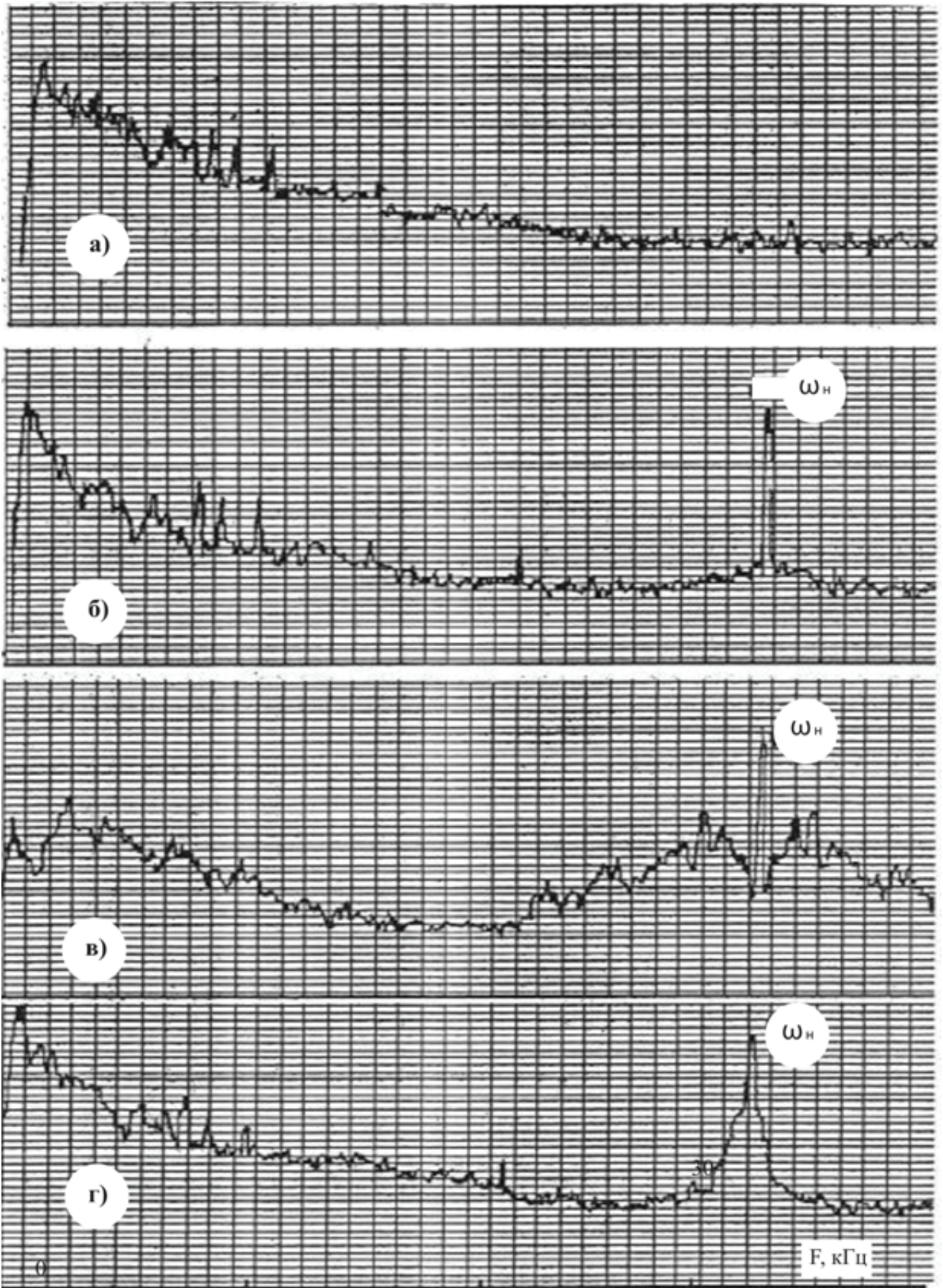


Рис. 4.15. Спектрограммы сигналов на входе блока обработки приемной системы

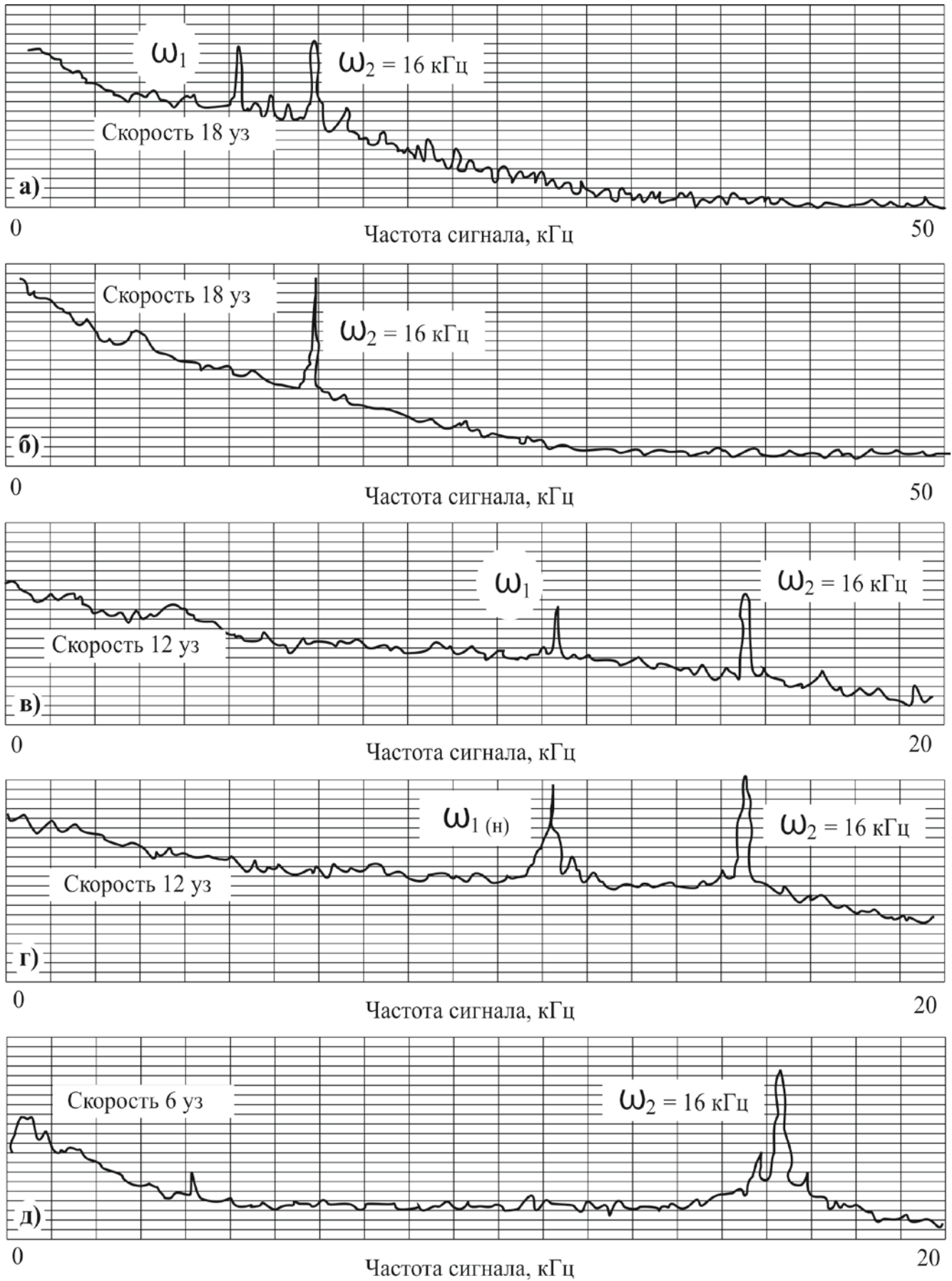
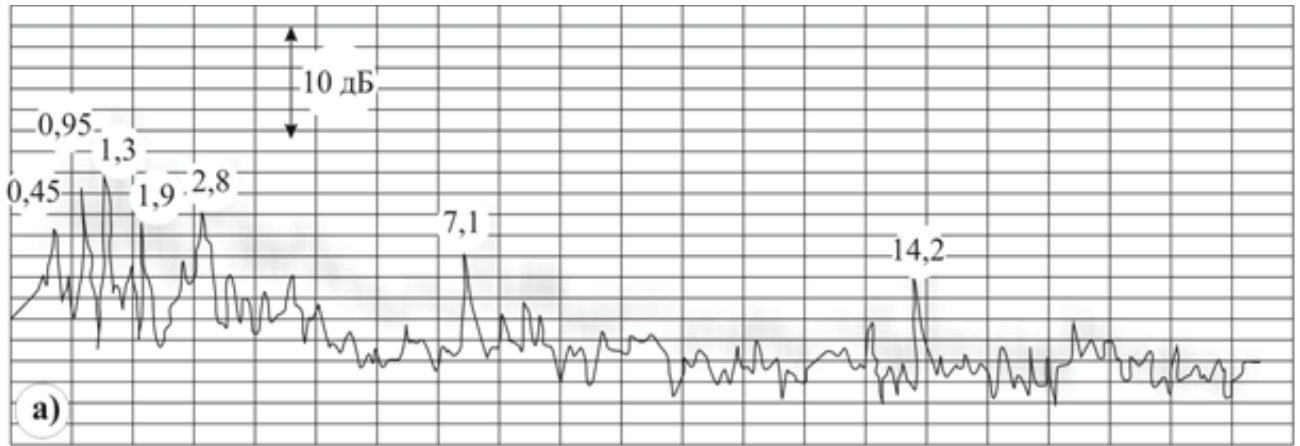
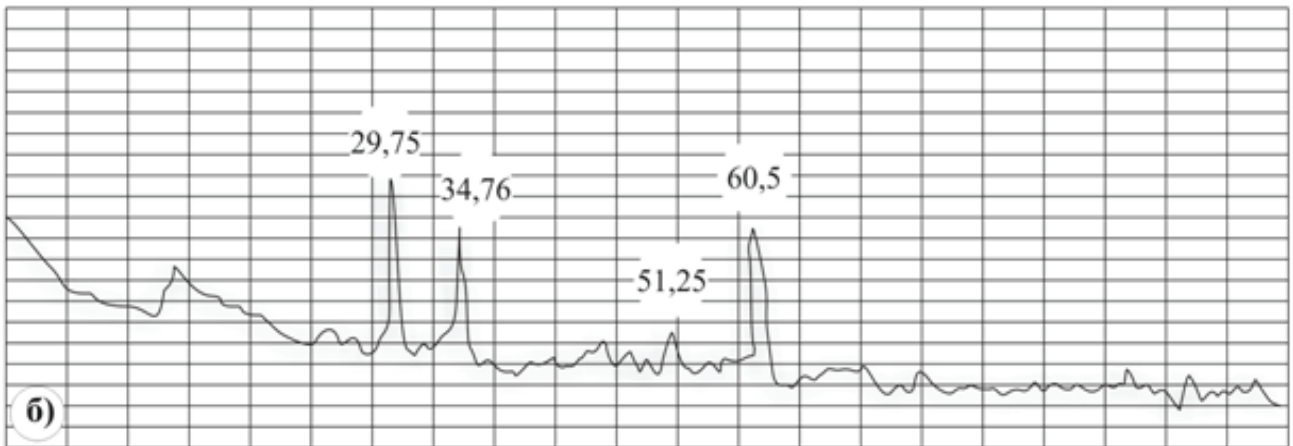


Рис. 4.16. Спектрограммы сигналов на входе блока обработки приемной системы



Частота сигнала, Гц

20



Частота сигнала, Гц

100

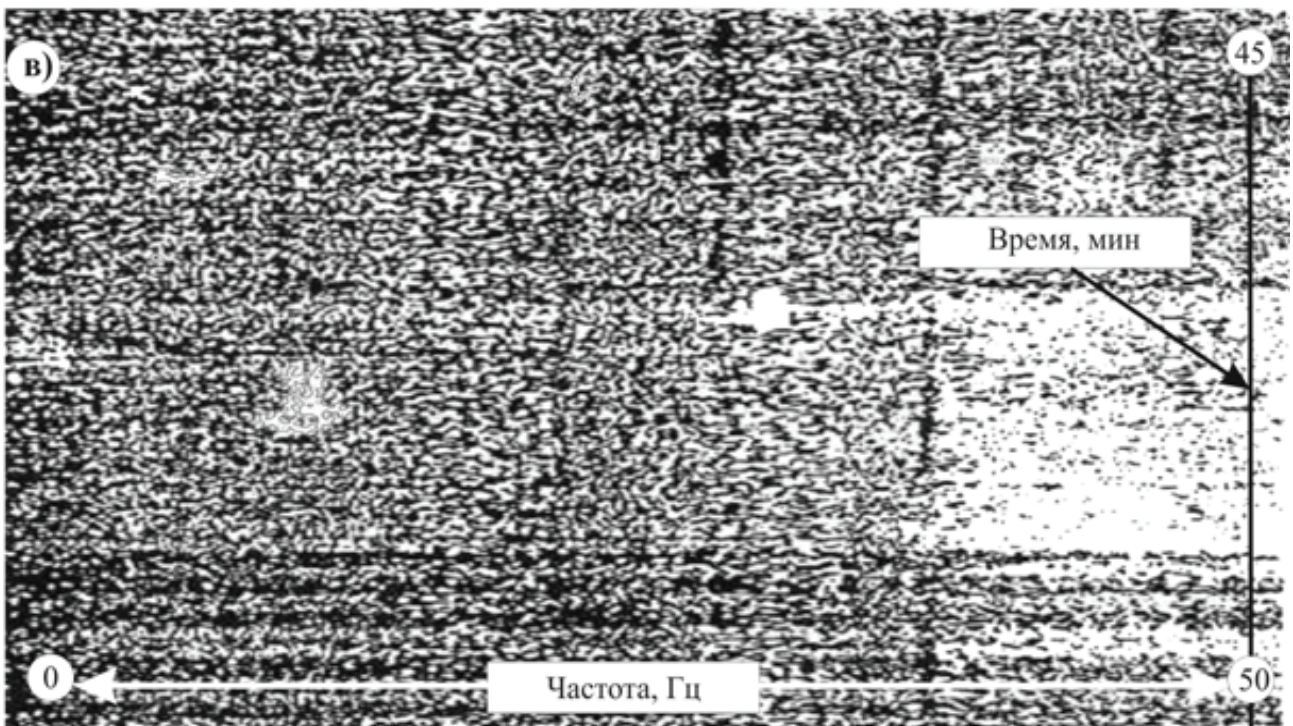


Рис. 4.17. Спектрограммы сигналов на выходе блока обработки приемной системы

Для сигналов более высокой частоты (сотни герц-единицы килогерц) относительно накачки волны комбинационных частот проявляются в виде «полочки», как показано на рис. 4.15, в.

Для сигналов более низкой частоты (единицы-сотни герц) относительно накачки волны комбинационных частот проявляются в виде «колокола», как показано на рис. 4.15, г. Другими словами, уже на входе блока обработки сигналов РППА можно автоматически классифицировать источник НЧ сигналов по спектральным признакам.

Возможности РППА по направленному приему широкополосных гидроакустических сигналов в условиях подводного носителя иллюстрируются на рис. 4.16, 4.17. При этом на рис. 4.16 представлены спектрограммы ВЧ волн комбинационных частот, зарегистрированные на входе блока обработки сигналов на скоростях хода подводного носителя 18 уз, или 33 км/ч (рис. 4.16, а, б), 12 уз, или 22 км/ч (рис. 4.16, в, г), и 6 уз, или 11 км/ч (см. рис. 4.16, д). Как видно из рис. 4.16, коэффициент модуляции, характеризующий эффективность функционирования РППА, составляет 15...20 %, что на порядок превосходит аналогичный параметр для КППА. При этом одновременно в качестве накачки использовались импульсные сигналы на частоте  $\omega_1 = 12$  кГц и непрерывные сигналы на частоте  $\omega_2 = 16$  кГц. Важным также является то обстоятельство, что на скорости хода носителя 6 уз (см. рис. 4.16, д) в суммарной помехе в диапазоне частот выше 4–5 кГц преобладает электрическая составляющая, в то время как на скорости хода носителя 18 уз (см. рис. 4.16, а, б) в диапазоне частот ниже 25–30 кГц преобладает акустическая составляющая. Данное обстоятельство необходимо учитывать при разработке тракта обработки сигналов для РППА, устанавливаемой на конкретном носителе (РППА на корпусе НИС или РППА, буксируемая в специальном контейнере непосредственно над дном).

На рис. 4.17 представлены спектрограммы, зарегистрированные на выходе блока нелинейной обработки сигналов, которым соответствует входной модуляционный процесс, проиллюстрированный ранее на рис. 4.16, д. Как видно из рис. 4.17, с помощью РППА, установленной на подводном носителе, удалось направленно принимать гидроакустические сигналы в диапазоне частот от долей герц и выше.

#### **4.5. Дальность действия гидроакустического средства с реверберационной приемной параметрической антенной**

Проиллюстрируем преимущества, получаемые за счет использования РППА в составе пассивного гидроакустического средства (шумопеленгатора), входящего, в свою очередь, в состав активно-пассивного параметрического гидролокатора. В качестве основного показателя эффективности выберем дальность действия. При этом уравнение пассивной гидролокации представим в виде

$$УИ - ПР = УП - ПН + ПО, \quad (4.1)$$

где УИ – уровень излучения; ПР – потери энергии при распространении; УП – уровень собственных помех; ПН – показатель направленности антенны; ПО – порог обнаружения.

Указанное выше уравнение применяется на практике в качестве теоретической основы для анализа рабочих характеристик существующих и перспективных ГАС.

Дальность обнаружения шумящего объекта при этом является функцией параметров, стоящих в правой части уравнения (4.1), важнейшими из которых являются показатель направленности (ПН) и уровень помех (УП). Задача повышения значения ПН связана с увеличением коэффициента концентрации (КК) антенны, который представляет собой отношение функций направленности сигнала и помехи при условии, что когерентный сигнал принимается на фоне изотропной помехи и главный максимум ХН антенны ориентирован в направлении прихода сигнала.

Известно, что для антенн простых форм КК зависит от отношения волновых размеров антенны  $L$  к длине волны сигнала  $\lambda_c$ . Если антенна реализована в виде распределенных элементов с интервалом  $d$  между ними, то при условии  $d < \frac{\lambda_c}{4}$  указанная зависимость может быть представлена как

$$\text{ПН} = 10 \lg \frac{2L}{\lambda_c},$$

Рассмотрим изменения, вносимые в уравнение дальности действия шумопеленгатора при использовании в его составе РППА.

Как уже отмечалось ранее, в процессе функционирования РППА обеспечивается пространственная фильтрация НЧ сигнала на фоне суммарной помехи в диапазоне частот огибающей ВЧ сигнала накачки с коэффициентом помехоустойчивости, близким к коэффициенту концентрации антенны на частоте накачки.

При этом в параметрическом тракте ГАС используется информация, содержащаяся только в модуляционных составляющих ВЧ сигнала накачки, а прямой НЧ сигнал подвергается частотной фильтрации уже на входе РППА. С учетом вышеизложенного амплитуду звукового давления преобразованного НЧ сигнала  $P_c$  можно представить в виде

$$P_c = \frac{P_{\text{си}} A_f G_c}{r} 10^{-0,05\beta},$$

где  $P_{\text{си}}$  – амплитуда звукового давления НЧ сигнала в точке излучения;  $A_f$  – аномалия распространения сигнала;  $G_c$  – коэффициент преобразования по сигналу;  $\beta$  – коэффициент пространственного затухания;  $r$  – расстояние до точки приема.

Коэффициент  $G_c$  характеризует эффективность РППА и зависит от многих факторов: параметра нелинейности среды, уровней звукового давления и частот НЧ сигнала и ВЧ накачки, протяженности взаимодействия акустических волн и др. При этом уровень звукового давления суммарных помех в РППА можно представить в виде

$$P_{\text{П}} = \sqrt{(G_{\text{П}} P_{\text{ПН}})^2 + P_{\text{ПВ}}^2 + P_{\text{ПЭЛ}}^2},$$

где  $G_{\text{П}}$ ,  $P_{\text{ПН}}$  – уровень звукового давления преобразованных НЧ помех в ВЧ диапазоне сигнала накачки;  $P_{\text{ПВ}}$  – уровень ВЧ помех;  $P_{\text{ПЭЛ}}$  – уровень ВЧ электрических помех, эквивалентных акустическим.

Оценка потенциального выигрыша в энергетической дальности действия шумопеленгаторной ГАС, работающей в параметрическом режиме по сравнению с ее линейным режимом, может быть определена с помощью выражения

$$\Delta D = \sqrt{\frac{K \gamma_{\text{ППА}}}{\gamma_A} \frac{\beta_{\text{ЛР}}}{\beta_{\text{ПР}}} n},$$

где  $\gamma_{\text{ППА}}$ ,  $\gamma_A$  – коэффициенты концентрации РППА и линейной антенны;  $\beta_{\text{ПР}}$ ,  $\beta_{\text{ЛР}}$  – коэффициенты затухания частот для соответствующих режимов работы ГАС ( $\beta_{\text{ПР}} < \beta_{\text{ЛР}}$ );  $K$  – коэффициент ( $K < 1$ ), учитывающий не оптимальность существующих антенн ГАС для параметрического приема сигналов;  $n$  – коэффициент потерь, определяемый как

$$n = \frac{G_c P_c}{\sqrt{(G_{\text{П}} P_{\text{Пн}})^2 + P_{\text{ПВ}}^2 + P_{\text{ПЭЛ}}^2}},$$

где  $G_c$ ,  $G_{\text{П}}$  – коэффициенты преобразования для сигнала и помехи соответственно.

В качестве примера на рис. 4.18 представлены результаты испытаний РППА в составе двух разных гидроакустических средств (рис. 4.18, в – средство № 1, рис. 4.18, г – средство № 2), установленных на двух различных подводных носителях при обнаружении надводных и подводных морских целей. При этом на рис. 4.18, а иллюстрируется ВЧ модуляционный процесс, зарегистрированный на входе блока обработки сигналов при наличии шумящей (в диапазоне частот от единиц герц до единиц килогерц) морской цели в ДН РППА, а на рис. 4.18, б – при ее отсутствии в ДН РППА. Как видно из рис. 4.18, а, уровень рассеянного и принятого антенной ВЧ сигнала накачки 16 кГц всего на 16 дБ превышает уровень разностной частоты 15,55 кГц, т.е. уровень амплитудной модуляции ВЧ сигнала накачки составляет 20–30 %, что на порядок и более превосходит аналогичный показатель для КППА и ЛППА. Из рис. 4.18 а, б также видно, что в суммарном уровне помех начиная с 4,5–5,0 кГц преобладает не акустическая (как должно быть), а электрическая составляющая (4,7) помехи, а это означает, что данное техническое средство не является оптимальным для применения РППА и не позволяет полностью реализовать потенциальные возможности параметрического высоконаправленного приема широкополосных гидроакустических сигналов.

Как следует из рис. 4.18, даже для данного ГАС параметрический режим работы имеет преимущество перед линейным режимом работы в дальности обнаружения подводных и надводных морских целей. В частности, максимальный выигрыш в дальности действия составил 2,2 раза, а его наиболее типовые значения при 35 испытаниях находились в интервале значений 1,4–1,9 раза.

Как видно из рис. 4.18, г, и для другого типа ГАС, установленного на другом подводном носителе, использование параметрического режима работы позволило получить преимущество перед линейным режимом. В частности, максимальный выигрыш в дальности действия составил 2,0 раза, а его наиболее типовые значения при 39 испытаниях находились в интервале значений 1,2–1,7 раза.

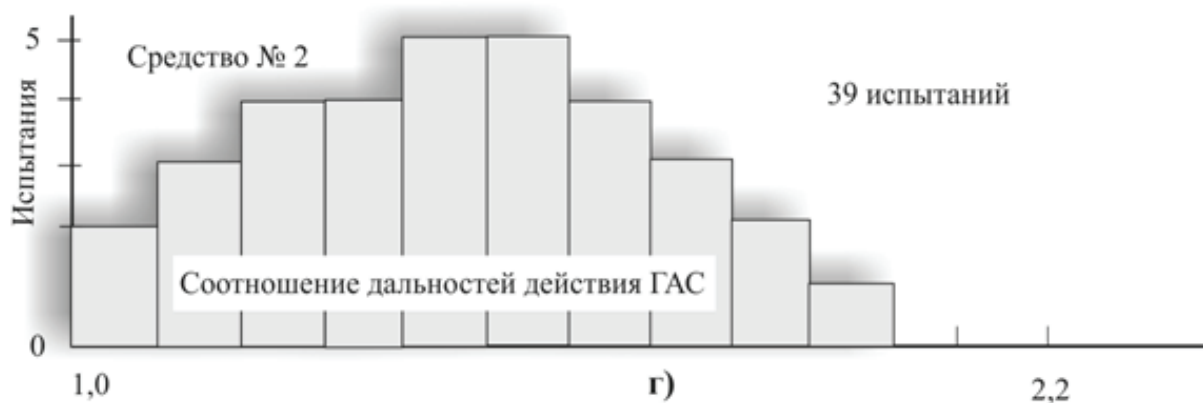
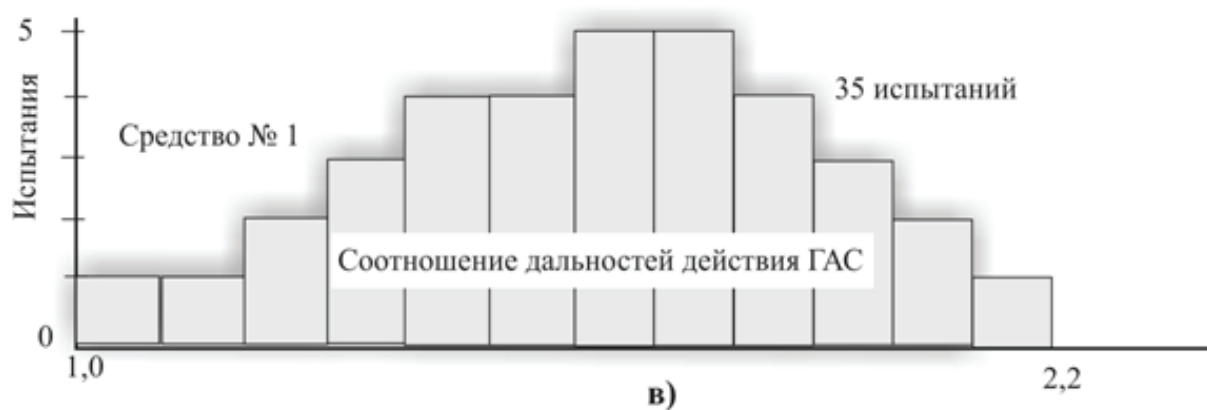
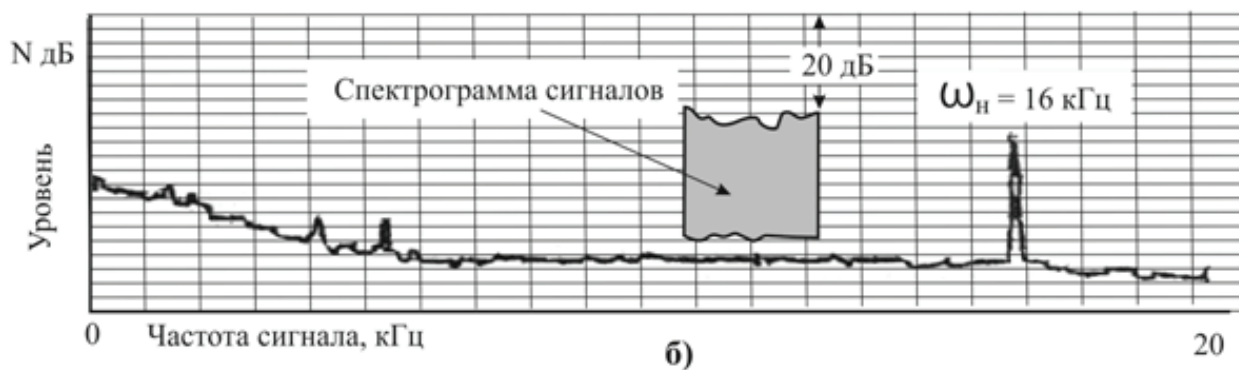
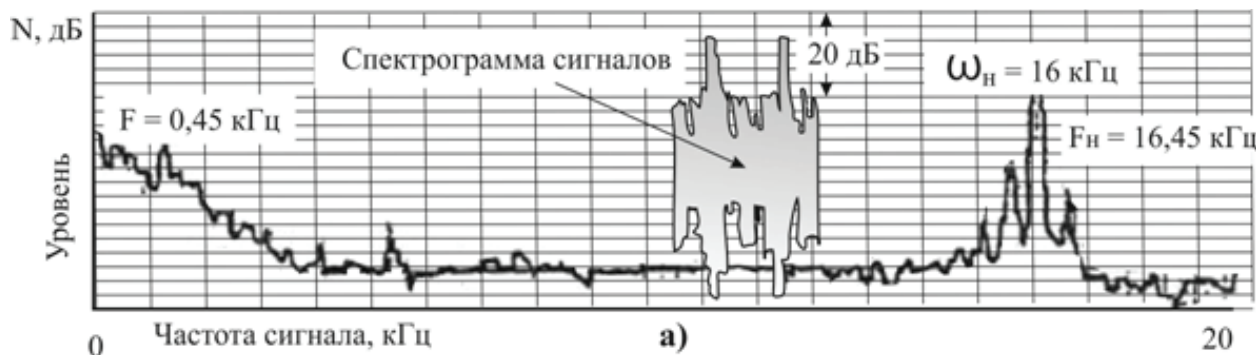


Рис. 4.18. Обобщенные результаты морских испытаний работы РППА

Следует заметить, что приведенные выше рассуждения касались только одноканальной обработки сигналов. Применение специальных мер повышения помехоустойчивости РППА (например, за счет многоканальной пространственной и частотной обработки сигналов и др.) позволит дополнительно повысить дальность действия ГАС с РППА.

Говоря о влиянии уровня звукового давления ВЧ волны накачки на эффективность применения РППА, следует заметить, что их относительно оптимальный уровень был, в большинстве случаев, обусловлен не физическими процессами, протекающими в неоднородной морской среде при распространении и взаимодействии акустических волн, а, к сожалению, техническими характеристиками (динамическим и частотным диапазонами, акустической чувствительностью и др.) используемых макетов РППА. Технические характеристики ГАС, на базе которых были изготовлены макеты РППА, не позволили в полной мере реализовать более высокие потенциальные возможности разработанного метода параметрического приема НЧ гидроакустических сигналов [144–149].

*В четвертой главе:*

– показано, что эффективность нелинейного взаимодействия акустических волн, лежащего в основе функционирования РППА и адаптивной ПИА, будет зависеть от протяженности объема и функции распределения рассеивателей звука в нем по характерным размерам; нелинейности и плотности среды, а также скорости звука в ней; соотношений между величинами акустического давления ВЧ волн накачки и измеряемого сигнала;

– экспериментально установлено, что эффективность взаимодействия акустических волн относительно малой амплитуды находится в зависимости от географических районов Мирового океана, гидрофизических условий среды, а также параметров НЧ сигнала и ВЧ накачки. При этом модуляционные составляющие, характеризующие эффективность нелинейного рассеяния, на 30...50 дБ (а не на 140...170 дБ, как принято в «классической» нелинейной акустике) отстоит от уровня рассеянного ВЧ сигнала накачки.



## 5. МОНИТОРИНГ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ИСТОЧНИКОВ МОРСКОГО ДНА

### 5.1. История морской геофизики в России

Вторая половина XX века ознаменовалась началом интенсивных работ по широко-масштабному мониторингу геофизических полей и освоению ресурсов Мирового океана, занимающего около 71 % всей поверхности Земли. Вся его территория была условно разделена следующим образом: область шельфа – с глубинами до 200 м (7,5 % площади Мирового океана), зона материкового континентального склона – с глубинами от 0,5 до 3 км (10,8 % площади Мирового океана) и океаническая (абиссальная) область – с глубинами более 3 км (81,7 % площади Мирового океана). Основными источниками информации о геологическом строении дна Мирового океана являются результаты геофизических и, прежде всего, сейсмических исследований. В настоящее время уже достаточно четко сформировались три строго выраженных направления морских геолого-геофизических исследований:

- поиски и разведка залежей углеводородов (нефть, газ и газогидраты) на шельфе и материковом континентальном склоне;
- поиски, разведка и добыча различного вида конкреций – богатых металлических руд с поверхности дна Мирового океана;
- поиски и разведка россыпных месторождений золота, олова, алмазов и проч. в прибрежной полосе шельфа.

Основной объем морских исследований в настоящее время осуществляется с целью поиска и разведки залежей углеводородов, а также обнаружения морских объектов по характеристикам формируемых ими полей.

С точки зрения техники и технологии ведения сейсморазведки всю территорию Мирового океана принято делить на три области:

- переходная (транзитная) зона от суши к морю с глубинами до 20 м, где еще не могут использоваться морские сейсморазведочные суда;
- шельфовая (мелководная) зона с глубинами от 20 до 50 м;
- глубоководная часть Мирового океана с глубинами более 500 м.

Выполнение сейсморазведочных работ в каждой из этих зон имеет свои особенности, поэтому основной объем работ в настоящее время выполняется в шельфовой зоне.

Анализируя историю развития российской морской геофизики в шельфовой зоне, следует заметить, что начальный период ее развития (конец 40-х – начало 50-х годов) прошел на Каспии и был отмечен попытками приспособить наземные методы для работы в море. Специфика исследований в морской среде специалистами еще не была осознана. Революционным стал период с 1953 г. по 1955 г., когда была создана первая в мире плавучая маслonaполненная шланговая пьезокоса (автор – Г.И. Рудаковский), что позволило разработать методику непрерывного сейсмического профилирования на ходу судна. Первый в мире профиль был отработан отечественными специалистами в 1956 г. (автор – С.П. Варганов и др.). В начале 60-х годов была создана плавучая взрывная магистраль (автор – А.А. Гагельганц и др.), что позволило автоматизировать работу, отказаться от взрывной шлюпки и производить взрывные работы непосредственно с борта судна. Во второй половине 60-х годов были созданы пневматические источники возбуждения колебаний (автор – А.М. Грибанов и др.), что, с одной стороны, позволило полностью отказаться от применения бризантных взрывных веществ, а с другой – разрабо-

тать морскую модификацию методики непрерывного профилирования с многократным накоплением сигналов от источника малых энергий (автор – Ю.М. Мистрюков).

До начала 70-х годов наша страна занимала передовые позиции в мире по методике и технике морских геофизических работ, что признала группа американских ученых и практиков, посетивших Геленджик в 1971 г. В 70-х годах произошло резкое отставание российских разработок от аналогичных разработок в западных компаниях в связи с широким внедрением за рубежом микроэлектроники и компьютерной техники, а также спутниковой навигации. При этом научные разработки, создаваемые в НИИ СССР, практически не могли соревноваться с мировыми стандартами, поэтому отечественные производственные организации начали переоснащаться зарубежной техникой. Исходя из этого в 90-е годы морские геофизические партии России пополнились новыми судами, аппаратурой и стали успешно конкурировать на западном рынке, выступая в кооперации с самыми передовыми зарубежными компаниями (PGS и др.). Морские геофизические работы нефтегазопрофиля в России покрыли съемкой практически весь шельф, что позволило провести общетектоническое и нефтегазогеологическое районирование морского шельфа, а также наметить основные перспективные районы. В частности, только на морском шельфе России было выявлено около 500 локальных структур, из них: 96 подготовлено к глубокому бурению; на 54 структурах было проведено бурение и выявлено 29 месторождений. Среди данных структур выделялись такие супергиганты, как Штокманское, Ленинградское, Руссановское газовые месторождения в Баренцевом и Карском морях, крупное Приразломное нефтяное месторождение в Печерском море, Пильтун-Астохское, Дагинское и др. месторождения у Сахалина и т.д. При этом была продемонстрирована высокая эффективность морских геофизических работ.

По мнению отечественных и зарубежных специалистов, основной проблемой в нефтяной индустрии России является то обстоятельство, что начиная с 1994 г. прирост запасов по нефти и газа существенно, в 1,5–2 раза, отстает от добычи. В истории отечественной морской сейсморазведки за последние 50 лет можно выделить 5 основных этапов развития:

На 1-м этапе (40-е – 50-е годы) в Каспийском море сухопутные сейсмоакустические технологии приспособлялись к морским условиям. При этом были открыты и освоены нефтяные месторождения на Каспии.

На 2-м этапе (конец 50-х – 60-е годы) создавалась специализированная технология морской сейсморазведки, которая обеспечивала высокую производительность и информационную эффективность метода при решении задач поиска и разведки нефтяных месторождений. Осуществлялось региональное изучение шельфа России и стран – членов Совета экономической взаимопомощи (СЭВ). Были открыты перспективные нефтегазовые районы на Каспийском, Черном, Азовском, Баренцевом и Гренландском морях, а также на шельфе Индии, Кубы, ГДА и ОАР.

Третий этап (конец 60-х – середина 80-х годов) характеризуется автоматизацией процесса проведения морских сейсмических исследований путем внедрения современных методов сбора, обработки, хранения и передачи информации на основе средств вычислительной техники. В результате началось планомерное изучение Мирового океана с целью его фундаментальных исследований. Были установлены основные особенности внутреннего строения океанической земной коры, ее гетерогенность и тектоническая расслоенность, как на границах тектонических плит, так и далеко внутри последних.

На 4-м этапе развития (1985–2000) разрабатывались технологии объемной сейсморазведки, морской сейсмической томографии. Благодаря этому были уточнены запасы и

контуры крупнейших месторождений нефти и газа, а также запасы морских месторождений твердых полезных ископаемых.

На 5-м этапе развития (с начала XXI века по настоящее время) все вышеуказанные технологии продолжают интенсивно развиваться с тем, чтобы повысить качество и достоверность получаемых данных.

В 1997 г., в связи с 50-летием с момента начала проведения морских геофизических работ, мировая научно-техническая общественность подвела основные итоги работ морской нефтедобывающей отрасли. За эти годы в различных районах Мирового океана выполнено, по различным данным, от 18 до 25 млн км сейсмических профилей. Были созданы различные конструкции разведочных и добычных морских платформ и буровых судов, общее число которых составило несколько тысяч единиц. Возможности их работы при различной глубине непрерывно расширяются, и вполне реальной станет добыча углеводородов с глубин моря до 3,5 км. Если в 1985 г. в мире добывалось всего около 2700 млн т нефти, а доля ее морской части составляла всего 750 млн т (27 %), то уже в 1998 г. доля морской части добытой нефти возросла до 40 % и составила 1500 млн. т. В среднем с момента начала добычи нефти на море процент ее прироста в общемировом балансе добычи составил 0,8 % в год. При этом ожидается, что к 2012–2015 гг. общие объемы добычи нефти на море и суши сравняются, а затем следует ожидать заметного преобладания объемов ее добычи на море.

В основе современной морской сейсмоакустики лежат различные акустические эффекты, но базовые технологии не учитывают:

1. Влияние стабильности параметров (уровень, спектр и др.) изучаемых широкополосных сигналов на качество и достоверность геофизической информации. В настоящее время в качестве зондирующих используются сигналы с изменяющимися во времени уровнями и спектрами частот, формируемые пневмоизлучателями (ПИ).

2. Влияние направленности излучаемых систем на качество и достоверность геофизической информации. В настоящее время для этих целей используются ненаправленные или слабонаправленные ПИ.

3. Влияние направленности приемных систем на качество и достоверность геофизической информации. В настоящее время для этих целей используются сейсмические коды (ССК) – цепочки ненаправленных гидрофонов, буксируемые далеко за НИС.

4. Влияние параметров (нелинейность, плотность, скорость звука и др.) реальной (содержащей различные неоднородности в виде пузырьков воздуха, взвешенных веществ и др.) морской среды на достоверность геофизической информации. В настоящее время пренебрегают нелинейными эффектами, имеющими место в реальной морской среде.

5. Влияние собственных шумов и сигналов, наведенных откликов от мини-землетрясений, а также других внешних воздействий на параметры залежей нефти, качество и достоверность геофизической информации. В настоящее время во внимание принимаются только косвенные данные об отраженных и преломленных акустических волнах.

6. Влияние низкочастотных (от единиц герц до 1 кГц) гидроакустических (обусловленных работой судовых систем и механизмов) и гидродинамических (обусловленных движением) полей судна на качество принимаемых отраженных и преломленных низкочастотных (НЧ) акустических волн, а в конечном итоге, на достоверность геофизической информации. В настоящее время научно-исследовательские суда (НИС) морской геофизики России акустически не аттестованы, регулярный контроль их низкочастотных (НЧ) подводных акустических и гидродинамических полей не налажен, специаль-

ных мер по снижению их уровней не предпринимается. Проблема становится особенно актуальной при работе в «мелком море» – с глубинами менее 400 м.

7. Влияние электрических и акустических параметров корабельных гидроакустических средств, обладающих большим энергетическим потенциалом, на качество и достоверность геофизической информации.

Основным недостатком существующих методов и реализующих их систем сейсморазведки является неиспользование преимуществ метода низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, которая, как будет показано далее, обеспечивает высокую достоверность мобильного поиска углеводородных залежей на морском шельфе [1, 2, 122].

## **5.2. Направления совершенствования морской сейсморазведки**

С учетом возрастающей сложности и стоимости бурения все большее значение приобретают технологии, позволяющие увеличить достоверность прогнозирования углеводородных (УВ) залежей. Сейсморазведка типа «3D», представляя богатый материал для анализа преобразованного геологической средой поля упругих колебаний сейсмоакустического источника излучений, не дает абсолютно достоверной информации, дорога, а в ряде случаев по стоимости сравнима с бурением. Вместе с тем не снижается и процент пробуренных «пустых» скважин, что в немалой степени обусловлено сложностью строения исследуемых сейсморазведкой нефтегазоперспективных районов. Выход из этой ситуации видится как в разработке новых методик и технологий обработки всех характеристик регистрируемых сигналов, так и в комплексировании данных сейсморазведки с данными других методов, поиском новых информационных признаков в данных сейсморазведки, а также с использованием методов нелинейной гидроакустики.

Фактор стоимости, а также уровень современного программного обеспечения подняли интерес к исследованию динамических характеристик отраженного и рассеянного сейсмического поля. Основной проблемой прогнозирования УВ залежей является необходимость моделирования геологической структуры среды, преобразующей волновое поле источника излучения. После построения такой модели возможны вычисления и интерпретация характеристик залежи. Неоднозначность решения этой сложной обратной задачи, где одной и той же конфигурации поля излучений может соответствовать целый набор возможных геологических сред, приводит к большому числу ошибок прогнозирования. Пока не удастся выделить критерии, однозначно свидетельствующие о наличии флюида того или иного качества. В процессе интерпретации слишком много параметров и априорных условий приходится предполагать и использовать.

Возможность повышения достоверности прогноза находится на пути поисков эффектов, непосредственно связанных только с флюидонасыщенностью пласта. Некоторые из направлений этого поиска уже определены, а другие только намечаются. Но эти продвижения, несомненно, приведут к тому, что путь, соединяющий измеренную величину с заключением специалистов о продуктивности обнаруженной залежи, станет короче.

Использование в сейсмической разведке закономерностей нелинейной акустики является фундаментом, на котором будут создаваться и развиваться новые технологии эффективной разведки УВ залежи. Необходимость совершенствования этого направления возрастает. Это связано, с одной стороны, с возросшей сложностью геолого-геофизических задач, которые ставятся нефтяниками перед сейсморазведкой сегодня, с

другой – этому способствуют возрастающие возможности обрабатывающей и регистрирующей аппаратуры. Технические средства сейсморазведки также совершенствуются. Значительный рост их возможностей был отмечен в конце XX века. Переход на широкое использование в регистрирующей аппаратуре многорядных преобразователей открыл новые возможности перед сейсморазведкой в плане использования динамических характеристик сейсмических волн. В сочетании с практически неограниченной многоканальностью применяемой телеметрической аппаратуры это обеспечило специалистам получение эффективного инструмента изучения сложно сформированных геологических сред. Шире используются площадные системы наблюдения по технологии «3D» на стадии поисков нефти и газа. Сейсморазведка на стадии подготовки месторождений углеводородов к детальной разведке бурением в настоящее время считается уже обязательным. Более того, и на стадии эксплуатации месторождений углеводородов многие задачи не могут быть успешно решены без использования результатов сейсморазведки с представлением их в формате «3D». При этом эффективность данной технологии неизмеримо возрастает в тех случаях, когда материалы съемки «3D» квалифицированно анализируются и интерпретируются совместно с данными геофизических исследований скважин.

Несмотря на значительные и общепризнанные успехи сейсморазведки в области поисков и разведки месторождений нефти и газа, теория, методики и техника сейсмической разведки нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Можно предположить, что уже в ближайшем будущем усилия специалистов – сейсмических разведчиков будут направлены на решение следующих задач:

- дальнейшее совершенствование методов и средств по сбору сейсмических данных: снижение стоимости работ, получение большого объема полезной информации путем перехода к трехмерным и (или) трехкомпонентным съемкам типа «3D/3C» на суше и на море;

- широкое использование оптимального компьютерного планирования съемок «2D» и «3D»;

- переход на работы с применением сейсмических волн различных типов (поперечных и продольных);

- более широкое совместное использование наземных и скважных модификаций сейсморазведки «3D» и «ВСП», межскважинного озвучивания, многоволновой сейсморазведки;

- сейсмический мониторинг за процессом разработки нефтегазовых месторождений и экологического состояния окружающей среды;

- разработка, совершенствование и широкое применение новых технологий обработки: сейсмической томографии, сейсмической инверсии, AVO- и AVA-анализа;

- совершенствование способов построения высокоразрешающих глубинных сейсмических разрезов и получения их изображений;

- разработка и внедрение практических путей использования методов низкочастотной и высокочастотной нелинейной акустики для дальнего обнаружения и мобильного поиска залежей на морских акваториях;

- разработка способов эффективного обнаружения зон повышенной трещиноватости, последующего прогнозирования на этой основе зон скопления углеводородов и др.

Успешное решение даже части обозначенных проблем позволит на их основе получать новые геолого-гидрофизические результаты в разнообразных условиях. Сейсмологические наблюдения являются одной из важнейшей составляющей комплекса геолого-геофизических исследований в любом регионе Земли. Сейсмологический метод являет-

ся единственным дистанционным геофизическим методом с большой дальностью действия, обеспечивающим возможность исследование труднодоступных областей. Очевидны научный и прикладной аспекты применения сейсмологических данных. Даже одно только установление факта существования или отсутствия повышенной сейсмичности заметно влияет как на представления о современном геолого-тектоническом положении региона, так и на оценку возможности его промышленного освоения.

В морских сейсмических исследованиях широкополосный гидроакустический сигнал не направлен и через определенные интервалы времени излучается в импульсном режиме с помощью нескольких буксируемых ПИ, распространяется в воде, отражается или преломляется на границах слоев дна и нижележащих пород, а затем снова возвращается по воде к нескольким буксируемым за научно-исследовательским судном сейсмокосам. Исследования на нефть и газ обычно требуют глубокого (до 7–8 км) проникновения акустического сигнала в дно, для чего используются низкие (от 5 до 200 Гц) частоты (НЧ), но такие сигналы не могут дать детальной информации о строении морского дна. В свою очередь, увеличение частоты до единиц килогерц и выше приводит к лучшему разрешению структур дна, но существенно уменьшает проникновение высокочастотного (ВЧ) акустического сигнала в грунт. Из-за использования НЧ диапазона применяются ненаправленные или слабонаправленные линейные излучающие и приемные системы. Данные противоречия предлагается устранить за счет внедрения новых многофункциональных методов и средств нелинейной акустики.

Целью сейсморазведки является установление связи между геологическим строением среды и ее отображением на сейсмозаписях, а также возможность количественной оценки такой связи. Для этого используют разложение сейсмозаписи на некоторый набор параметров. Основная идея такого преобразования заключается в том, что ни один геофизический параметр не имеет прямого отображения в записи. Но при ее инверсии можно надеяться, что геофизические параметры будут иметь более тесные связи с отдельными элементами разложения, что облегчает решение указанной выше задачи. Результаты преобразования сейсмической записи получили в литературе название динамических параметров.

В морских сейсмических исследованиях параметрические излучатели и сейсмические косы буксируются за научно-исследовательским судном вдоль линии профиля. В глубоководных районах судно движется с постоянной скоростью, излучая и принимая сигналы. В мелководных районах сейсмические косы буксируются научно-исследовательским судном над дном в режиме с остановками (старт-стопный режим) – для уменьшения влияния низкочастотных подводных акустических и гидродинамических помех.

Физической основой сейсмического метода разведки углеводородных залежей является зависимость скорости распространения упругих волн, возбужденных искусственным путем, от минерального состава и структуры излучаемых пород. Поэтому, зная скорости распространения упругих волн в различных породах и определив время прохождения упругой волны, вызванной взрывом, можно установить породы и глубины их залегания на площади разведки. Упругая волна распространяется от точки взрыва радиально со скоростью, определяемой упругими свойствами среды и ее плотностью. Встречая границу, отделяющую возбужденную среду от другой, с иными упругими свойствами акустическая волна частично отражается и частично следует далее вдоль границы в виде преломленной волны со своими скоростями в каждой из сред. Основным является метод отраженных волн, так как он обладает высокой эффективностью в определении структуры слоев. Элементарная теория данного метода сводится к сле-

дующему: время, прошедшее с момента создания упругой волны и до фиксации ее отражения от слоя с иной акустической жесткостью, равно отношению двукратной глубины залегания слоя к средней скорости распространения упругих волн в среде, покрывающих границу раздела. В зависимости от геологического строения обследуемого участка земной коры возможно при одном взрыве наблюдать на сейсмограмме достаточно большое число отражений от различных горизонтов и получать представление о характере и глубинах их залегания.

Другой метод – метод преломленных волн – используется для выявления скачков скорости звука, возникающих в случаях, когда над материалом с большей скоростью находится материал с меньшей скоростью звука. Обе скорости легко определить. Данный метод используется как для прослеживания резких, глубоко расположенных границ, так и для определения скоростной структуры приповерхностных слоев, необходимой для коррекции измерений по методу отраженных волн. Элементарная теория метода преломленных волн сводится к следующему: согласно принципу Гюйгенса каждая точка, находящаяся на поверхности фронта упругой волны, является вторичным источником колебаний. Поэтому если в подстилающей среде скорость распространения упругих волн будет больше, чем в покрывающей, то время, затраченное на прохождение упругой волны от источника взрыва до преломляющей границы, далее вдоль этой границы и затем снова к поверхности может оказаться меньше, чем время, необходимое для пробега упругой волны от источника взрыва до сейсмоприемника по прямому направлению. В этом случае колебания сейсмографа первыми зарегистрируют приход преломленной волны. Зная расстояния между местом взрыва и группой сейсмоприемников, можно построить график зависимости времени прихода акустических волн от расстояния между точкой взрыва и сейсмографом, называемым годографом. Частным случаем наблюдения преломленных волн являются рефрагированные волны, возникающие в случае, если скорость в нижней среде непрерывно возрастает с глубиной.

Обработка годографов дает возможность определить глубину залегания преломляющей границы и скорости распространения волн в подстилающей среде. Обычно сбор данных ведут вдоль заданной линии профиля. Для выполнения сейсмического сноса (миграции данных) требуется знать наклоны структур поперек профиля, которые могут быть измерены методом трехмерного сейсмического мониторинга земной коры.

Во всех сейсмических методах используется большое число каналов приема. Это обеспечивает разделение различных типов волн и прием сигналов от тех отражающих объектов, которые теряются из-за плохой отражательной способности или из-за сильного затухания сигнала. Кроме того, избыток получаемых данных позволяет обрабатывать их на ЭВМ, чтобы улучшить отношение сигнал/шум и определить некоторые параметры среды, через которую распространяются акустические волны.

Известен способ увеличения объема информации о среде, основанный на применении так называемого метода общей глубинной точки (ОГП), в котором используются несколько сигналов, отразившихся от одной точки, но пришедших в нее по разным путям. В сейсмике в основном работают с продольными волнами, но наблюдается увеличение интереса к поперечным волнам. В последние годы в морской сейсморазведке также интенсивно развивается методика сбора, обработки и интерпретации данных обменных волн, регистрируемых на дне моря, называемая многоволновой сейсморазведкой, или сейсморазведкой «4С». Последнее название отражает особенность устройства регистрирующих систем, где используются гидрофоны, расположенные по осям X и Y для записи обменных волн PS, вертикальный геофон Z и дополнительный гидрофон для записи продольных волн P. Таким образом, получается 4 набора сейсмических данных

вместо одного, как это происходит при работе с буксируемой в толще воды сейсмической косы, каждый из которых содержит дополнительную информацию о строении геологического разреза. Использование обменных волн несет в себе значительное количество преимуществ, что обеспечивает возможность его развития, по сравнению с традиционной морской сейсморазведкой.

Главное различие в природе между продольными и обменными поперечными волнами заключается в том, что первые «реагируют» на присутствие флюида (нефть, газ, газоконденсат, вода) в породах. В то время как поперечные волны «чувствуют» только жесткую структуру, или, другими словами, скелет горных пород. Это создает возможность получения с использованием технологии «4С» полной информации о строении геологической среды и коллекторного пласта там, где использование продольных волн остается малоэффективным в силу влияния на распространение присутствующего флюида или других факторов.

Таким образом, первое (главное) преимущество использования сейсморазведки «4С» заключается в значительном улучшении визуализации структуры геологического разреза, особенно в областях, где продольные волны не дают хорошего результата. К таким областям относятся: зоны высокого газонасыщения осадочного разреза (так называемые «газовые ореолы») и области развития грязевых вулканов, то есть зоны, характеризующиеся незначительной разницей акустических импедансов в поле Р-волн, области развития интенсивных разрывных нарушений, а также зоны образования многократных волн-помех. Кроме того, это позволяет почти со 100 % уверенностью отличать аномалии типа «яркого пятна», характерные для газовой залежи, от аномалий, соответствующих литологическим неоднородностям разреза.

Помимо преимуществ в визуализации структуры геологического разреза обменные волны несут в себе богатую информацию о динамических параметрах волнового поля. Анализ волнового поля, наряду с использованием скоростей Р- и S-волн, дает выход на прогнозирование флюидо-насыщения и литологического состава разреза, латеральное прослеживание распространения коллекторного пласта и прогноз анизотропии. В этой связи практический и научный интерес представляет новый метод мобильного поиска залежей углеводородов в морском дне, основанный на применении разработок низкочастотной и высокочастотной нелинейной гидроакустики, который способен эффективно реализовать технологии «4С» и томографическое наблюдение пространственно-временных характеристик и динамики измеряемых геофизических полей на протяженных морских акваториях.

### **5.3. Способ и параметрическая система приема геофизических полей источников морского дна**

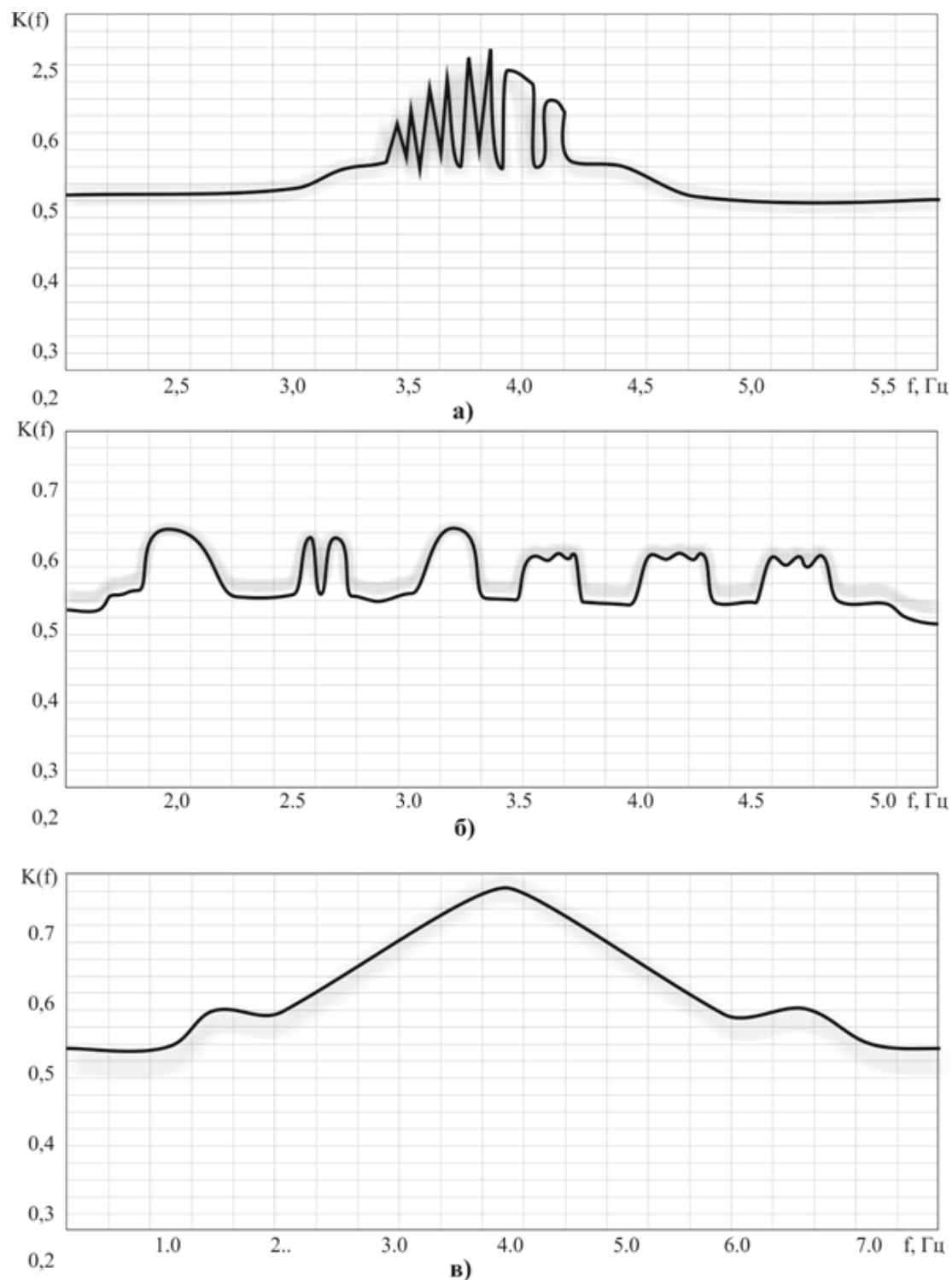
Задачи, на решение которых направлены гидроакустический способ и реализующая его система приема геофизических полей источников морского дна, выражаются в достижении дальнего параметрического приема и измерении пространственно-временных и спектральных характеристик, динамики геофизических волн, формируемых неоднородностями морского дна, преимущественно углеводородными залежами, на обследуемых акваториях. Такое решение основано на совместной реализации новых научно-технических разработок нелинейной акустики (низкочастотной просветной и высокочастотной реверберационной) гидроакустики, параметрическом приеме геофизических



волн в широком диапазоне частот, формируемых углеводородными залежами на морском шельфе [122, 129, 135, 233-235].

Способ и система мониторинга характеристик полей среды и морского дна, а также мобильного поиска источников их формирования включают следующие операции. В контролируемой морской среде формируют протяженную рабочую зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования измеряемых информационных волн с низкочастотными просветными волнами. Для этого приемный блок системы мониторинга формируют из двух горизонтально разнесенных приемников и размещают в центре обследуемой акватории, а излучающий блок формируют как двойной (низкочастотный и высокочастотный), размещают его на противоположной границе акватории и устанавливают на подвижном судне-носителе. При поиске источников информационных волн его используют для горизонтальной подсветки в направлении приемного блока, а также для накачки среды в направлении морского дна и формирования в ней горизонтальной и вертикальной параметрических антенн, которые перемещают по периметру обследуемой акватории. При этом волны подсветки среды, взаимодействующие с измеряемыми информационными, принимаются горизонтально-разнесенными приемниками, тракты которых двухканально усиливают их в полосе частот параметрического преобразования, измеряют разность фаз и переносят временной масштаб в высокочастотную область; затем выделяют их узкополосные спектры, определяют в них и регистрируют параметрические составляющие нижней и верхней боковых полос; по ним с учетом параметрического и частотно-временного преобразования волн накачки, а также направлений параметрических антенн восстанавливают и фиксируют характеристики измеряемых информационных полей, например частотного диапазона, интенсивности, пространственно-временной и спектральной структуры. По максимальным проявлениям указанных характеристик определяют направления прихода информационных волн. Далее по этим направлениям расположенные на судне-носителе излучающие блоки поисковой системы перемещают в точку расположения приемного блока, затем на удаление от него; измеряют и уточняют местоположения источников излучений информационных волн. В местах расположения источников прямолинейное перемещение двойного излучающего блока изменяют на знакопеременное, например на движение по «змейке». Затем выполняют наблюдение и измерение признаков пространственно-временной динамики их характеристик, а по ним осуществляют идентификацию волн и их принадлежность к водным гидрофизическим или донным геофизическим волнам.

При обнаружении геофизических волн их спектральные характеристики сравнивают с обобщенными эталонными спектрами, которые получают в местах действующих нефтедобывающих скважин, и судят о их принадлежности к конкретным скоплениям углеводородов, например газовым, газоконденсатным или залежам с притоком газа. Далее определяют пространственную протяженность обнаруженной углеводородной залежи. Кроме того, при сближении излучающего блока с приемным и удалении от него контролируемую среду дополнительно облучают направленным в сторону морского дна электромагнитным излучением с частотами, близкими к волнам акустической подсветки обследуемой акватории. При определении размеров УВ залежи отклонения носителя излучающего блока от прямолинейного курса в зависимости от размеров площади обследуемой акватории, а также пространственных размеров УВ залежи выполняются круговыми траекториями или перемещением по расходящейся спирали.



*Рис. 5.1.* Спектр излучения сейсмических волн земной коры:  
 а – углеводородной залежью; б – залежью газоконденсатного скопления;  
 в – залежью с притоком газа

На рис. 5.1 приведены, используемые как эталонные, спектры геофизических волн морского дна, сформированных углеводородными залежами при различной степени их насыщения газом и нефтью.

Газовая залежь (рис. 5.1, а) характеризуется следующими признаками. На спектрограмме наблюдаются сплошные и дискретные шумы с уровнями их превышений над фоном 10 и 45 % соответственно. Дискретный ряд представляет собой несимметричный

колокол, состоящий из трех двойных и двух (более широких) одиночных составляющих в интервале частот около 3,4–4,2 Гц, а его максимум – на частоте около 3,8 Гц.

Газоконденсатная залежь (рис. 5.1, б) характеризуется следующими признаками. В интервале частот около 1,8–4,8 Гц приведенная к фону спектральная мощность собственных шумовых излучений залежи примерно на 5 % превышает фон. При этом в диапазоне частот от 2,0 до 3,4 Гц над сплошным шумом регистрируется «лежащая на спине буква Е», у которой две широкие (по 0,2 Гц) дискретные составляющие, в пределах 25 % превышающие сплошной шум и на 30 % превышающие фон. Центральная линия как двойная составляющая примерно на 15 % превышает сплошной шум и на 20 % превышает фон. В диапазоне частот от 3,5 до 5 Гц регистрируется «изрезанный меандр» (серия из трех разрезанных прямоугольников), в котором уровень «меандра» превышает сплошной шум примерно на 15 % и на 20 % – фон. Залежь с притоком газа (рис. 5.1, в) характеризуется следующими признаками. В диапазоне частот от 1,0 до 7,0 Гц приведенная к фону спектральная мощность собственных шумовых излучений залежи примерно на 10–20 % превышает фоновый уровень. При этом в диапазоне частот от 2,0 до 5,5 Гц регистрируется равнобедренный «треугольник» с вершиной (максимумом спектральной плотности) на частоте около 4,0 Гц, который превышает уровень фона примерно на 40 %.

Основной вклад в эффективность преобразования высокочастотного сигнала в низкочастотные гармоники вносит так называемый нелинейный параметр воды  $E$ , который, как правило, незначителен. Например, для дистиллированной воды  $E = 3,1$  при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $E = 3,5$  при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $E = 3,7$  при  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для морской воды при солености 35 ‰ в диапазоне температур от 20 до  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  величина  $E = 3,6$ . Экспериментальные работы, проведенные в открытом море, показали, что коэффициент нелинейности в широком диапазоне частот до глубин 300 м меняется незначительно и не превышает 4. Поэтому принципиально новых эффектов в открытом море на различных глубинах ожидать невозможно. В этом случае необходимо применять специальные технологии повышения нелинейности среды, которые могут быть реализованы методами нелинейной акустики.

Известно, что характеристики гидрофизических полей морской среды, в которой распространяется гидроакустическая волна, влияют на ее параметры [20]. Влияние гидрофизических полей осуществляется через изменение плотности и коэффициента упругости среды. По своей физической сущности способ и реализующая его параметрическая система предусматривают изменение плотности и температуры в протяженной зоне параметрического взаимодействия волн различной физической природы, которое является следствием воздействия на морскую среду полей, формируемых комплексом информационных сигналов, распространяющихся в обследуемой акватории.

В отличие от классических уравнений гидродинамики для идеальной жидкости в теории нелинейных параметрических излучателей используют уравнения, где фазовая скорость упругой волны изменяется во времени и пространстве по закону изменения электромагнитной волны. Таким образом, если в рабочей зоне параметрической системы распространяется электромагнитная волна гармонической частоты, то фазовая скорость упругой (просветной акустической) волны также будет меняться с той же частотой.

На рис. 5.2 приведена структурная схема измерительной системы мониторинга, реализующая способ дальнего параметрического приема в морской среде и измерения характеристик геофизических и гидрофизических полей источников водной среды и морского дна. На рис. 5.3 приведена схема обследования акватории, измерения характеристик полей, определения местоположения и горизонтальной протяженности источников геофизических и гидрофизических волн.

Как показано на рис. 5.2, система включает двухканальный тракт формирования низкочастотных сигналов подсветки среды, а также высокочастотных сигналов накачки среды 1. Тракт формирования и усиления низкочастотных сигналов подсветки морской среды и высокочастотной накачки морского грунта, представляет собой двухканальную электронную схему, содержащую последовательно соединенные блоки: генераторы стабилизированной частоты 9 и 12; усилители мощности 10 и 13; блоки согласования 11, 14, а их выходы с подводными кабелями и далее с низкочастотным и высокочастотным преобразователями 2, 3.

Система включает также приемный тракт нелинейно преобразованных просветных сигналов 15, обеспечивающий усиление, выделение и регистрацию информационных волн. Вход тракта по радиоканалу соединен с расположенными на поверхности морской среды радио модулями 7 и 8 и далее по кабелям с акустическими преобразователями волн 5, 6. Приемный тракт измерительной системы 15 представляет собой электронную систему, которая включает. Последовательно соединенные блоки: двухканальный приемный радио блок 16, двухканальный широкополосный усилитель 17. Выходы усилителя соединены с блоком измерения разности фаз 18, его выход с преобразователем частотно-временного масштаба просветных сигналов в высокочастотную область 19, далее с узкополосным анализатором спектров 20, выход которого соединен с рекордером или иным носителем выделяемых спектров информационных волн 21.

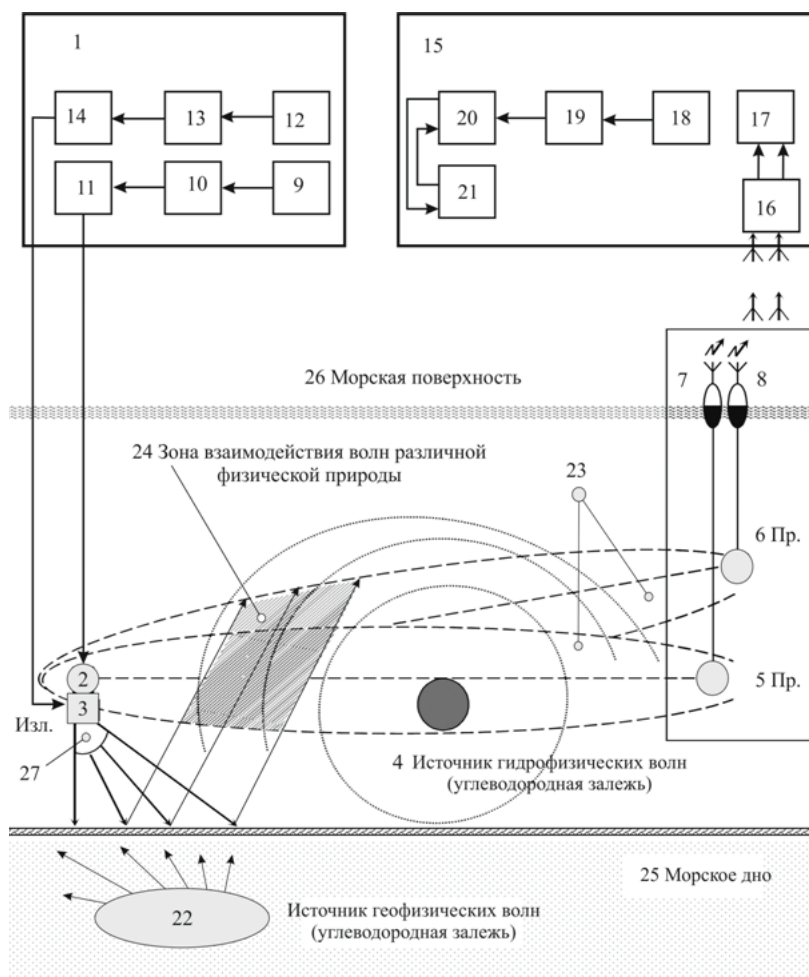


Рис. 5.2. Структурная схема способа и гидроакустической системы параметрического приема гидрофизических и геофизических волн, поиска их источников на морских акваториях

На рис. 5.2 представлены: источник формирования гидрофизических информационных волн 4; рабочая зона нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн 24, низкочастотные просветные параметрические антенны 23; источник формирования геофизических волн морского дна 22; морское дно 25; поверхность обследуемой акватории 26; характеристика направленности дополнительного излучения (накачки) среды в сторону морского дна 27.

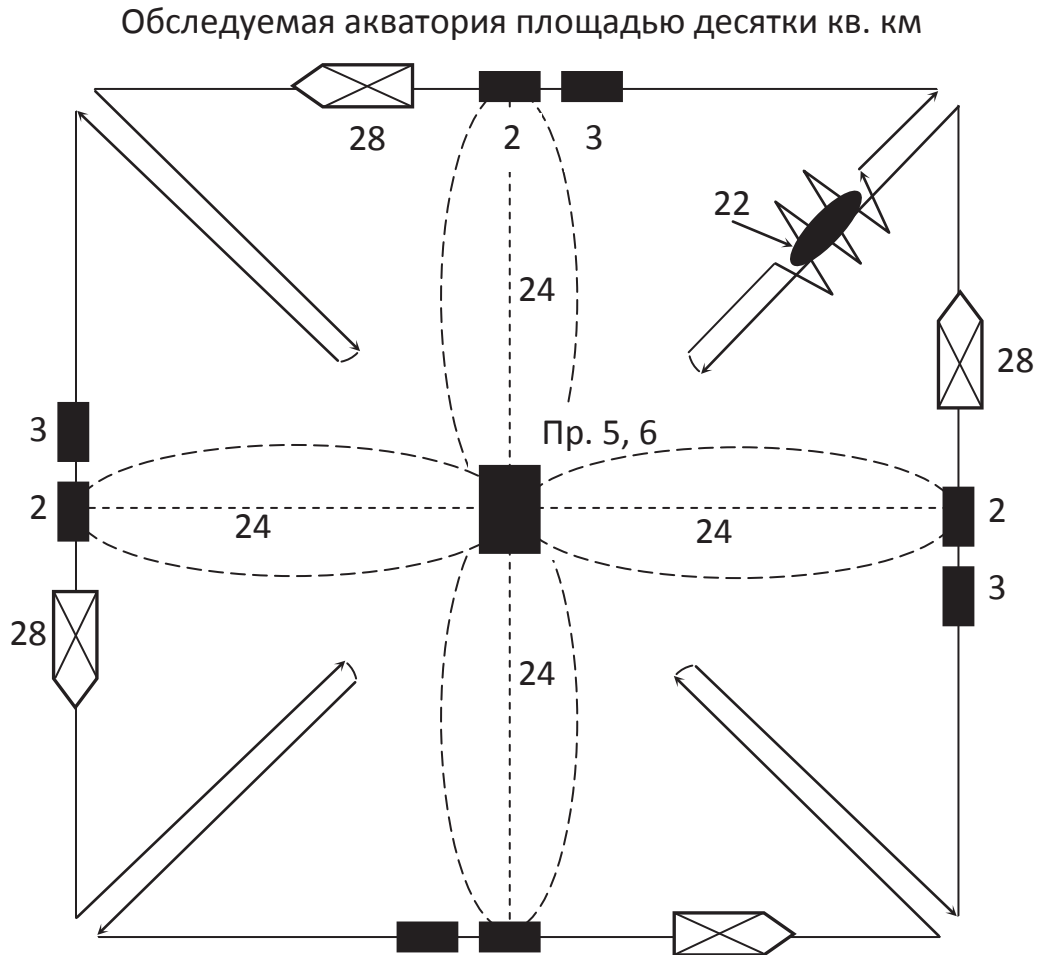


Рис. 5.3. Схема обследования акватории мобильной поисковой системой мониторинга характеристик полей морской среды

Способ и система реализуются следующим образом. Процесс приема информационных волн начинается с перемещения сформированной просветной параметрической антенны по периметру обследуемой акватории. При обнаружении признаков информационных волн носитель (рис. 5.3) 28 излучающего преобразователя перемещают в сторону сближения, а затем на удаление от приемных преобразователей (центра акватории) и уточняют места расположения и протяженности источников информационных волн. В обнаруженных местах определяют их координаты. Излучатели перемещают по траектории вида «змейка» и определяют ширину залежи УВ. При этом производят наблюдения и измерения пространственно-временных характеристик и динамики волн. Далее судно – носитель излучающего блока возвращается в исходную точку периметра акватории, из которой процесс обнаружения и поиска источников информационных волн продолжается (повторяется) по всему периметру акватории.

Закономерность измерения гидрофизических и геофизических волн просветным параметрическим методом в поисковой радиогидроакустической системе реализуется следующим образом. Воздействие гидрофизических и геофизических информационных волн 4 и 22 (рис. 5.2) приводит к изменению механистических характеристик морской среды (плотности и температуры, которые модулируют сигналы накачки). При пропускании по такой модулированной в пространстве нелинейной упругой среде акустической волны накачки ее параметры будут модулированы за счет изменения фазовой скорости по трассе распространения. Возникающие в результате нелинейного взаимодействия волн гармоники проявляются как модуляционные составляющие амплитуды и фазы низкочастотных волн накачки. Являясь неразрывно связанной компонентой низкочастотной просветной волны, они переносятся на большие расстояния и затем выделяются (обнаруживаются) в блоках обработки приемного тракта системы мониторинга.

Усиление нелинейного взаимодействия геофизических волн источников морского дна, а также эффективности дальнего приема, последующей идентификации измеряемых геофизических и гидрофизических волн и определения их местоположения обеспечивается за счет дополнительного направленного облучения морского дна сигналами близкой по частоте к акустической подсветке среды, что обеспечивает «тройное» нелинейное взаимодействие волн (просветных в направлении трассы, дополнительных в направлении дна и информационных) в морской среде.

Повышенный эффект нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн достигается за счет соизмеримой с протяженностью среды пространственной рабочей зоны взаимодействия волн, а также дополнительного облучения среды в направлении морского дна.

Результаты испытаний способа и системы параметрического приема геофизических волн и мобильного поиска источников их формирования представлены на рис. 5.4, 5.5. На рис. 5.4 приведен спектр шумоизлучения движущегося морского судна, на котором наблюдаются гидродинамические и резонансные составляющие (частота подсветки среды – 400 Гц, протяженность обследуемой акватории – 30 км). На рис. 5.5 приведены спектрограмма и спектр акустических сигналов подсветки среды с частотой 390 Гц, модулированных вально-лопастными излучениями морского судна; протяженность трассы – 40 км.

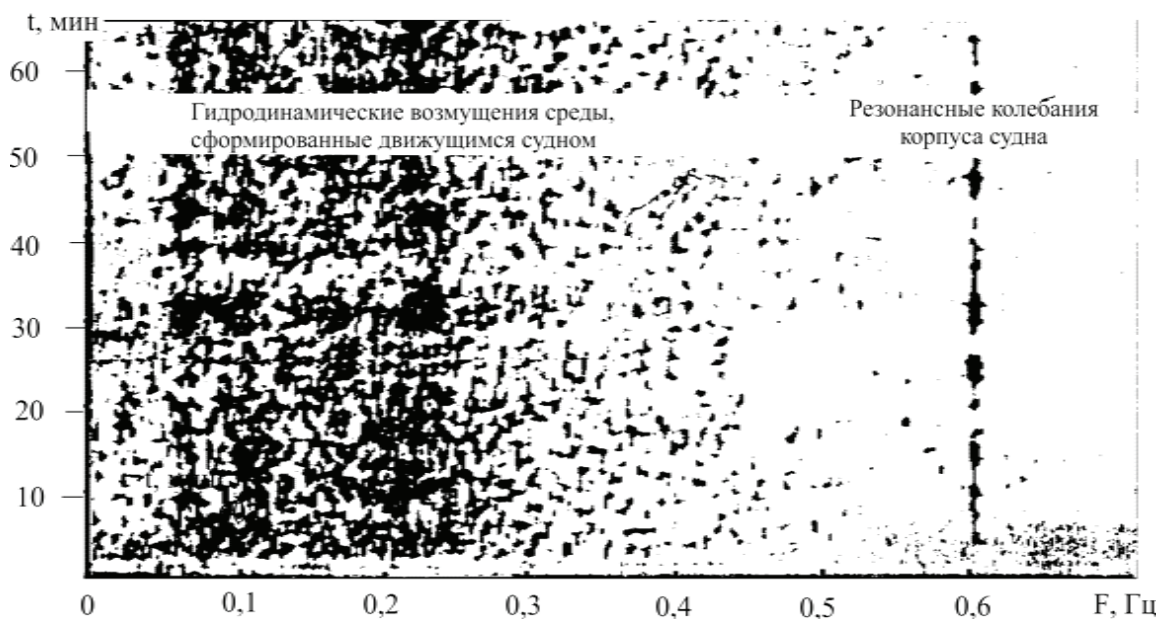
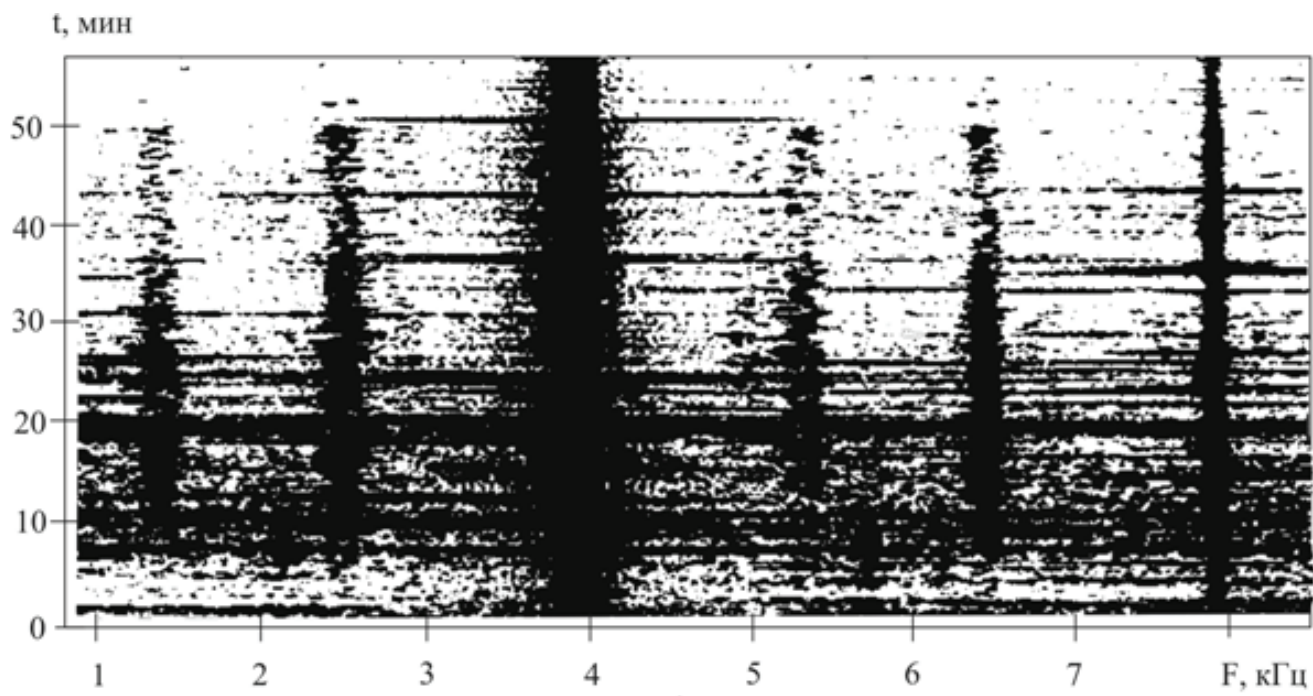
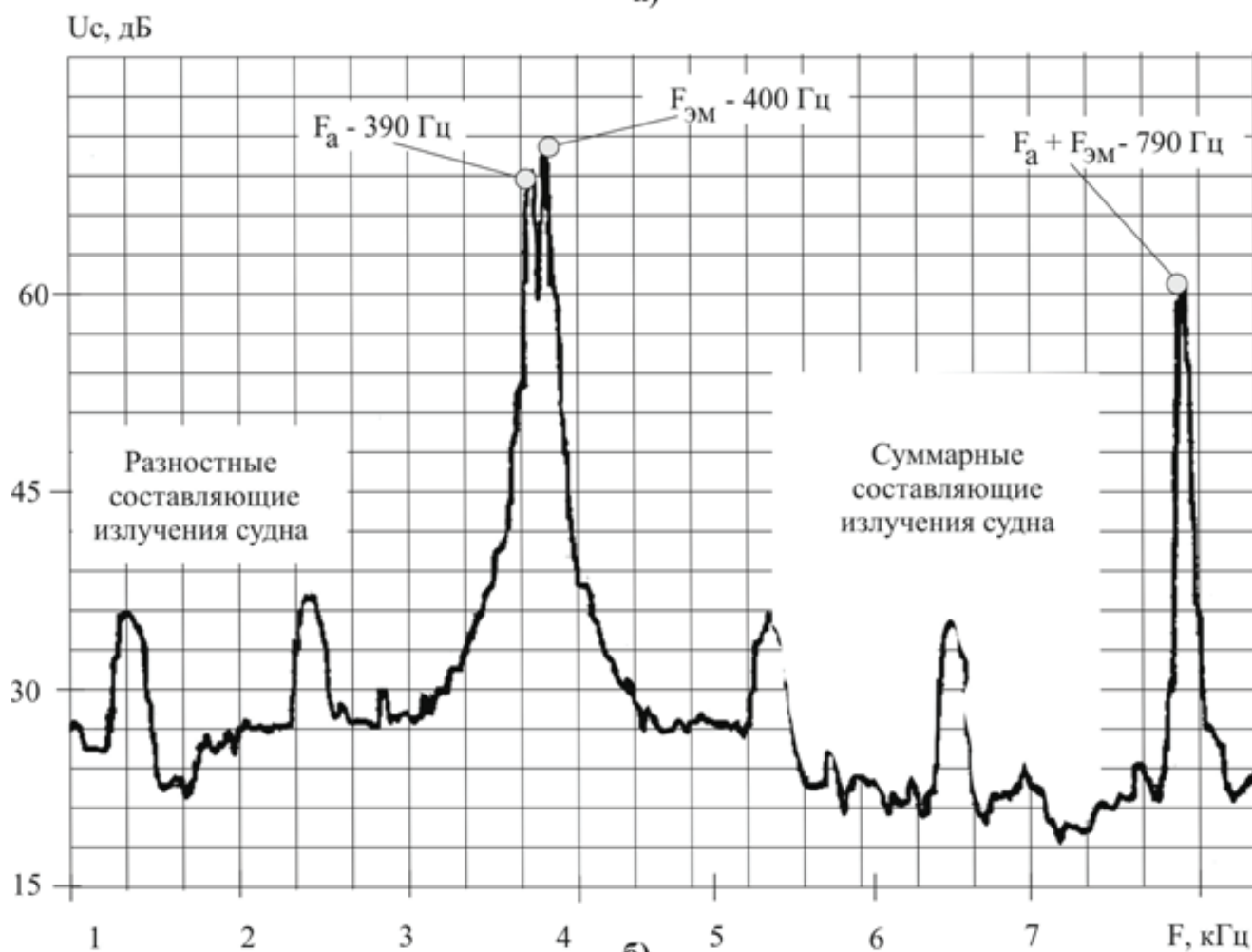


Рис. 5.4. Спектр акустического поля морского судна



а)



б)

Рис. 5.5. Спектрограмма (а) и спектр акустических сигналов подсветки среды модулированных электромагнитными излучениями морского судна с частотой 400 Гц (б)

*В пятой главе:*

– на основе разработок совместной реализации низкочастотной просветной и высокочастотной нелинейной гидроакустики предложен способ и система дальнего параметрического обнаружения и измерения пространственно-временной и спектральной структуры гидрофизических и геофизических волн, формируемых водными и донными морскими источниками в инфразвуковом и дробном диапазонах частот;

- разработаны способ и система мобильного поиска залежей углеводородов на морском шельфе на основе измерительных технологий нелинейной высокочастотной и низкочастотной просветной гидроакустики.

Рассмотренные результаты исследований и технических разработок могут быть эффективно использованы в создании Дальневосточной системы освещения и мониторинга полей различной физической природы, формируемых источниками океанской среды и морского грунта [122, 129, 135, 233-235].



## 6. ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

### 6.1. Информационно-аналитическая система расчета параметров гидроакустического поля

Информационно-аналитическая система методом вычислительного эксперимента должна обеспечивать оценку параметров гидроакустического поля (ПГАП) заданного района, работая как с данными натурных измерений, так и осуществляя автоматизированную выборку данных из баз, основанных на обобщении многолетней гидрологической информации. Структура информационно-аналитической системы (ИАС) определяется ее функциональным назначением и включает [67, 68]:

- базы данных многолетних наблюдений за наиболее значимыми параметрами канала распространения звука (поле скорости звука, рельеф дна, статистические данные о грунте, льде и поверхностном волнении);
- методы для реализации моделей данных о характеристиках канала распространения акустических волн и закономерностей формирования звукового поля в рассматриваемых районах;
- динамические библиотеки, обеспечивающие автоматизированную подготовку исходных данных из баз данных;
- программно-математическое обеспечение для расчета ПГАП и статистического анализа результатов расчетов.

Процедуры формирования модели данных о гидролого-акустической обстановке (ГАО) складываются из:

- выбора методики прогноза ПГАП, позволяющей получить наиболее адекватные оценки для природных условий заданного района и рабочих характеристик используемых технических средств;
- определения формы представления результатов пользователю, позволяющей убедиться в достоверности формируемых моделей данных для оценки эффективности гидроакустических средств;
- оценки адекватности полученных моделей данных реальным характеристикам среды.

Аналитические свойства системы связаны с формированием статистических описаний анализируемых параметров в виде их стандартизованных функций, позволяющих наиболее полно оценить поведение параметра в заданной пространственно-временной области, дать вероятностную оценку не только дальности действия гидроакустических средств, но и площади зоны освещения подводной обстановки. В качестве анализируемых параметров могут быть рассмотрены аномалия распространения, потери на распространение, оптимальный угол наклона характеристики направленности антенны и др. Общая структурная схема ИАС представлена на рис. 6.1.

Основным элементом структуры информационно-аналитической системы является методика расчета и анализа количественных оценок гидролого-акустической обстановки. Постоянное увеличение объема измеренных данных о состоянии морской среды определяет возрастающие требования к прогнозу гидролого-акустической обстановки, например обеспечение оценки параметров гидроакустического поля для шельфовых, фронтальных, вихревых зон и районов со сложным рельефом дна. Исходя из этого была разработана методика и программа расчета ПГАП «Дальность» [74], с контролем критериев применимости лучевой теории, условий отражения от взволнованной поверхности моря и ледового покрова, с учетом акустических свойств грунта и переменного рельефа дна.

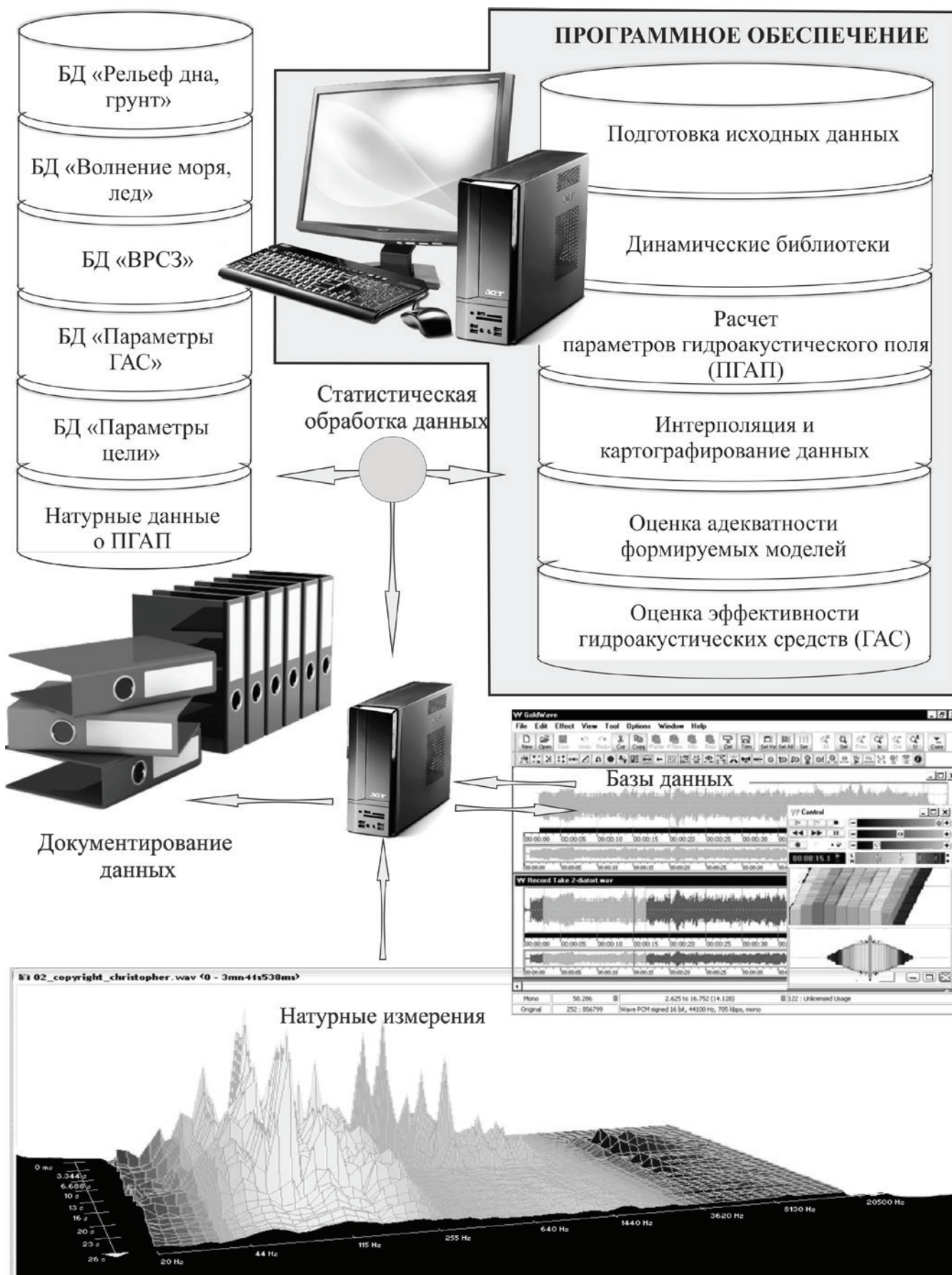


Рис. 6.1. Структурная схема информационно-аналитической системы

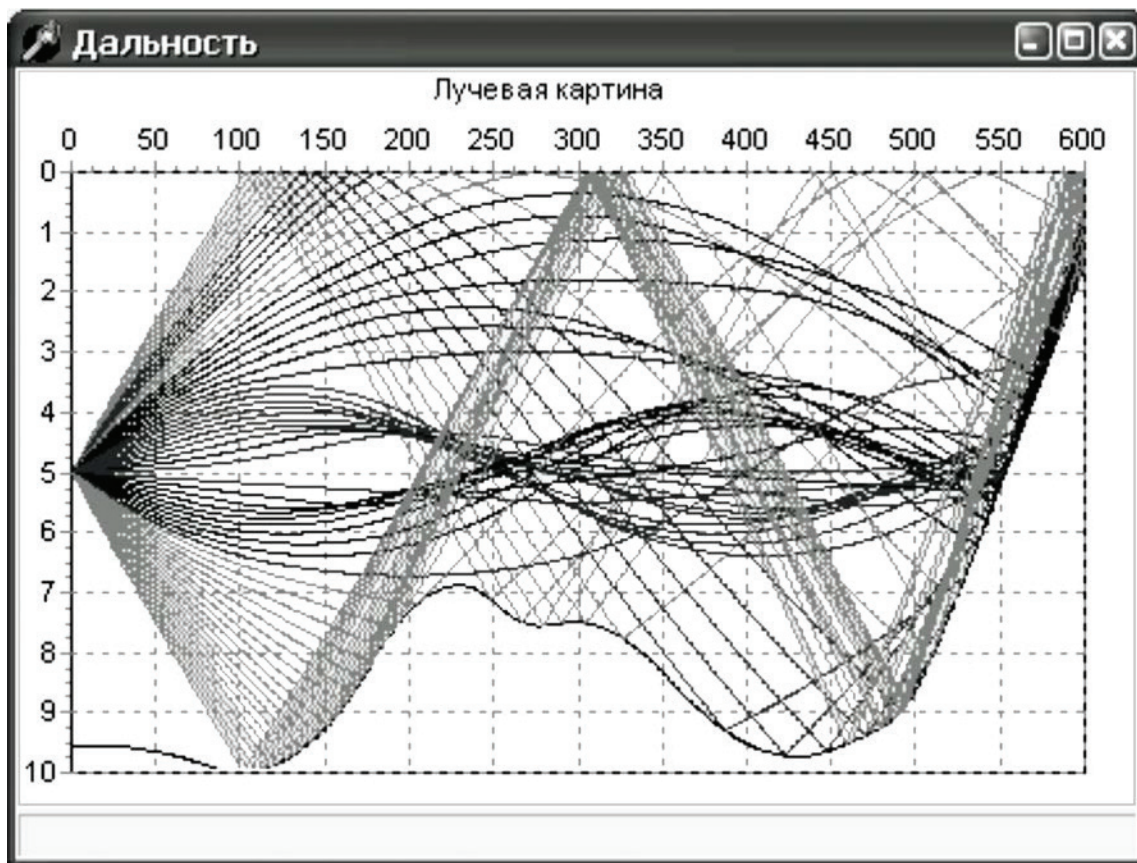


Рис. 6.2. Расчет траекторий лучей, проходящих мелководный участок

«Дальность» отличалась от ранее разработанных методик [71] тем, что горизонтальные неоднородности поля скорости звука представляются в ней по дистанции набором элементарных одномерно-слоистых задач, что обеспечивает более устойчивую и быструю по времени работу программного продукта в сложных гидрологических условиях.

Пример лучевой картины, рассчитанный по программе «Дальность» для мелководного участка, приведен на рис. 6.2.

На время работы программного модуля для расчета параметров гидроакустического поля оказывает влияние не только быстродействие компьютера, но и вычислительный процесс, обусловленный алгоритмом решения задачи. Задача моделирования распространения звука в океане из-за ветвления вычислительного процесса алгоритмически сложная. Построение лучевых картин состоит из большого числа условных операторов (проверок на прохождения траектории луча через слои, на отражение от поверхности или дна моря, на условие полного внутреннего отражения, на применимость лучевой теории и т.д.). В зависимости от результатов условных операторов, выполняется то или иное действие.

Организация вычислительного процесса также связана с формированием массивов данных. Расчет лучевых картин предполагает вычисление и запись в массив следующих параметров: координат точек траектории луча, скорости звука, угла скольжения, времени распространения. Число элементов массива, описывающего траекторию луча, складывается из количества шагов по трассе, количества точек полного внутреннего отражения и точек отражения от дна и поверхности. Для оценки времени работы информационно-аналитической системы на компьютере с процессором Pentium 4 Celeron 1,7 ГГц и оперативной памятью 512 Мб проведено тестирование по следующим исходным

данным – из базы данных для 12 месяцев по 17 трассам выбрано 306 профилей вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) с 36 горизонтами; длина трасс расчета составляла 500 км, число лучей – 400 шт., частота излучения – 750 Гц. Общее время расчета параметров гидроакустического поля составило 2,7 ч. Время расчета ПГАП по одной трассе колебалось от 41 до 58 с. Текстовые файлы со значениями потерь на распространение звука заняли место на диске 1,4 Мб, текстовые файлы с описанием профилей вертикального распределения скорости звука и рельефа дна – 78,5 Мб.

Если стремиться к более полному описанию структуры поля скорости звука и принимать в качестве исходных данных профили вертикального распределения скорости звука с несколькими тысячами горизонтов, то время выполнения программы существенно увеличится, за счет значительного увеличения числа проверок и вычислительных операций на границе каждого слоя. Например, вариант расчета параметров гидроакустического поля для профиля ВРСЗ с 3077 горизонтами считался 562 с, в 187 раз дольше, чем вариант для профиля ВРСЗ с 34 горизонтами (стандартные горизонты и характерные точки профиля) – 3 с, а разность потерь при распространении звука не превышала 4 дБ для 75 % значений.

Основным критерием применимости методики для расчета параметров гидроакустического поля является адекватность модели данным натурным измерениям. Критерием может служить точность измерения уровня звукового давления в морских условиях, которая может изменяться в пределах от 2 до 4 дБ.

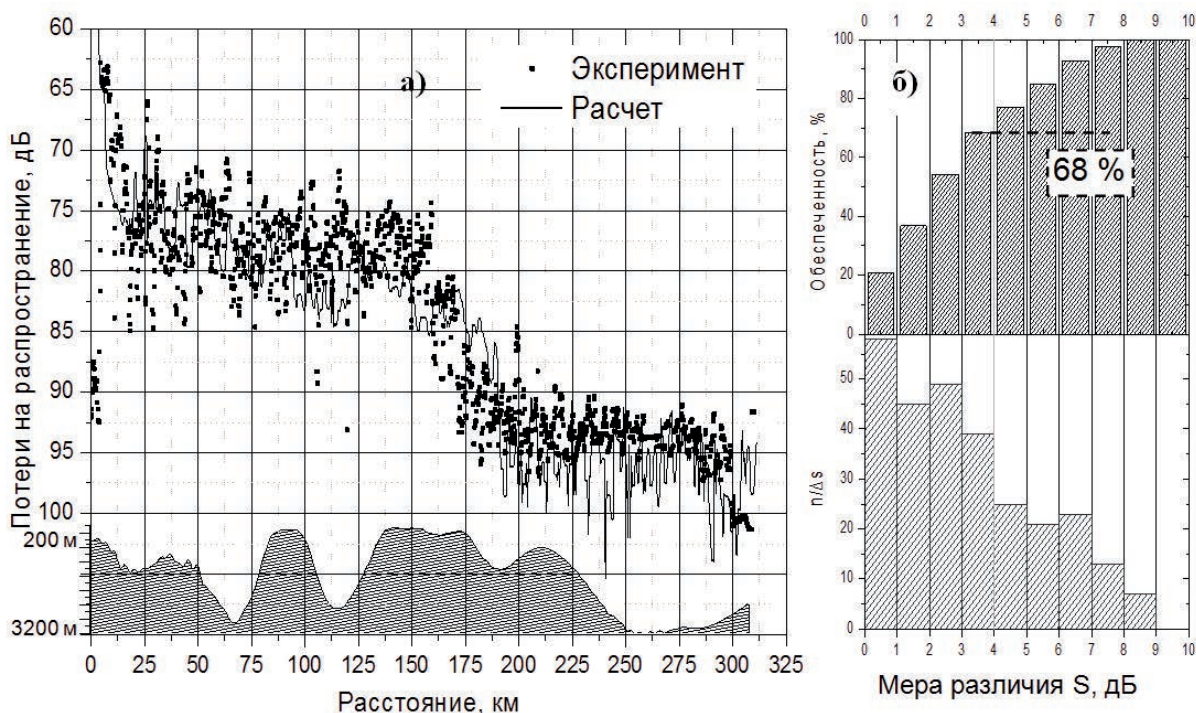


Рис. 6.3. Сравнение результатов расчета ПР по программе «Дальность» с натурными измерениями (а) и оценка обеспеченности меры различия S (б).  
 Трасса – КЗ («Восток-90»), частота – 108 Гц, источник – 50 м, приемник – 520 м (на графике ПР представлен характер рельефа дна по трассе)

Сравнение результатов расчета потерь при распространении звука по программе «Дальность» с натурными измерениями проиллюстрировано на рис. 6.3. Для сравнения используется мера различия вида  $S = |S(\text{ПР}; \text{ПР}_x)|$ , где ПР<sub>x</sub> – потери на распространение

звуча, вычисленные по эталонной программе или полученные в ходе эксперимента; ПР – потери на распространение звука, вычисленные по программе «Дальность».

Функция относительной плотности меры различия  $S$  иллюстрирует, что 68 % данных входит в интервал от 0 до 4 дБ. Это позволяет сделать вывод, что результаты программы «Дальность» хорошо согласуются с натурными измерениями потерь на распространение звука, полученными в ходе экспедиционных исследований.

Оценка адекватности методики расчета параметров гидроакустического поля может быть получена при ее сравнении с апробированными программами. Такой подход оправдан, если речь идет о прогнозе потерь на распространение звука в районе со сложными гидрологическими условиями, где большое время проведения натурных измерений на протяженной трассе отдаляет полученные результаты от истинных. Сравнение результатов расчетов программы «Дальность» с программами «Горизонт» и «FIELD», ранее зарекомендовавшими себя на практике, показало их хорошее согласование.

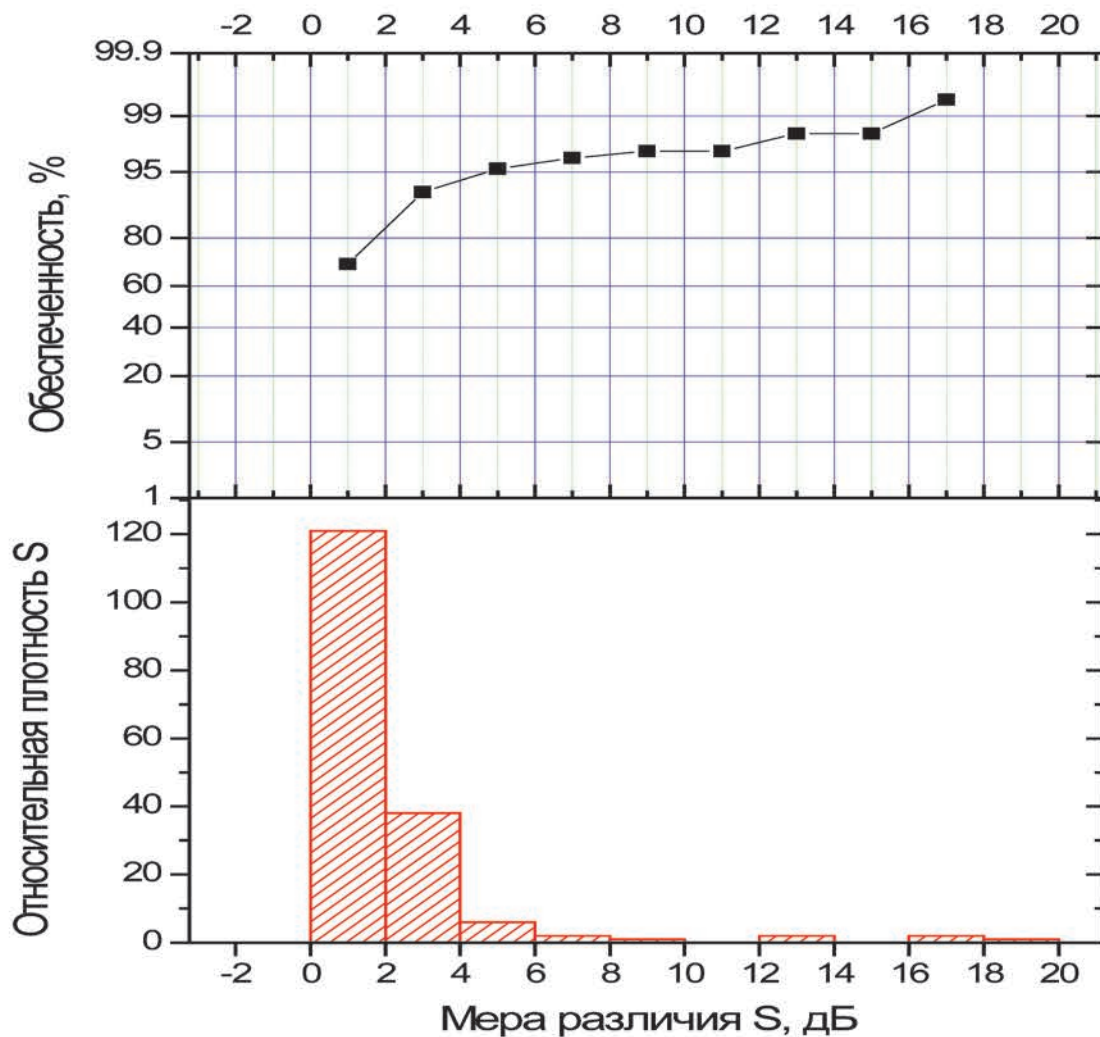


Рис. 6.4. Функция относительной плотности величины меры различия  $S$ , дБ, потерь на распространение звука

В качестве примера на рис. 6.4 представлена функция относительной плотности меры различия  $S$  при сравнении программ «Дальность» и «FIELD», иллюстрирующая, что 90 % данных о потерях на распространение звука входят в интервал от 0 до 2 дБ.

Проведена оценка применимости программы «Дальность» для расчета параметров гидроакустического поля по натурным данным поля скорости звука при вторжении синоптического вихря (рис. 6.5).

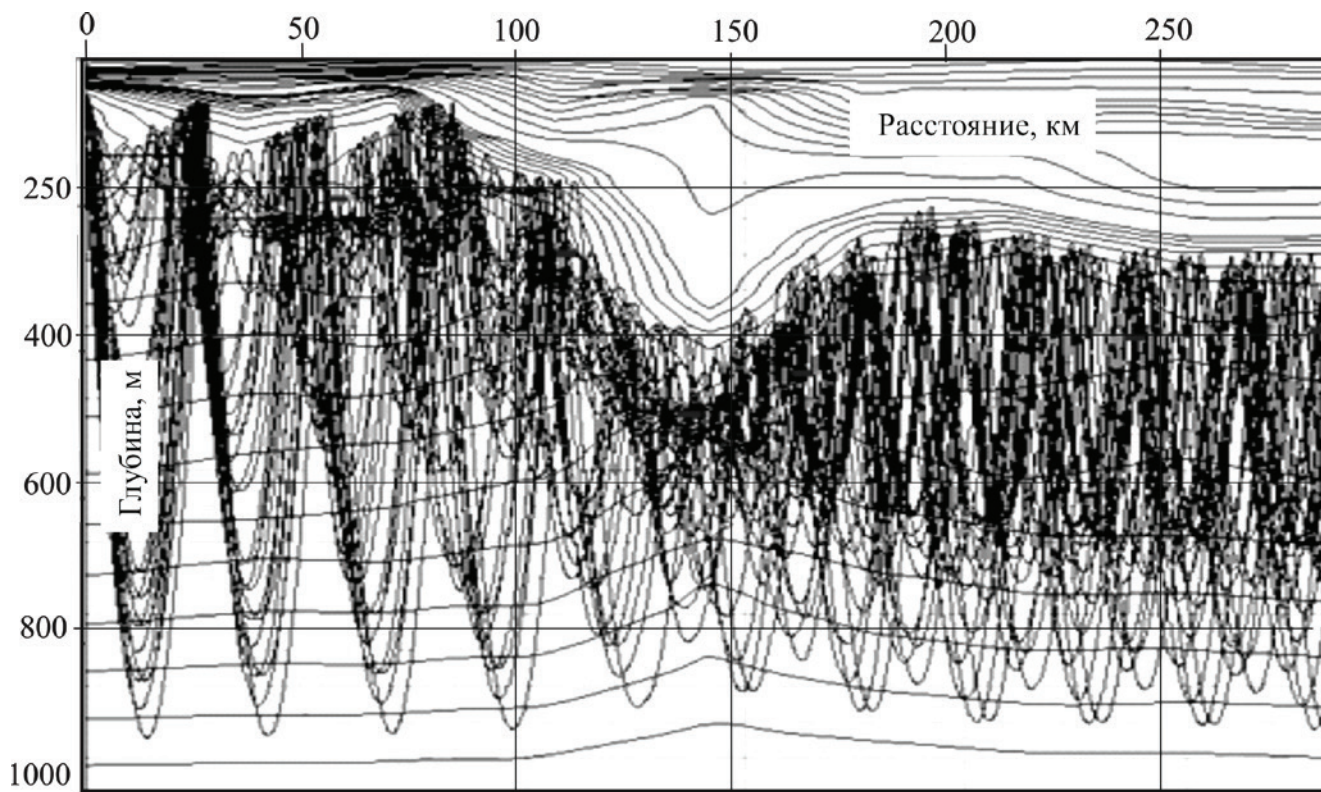


Рис. 6.5. Фрагмент лучевой картины при переходе траекторий лучей через вихревую зону с наложенными изолиниями скорости звука (белыми точками отмечено положение оси подводного звукового канала)

Целью оценки являлось получение распределений величин изменения горизонтальных и вертикальных градиентов скорости звука на длине волны с частотой 100 Гц, фактора фокусировки для приемников, расположенных на глубинах 10, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 400, 500 м.

При построении лучевой картины по натурным данным контролировалось изменение горизонтальных  $k_r$  и вертикальных  $k_v$  градиентов скорости звука на длине волны 100 Гц. Из дальнейшего расчета параметров гидроакустического поля было исключено до 7 % лучей, не удовлетворяющих условию малого изменения градиентов скорости звука на длине волны. Распределение величины  $\log k_v$  представлено на рис. 6.6,а, из которого видно, что ограничение лучевой теории может сказаться только в приповерхностном слое до 40...50 м со стороны холодного Приморского течения, где величина  $k_v$  не превышает 0,063, а в зоне вихря ее значение меньше 0,004. В целом скорость звука с глубиной уменьшается до горизонтов с минимальными значениями, при дальнейшем увеличении глубины; рост скорости звука обусловлен гидростатическим давлением с примерно постоянным изменением вертикального градиента на длине волны, равным для расчетного варианта  $10^{-4}$ ... $10^{-4,4}$ . На рис. 6.5 по изолиниям скорости звука прослеживается «погружение» оси подводного звукового канала при переходе через вихрь от 150 м на глубины 300...350 м.

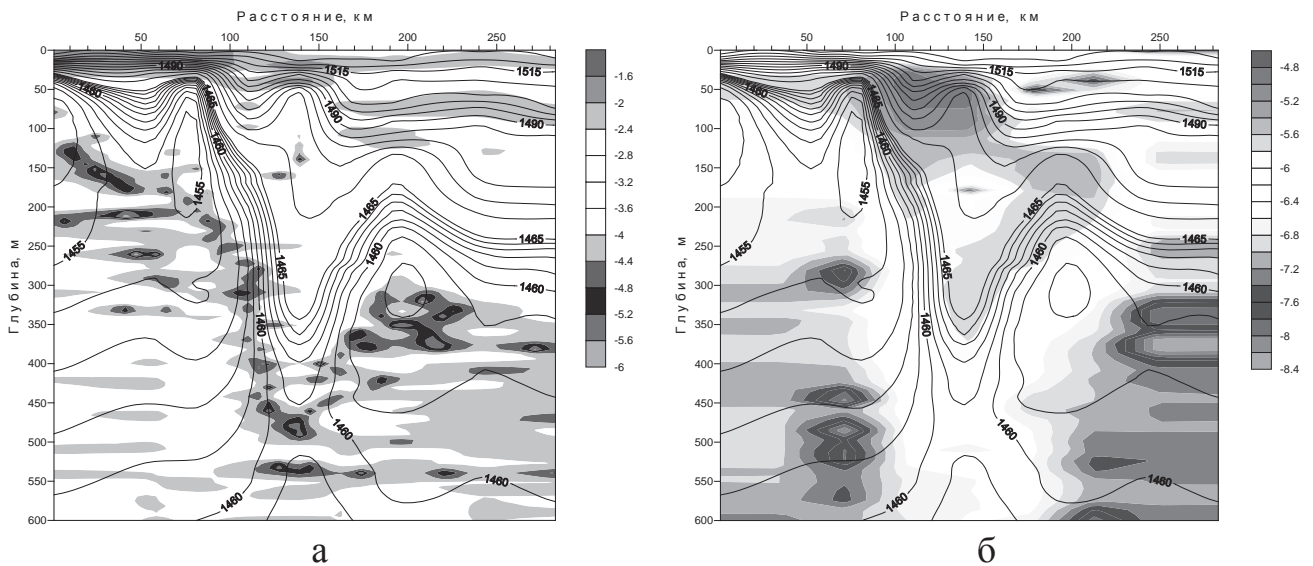


Рис. 6.6. Изменение параметров  $\log k_B$  (а) и  $\log k_T$  (б) на длине волны для частоты 100 Гц

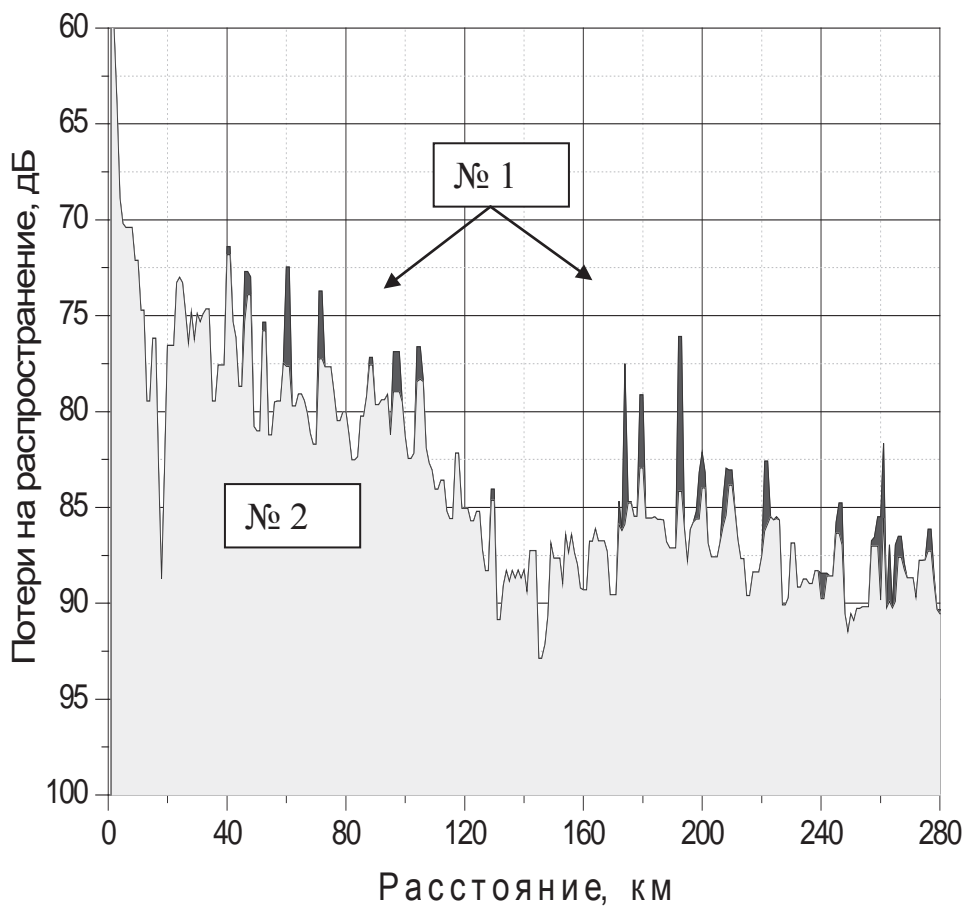


Рис. 6.7. Зависимость ПР от расстояния при ограничении фактора фокусировки  $FF \leq 50$  (заливка № 1),  $FF \leq 1000$  (заливка № 2)

Горизонтальные градиенты скорости звука в океане, как правило, на 2...3 порядка меньше вертикальных, но в зонах фронтального схождения различных водных масс они могут быть значительными.

Максимальные значения  $k_f$  наблюдаются на северной периферии вихря со стороны холодного течения и составляют не более 10-4,6 (рис. 6.6, б).

Известное выражение для расчета фактора фокусировки по лучам [74] не обеспечивает конечного значения в каустических точках среды. Обойти ситуацию можно, используя усложненные формулы, либо, исходя из практического опыта, ограничиться константой 50. Рассмотрим влияние величины, ограничивающей фактор фокусировки в каустических точках, на вид потерь на распространение звука (рис. 6.7) Из рис. 6.7 видно, что максимальные значения потерь на распространение звука, обусловленные ограничением фактора фокусировки в 1000 единиц, не особо искажают общей картины и могут быть удалены сглаживанием.

Результаты расчета фактора фокусировки для приемников, расположенных на глубинах 10, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 400, 500 м по трассе через вихревую зону, приведены на рис. 6.8.

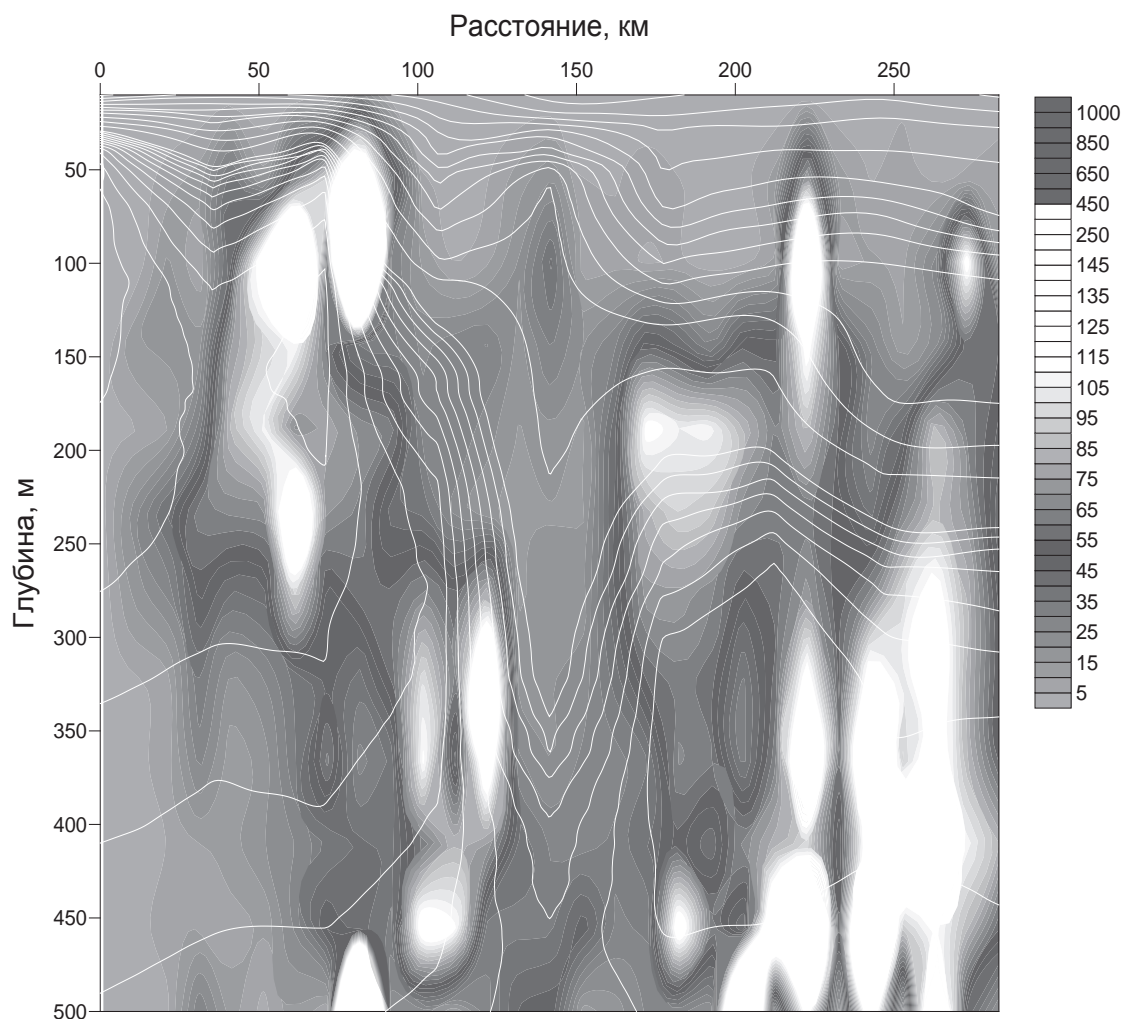


Рис. 6.8. Результаты расчета значений фактора фокусировки по трассе через вихревую зону

Максимальные значения фактора фокусировки, составляющие 250...450, наблюдаются перед «воронкой», где изолинии скорости звука имеют почти вертикальный характер, т.е. в зоне максимальных горизонтальных градиентов скорости звука. Увеличение значений фактора фокусировки до 100...225 объясняется пересечением лучей, по-



павших в подводный звуковой канал с группой энергонесущих водных лучей, претерпевших полное внутренне отражение вблизи дна.

Статистический анализ данных показывает, что из выборки в 3021 значение величины фактора фокусировки не превышают 32 с обеспеченностью 75 %, величины фактора фокусировки меньше 50 с обеспеченностью 82,5 %; медианное значение фактора фокусировки равно 11,89.

В заключение отметим, что, применяя для расчета в сложных гидрологических условиях методику, основанную на лучевой теории, получили изменения горизонтальных и вертикальных градиентов скорости звука на длине волны с частотой 100 Гц, не превышающие 0,00002 и 0,06 соответственно. Значения величины фактора фокусировки, рассчитанные для различных горизонтов приема с обеспеченностью 82,5 % не превышающие 50, что хорошо подтверждает оптимальность выбранной в ранних работах ограничивающей константы. На основании этого можно сделать вывод, что разработанная и апробированная методика применима для оценки эффективности гидроакустических средств, в том числе и в сложных гидрологических условиях.

Информационно-аналитическая система может быть применена:

- в научно-исследовательских и научно-производственных организациях при конструировании и проведении испытаний новых образцов гидроакустических средств, адаптируемых к конкретному району;
- в учебном процессе при подготовке курсантов военно-морских институтов или специалистов в области гидроакустики;
- в качестве инструмента исследователя, позволяющего совершенствовать методы прогноза параметров гидроакустического поля, изучать особенности гидролого-акустической обстановки конкретных районов Мирового океана;
- для оценки оптимальной конфигурации пространственно-развитой гидроакустической системы и определения горизонтов расположения излучающих и приемных блоков гидроакустических систем мониторинга полей на протяженных морских трассах с переменными характеристиками среды и ее границ.

Направлением функционального развития информационно-аналитической системы является разработка модуля реализующего кригинг-интерполяцию, обладающую наилучшими корреляционными связями между измеренными и модельными значениями анализируемых параметров, что дает возможность дальнейшего их сопряжения с картами районов.

## **6.2. Влияние вихря на формирование структуры акустического поля и условия приема сигналов**

Исследования, проведенные в направлении влияния вихря на формирование структуры акустического поля и условия приема сигналов, основаны на данных натурных измерений полей температуры и солености в области циклонического вихря, наблюдавшегося в западной части Японского моря. Его образование обусловлено взаимодействием водных масс холодного Приморского и теплого Северо-Корейского течений. Через вихревую область выполнялись гидрологические разрезы, а данные о температуре и солености фиксировались на горизонтах через 10 м от поверхности до дна. Результаты обработки, иллюстрирующие анизотропию поля скорости звука в меридиональном направлении, приведены на рис. 6.9.

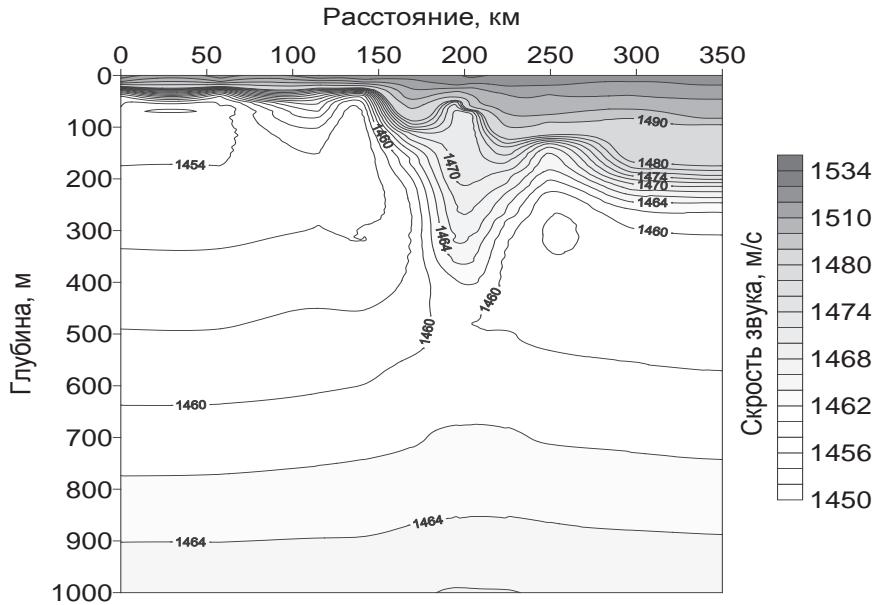


Рис. 6.9. Меридиональный разрез поля скорости звука в вихревой области

Проведем оценку возможности построения модели влияния мезомасштабного синоптического вихря на условия приема гидроакустических сигналов. В рамках существующих двухмерных моделей канала распространения данные скорости звука могут представляться в виде матрицы, столбцы которой содержат величины скорости звука на горизонтах. Число таких столбцов определяется количеством вертикальных профилей скорости звука на гидрологическом разрезе. Расстояния между профилями скорости звука могут быть нерегулярными. Представим значения скорости звука в виде функции отклика, обусловленного двумя факторами – глубиной  $z$  и расстоянием  $d$ . При оценке поведения функции отклика будем полагать, что модель влияния факторов  $z$  и  $d$  аддитивная, первого порядка, не учитывающая взаимодействия факторов – «строка-плюс-столбец», по терминологии, изложенной в работе [79]:

$$c = c_0 + c_z + c_d + \varepsilon,$$

где  $c_0$  – общее значение, характеризующее проявление всех факторов;  $c_z$  и  $c_d$  – вклад составляющих по глубине и расстоянию в значение функции отклика;  $\varepsilon$  – погрешность аппроксимации.

Матрицу  $|c_{ij}|$ , где строки  $i$  и столбцы  $j$  соответствуют принятым фиксированным состояниям глубины  $z$  и расстояния  $d$ , подвергнем процедуре «шлифовки медианами» [79], производя последовательные удаления медиан по строкам и столбцам:

$$\begin{aligned}
 1. \quad & |c_{ij}| - [Me(c_j)]_i = |d_{ij}^{(1)}| \\
 2. \quad & |d_{ij}^{(1)}| - [Me(d_i^{(1)})]_j = |d_{ij}^{(2)}| \\
 3. \quad & |d_{ij}^{(2)}| - [Me(d_j^{(2)})]_i = |d_{ij}^{(3)}| \\
 & \dots \dots \dots \\
 2m. \quad & |d_{ij}^{(2m-1)}| - [Me(d_i^{(2m-1)})]_j = |d_{ij}^{(2m)}|,
 \end{aligned}$$

где  $[Me(c_j)]_i, \dots, [Me(\varepsilon_j^2)]_i$  – вычисление медианы по строкам;  $[Me(d_i)]_j, \dots, [Me(\varepsilon_i^{(2\mu-1)})]_j$  – вычисление медианы по столбцам;  $|\varepsilon_{ij}^{(k)}|$  – рабочая матрица остатков на k-м шаге «шлифовки медианами»;  $|\varepsilon_{ij}^{(2m)}|$  – матрица значений погрешности аппроксимации.

Величины погрешностей или остатков  $|\varepsilon_{ij}^{(2m)}|$  характеризуют не только качество аппроксимации, но и содержат в себе информацию о состоянии поля скорости звука внутри вихря. На рис. 6.10 представлен трехмерный график матрицы остатков по разрезу через вихрь  $|\varepsilon_{ij}^{(2m)}|$ .

Удаляя рассчитанную погрешность из исходных данных, получим ядро двухфакторной «плюс-аппроксимации»:

$$|c_{ij}| - |\varepsilon_{ij}^{(2m)}| = |\bar{c}_{ij}|.$$

Проанализируем результаты шлифовки медианами матрицы  $|c_{ij}|$ . На рис. 6.11 приведено графическое представление ядра двухфакторной аппроксимации  $|\bar{c}_{ij}|$  для меридионального разреза. Видно, что в итоге многократного вычитания вектор-столбцов и вектор-строк медиан удалены элементы поля скорости звука, свойственные вихревому образованию. Полученный график характерен для фронтальной зоны. Представленная модель вихревого образования, в виде матрицы остатков, может послужить аддитивной добавкой к данным о поле скорости звука во фронтальной зоне, для прогноза условий распространения в области синоптического вихря.

Данный метод «восстановления» вихря требует более подробного исследования.

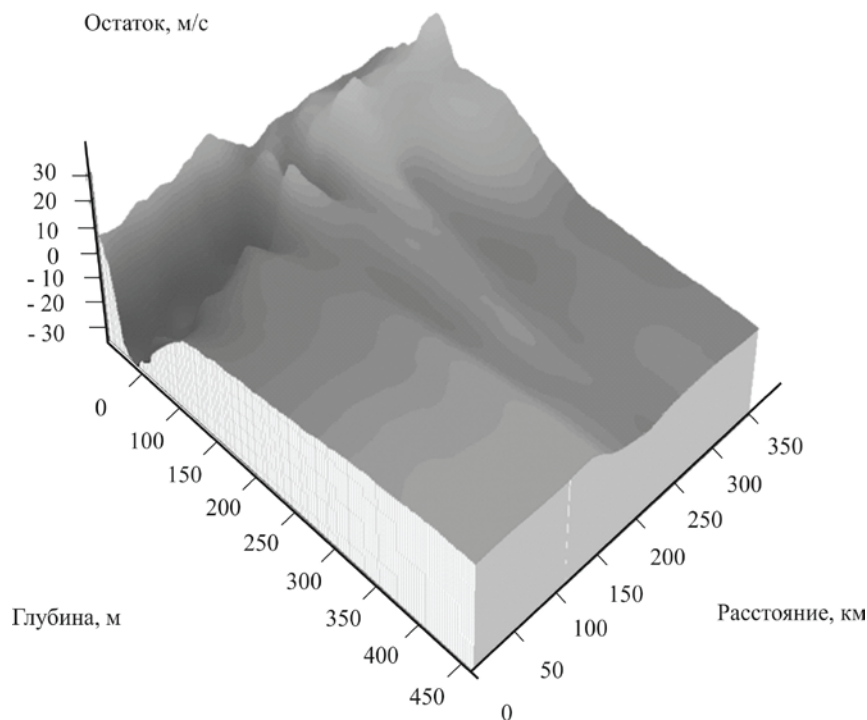


Рис. 6.10. Матрица остатков  $|\varepsilon_{ij}^{(2m)}|$  для разреза через вихревую область

По результатам обработки гидрологической информации проведены расчеты по программе «Дальность» [74], основанной на лучевой модели канала распространения, учитывающей двумерно-неоднородную изменчивость его параметров. На рис. 6.12 представлены результаты расчета потерь на распространение звуковой энергии при вторжении вихря.

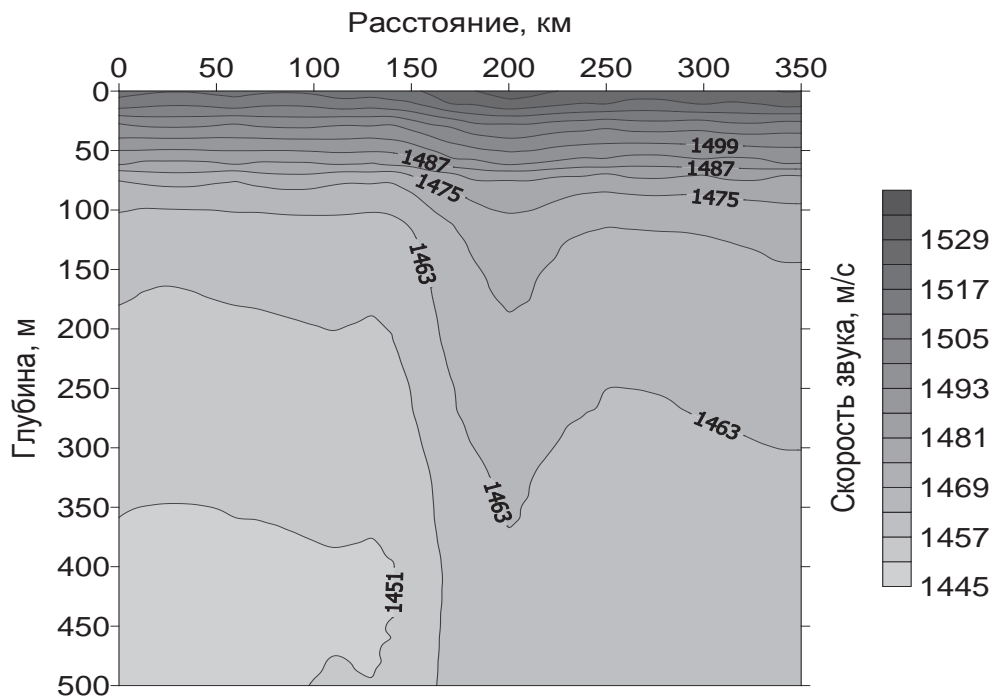


Рис. 6.11. Ядро двухфакторной аппроксимации для меридионального разреза через вихревую область

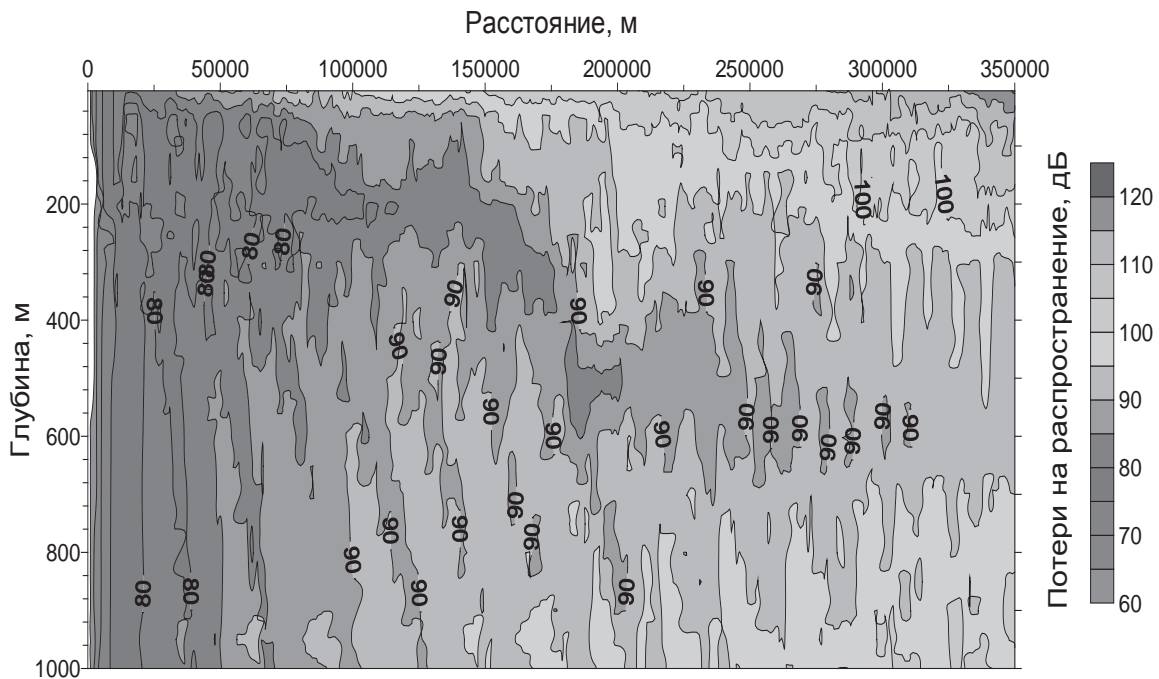


Рис. 6.12. Потери на распространение звука через вихревую область (частота – 1 кГц, глубина источника – 50 м)



Рис. 6.13. Разностная картина изменения потерь на распространение при вторжении вихря

Изолинии равных потерь на распространение звука иллюстрируют влияние вихревой линзы. Видно, что прием сигнала на глубине 100 м существенно затруднен, поскольку после прохождения ядра звуковая энергия более резко переходит в глубокие слои от 400 до 600 м, чем у фронтальной зоны. Разность матриц потерь на распространение (с вихрем и без него) дает увеличение потерь на распространение на 6...12 дБ в области вихревой линзы, относительно точек с теми же координатами во фронтальной зоне, как показано на рис. 6.13.

### 6.3. Импульсная передаточная характеристика среды и ее реализация в решении задачи «обращенного фазового фронта волны»

Фундаментальным свойством подводного звукового канала (ПЗК) является многолучевость распространения сигналов, обусловленная наличием его границ (поверхности и дна) и, в значительной степени, рефракцией сигналов, которая в гидроакустике играет определяющую роль. Рефракция в подводном звуковом канале определяется зависимостью скорости звука от вертикальных и горизонтальных координат. Часто используется приближение однородного по трассе звукового канала, в котором горизонтальными градиентами скорости звука пренебрегают по сравнению с вертикальными градиентами и считают, что скорость звука зависит только от вертикальных координат. Это верно только в первом приближении и заметно нарушается в зонах схождения течений, в районах океанических вихрей и внутренних волн.

В качестве приближенной модели для построения переходной характеристики трассы распространения сигналов будет использоваться подводный звуковой канал, в котором скорость звука зависит только от вертикальной координаты, волнение на поверхности моря отсутствует, а дно является абсолютно ровным и однородным. Математические соотношения в таком подводном звуковом канале хорошо известны [34–37] и приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Расчетные формулы	Значение формул	Размерность
$\chi_0$	Угол выхода луча на излучателе	Град., рад
$\chi(z)$	Текущий угол скольжения	Град., рад
$a = \frac{1}{c_0} \frac{dc(z)}{dz}$	Относительный градиент скорости звука	м-1
$q = \frac{\cos\chi_0}{c_0} \frac{\cos\chi_0 \cos\chi}{c(z)}$	Параметр луча. Величина постоянная для заданного угла выхода в любой точке луча	м-1 с
$L = \cos\chi_0 \left  \int_{z_0}^z \frac{dz}{\sqrt{\eta^2(z) - \cos^2\chi_0}} \right $	Горизонтальное расстояние, проходимое сигналом по лучу, выходящему из излучателя под заданным углом	м
$\eta(z) = c_0/c(z)$	Показатель преломления	—
$t = \frac{1}{c_0} \left  \int_{z_0}^z \frac{\eta^2(z) dz}{\sqrt{\eta^2(z) - \cos^2\chi_0}} \right $	Время пробега расстояния по лучу	с
$f = \frac{r \cos\chi_0}{\left  \frac{\partial r}{\partial \chi_0} \right  \sin\chi}$	Фактор фокусировки в точке приема на расстоянии $r$ от излучателя	—

В однородном по трассе подводном звуковом канале могут существовать четыре наиболее характерных класса лучей:

1. Рефрагированные лучи, которые распространяются в подводном звуковом канале, не касаясь поверхности и дна моря. Эти лучи подвержены наименьшим потерям энергии и являются характерными для глубоководных районов океана.

2. Лучи, отраженные поверхностью океана и рефрагирующие в придонном слое без отражений от дна. Взволнованная поверхность приводит к рассеянию лучей. Лучи этого класса характерны для случая размещения источника и приемника вблизи поверхности океана.

3. Лучи, рефрагирующие в верхнем слое, не достигающие поверхности и отраженные дном океана. Лучи этого класса характерны для случая размещения источника и приемника у дна. Они нечувствительны к состоянию поверхности, их интенсивность в значительной степени определяется свойствами дна (поглощением и рассеянием).

4. Лучи, отраженные поверхностью и дном океана.

Методика получения переходной характеристики гидроакустической трассы заключается в следующем. Расположенный на дне источник излучает короткий (не более 1,5 мс) импульс с высокочастотным заполнением, содержащим резонансную частоту излучателя. Использовались частоты от 1,5 до 4,5 кГц. Приемник, также стационарно расположенный на расстоянии  $R$  от излучателя, находится на глубине  $H$ .

Однократно излученный импульс порождает в точке приема серию импульсов, распространяющихся по различным лучам. Для построения переходной характеристики по формулам таблицы вначале строится диаграмма  $R(\chi)$ , позволяющая установить количество и классы лучей, приходящих в точку приема. Затем вычисляется время распро-

странения сигналов по каждому из заданных лучей и их факторов фокусировок. Далее результаты вычислений представляются в виде диаграммы  $R(\tau)$ , где  $\tau$  – время запаздывания (или опережения) относительно опорного сигнала.

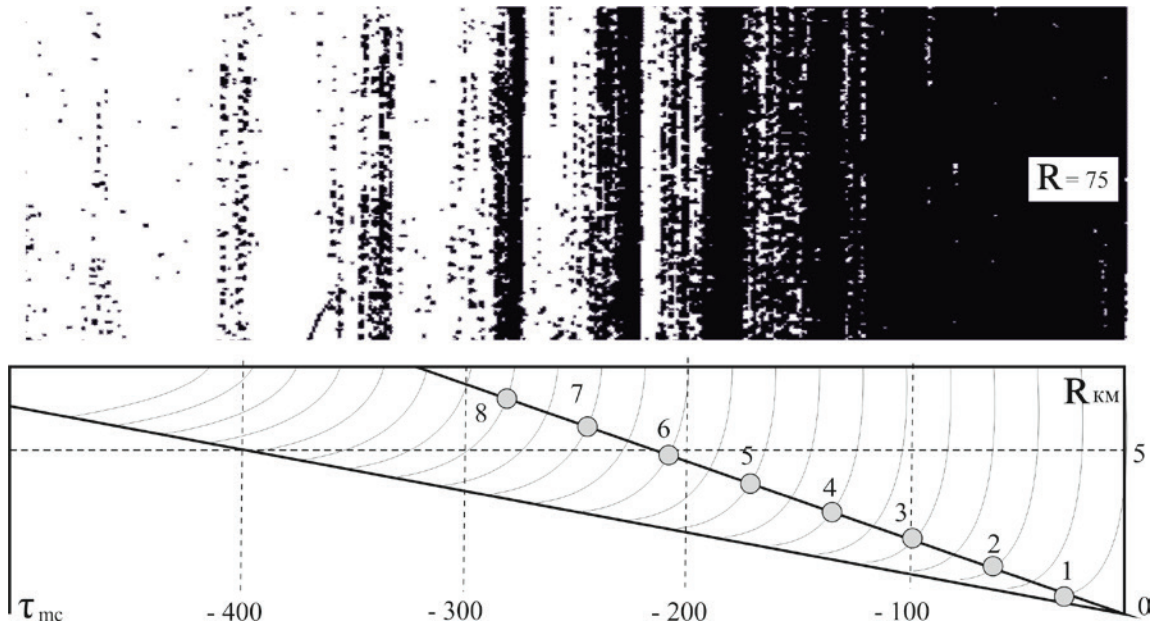


Рис. 6.14. Экспериментально измеренная (а) и расчетная временные диаграммы импульсных сигналов  $R(\tau)$  на трассе распространения (б)

Такая диаграмма, дополненная значениями фактора фокусировок, представляет переходную характеристику среды на различных расстояниях от источника (рис. 6.14) [79].

Идея «обращенного фазового фронта волны» для снижения влияния многолучевости в станциях гидролокации была предложена в институте прикладной физики Академии Наук РФ (ИПФ АН РФ) В.А.Зверевым, но ее практическая реализация остается открытой [37–39, 91]. В пределах допустимой погрешности она может быть решена путем использования рассмотренных аналитических зависимостей и практических путей реализации импульсной передаточной характеристики, которая определяет времена и углы приходов многолучевого сигнала. Эти параметры сигналов можно передать по радиоканалу в точку излучения импульсных сигналов. Используя данные параметры при излучении (длительность, угол выхода и порядок следования) в точке приема, можно получить компактную свертку импульсного сигнала с учетом многолучевости канала.

#### 6.4. Оценка погрешности координат источника путем решения обратной лучевой задачи

Местоположение объекта можно получить, используя известный метод решения обратной лучевой задачи [36], а также проведя измерения гидролого-акустических характеристик морской среды и углов прихода лучей на антенну в вертикальной плоскости. Погрешность экспериментальных измерений и погрешность метода расчета составляют общую погрешность вычисления координат объекта. Рассмотрим влияние погрешности измерения углов на гидроакустической антенне и погрешности метода расчета на погрешность вычисления координат объекта при решении обратной лучевой задачи.

Расчеты выполнены по программе для однородного по трассе волновода и любого типа лучей, принятых гидроакустической антенной [39]. Для заданного положения излучателя строим лучевую картину.

Находим координаты области пересечения наибольшего числа лучей и их углы скольжения. Решая обратную лучевую задачу, получим разницу в значениях координат излучателя, которая и составляет погрешность метода.

Для примера результатов моделирования направлений прихода сигналов в точку наблюдения в вертикальной плоскости на рис. 6.15 представлено вертикальное распределение скорости звука, на рис. 6.16 – лучевая картина для трех направлений выхода сигнала из источника, который располагается в точке с координатами  $x = 0$  м,  $z = 250$  м. Лучевая картина строилась для расстояния между источником и точкой наблюдения, равного 30 км. Из рис. 6.16 следует, что для глубины источника 250 м и углов скольжения лучей на горизонте источника  $8,5^\circ$ ;  $6,5^\circ$ ;  $2,5^\circ$  лучи пересеклись в области с координатами  $x = 20,698$  км;  $z = 260$  м. Углы скольжения в точке наблюдения составили  $8,489^\circ$ ,  $6,486^\circ$ ,  $-2,472^\circ$ . Размер области пересечения лучей равен  $(\pm 50) \cdot (\pm 10)$  м. Любые из представленных пар лучей имеют несколько точек пересечения, что свидетельствует о неоднозначности определения координат источника звуковых волн при решении обратной лучевой задачи. Для однозначного определения местоположения источника звуковых волн необходимо пространственное разрешение в точке приема не менее трех лучей.

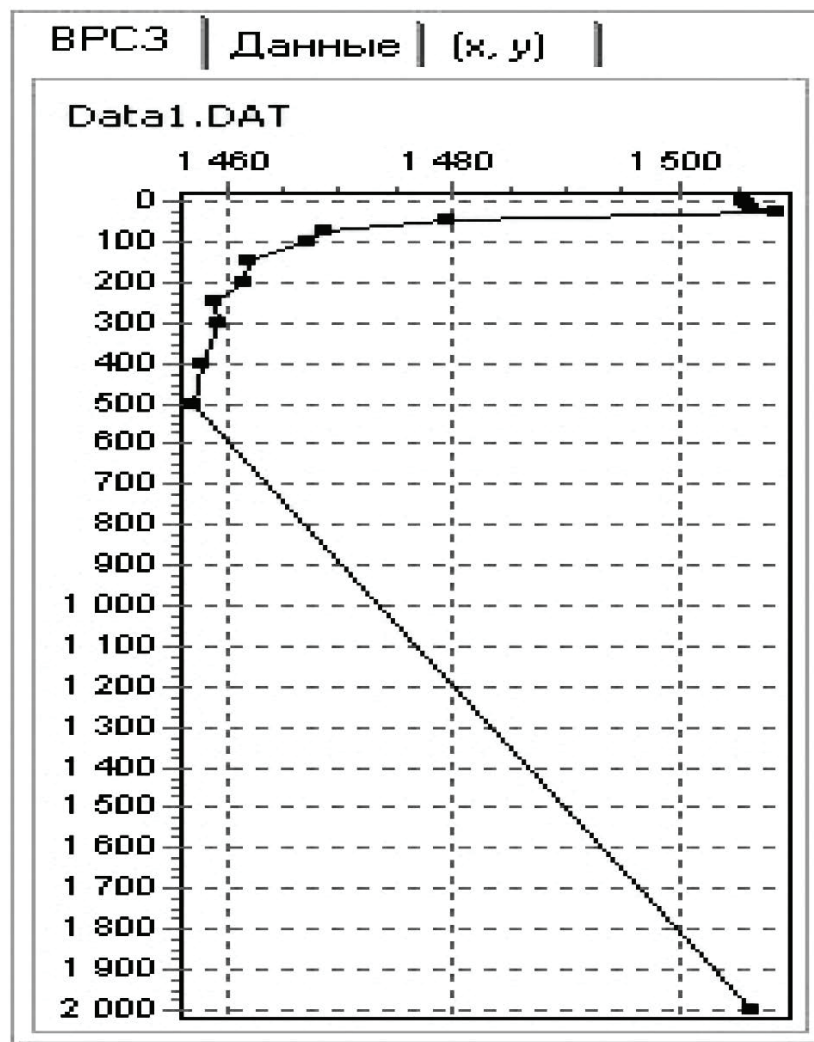


Рис. 6.15. Вертикальное распространение скорости звука в воде



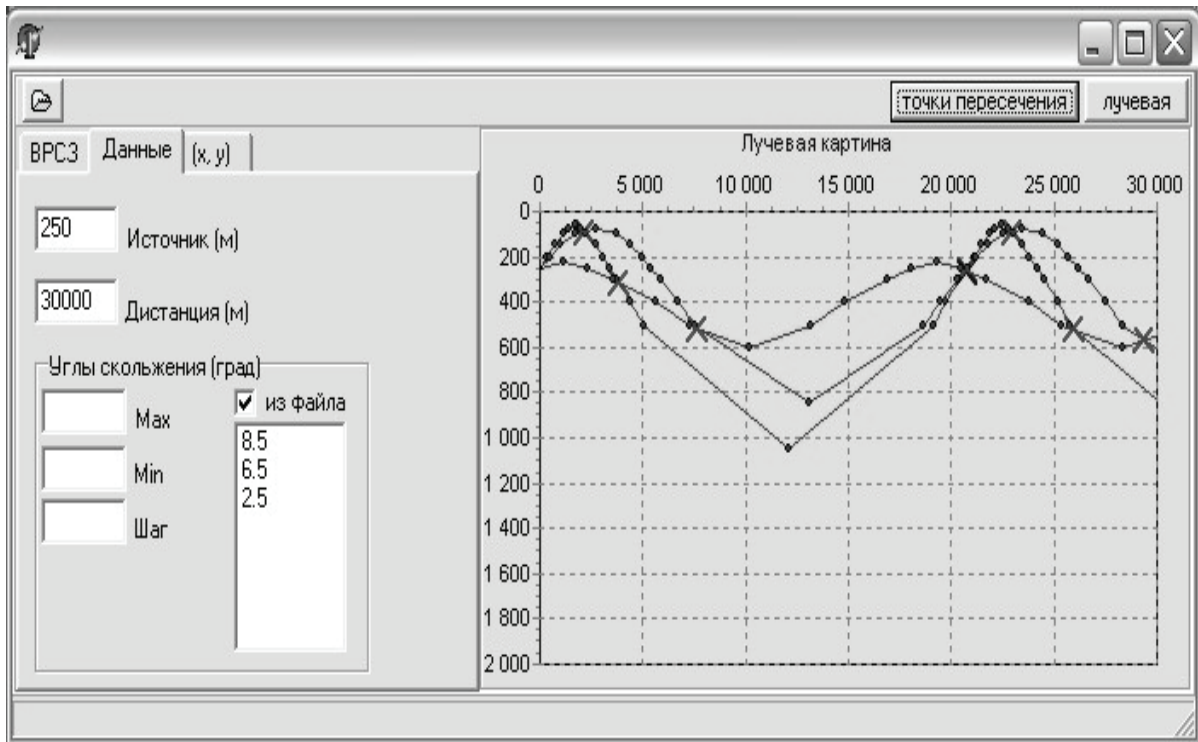


Рис. 6.16. Решение прямой лучевой задачи

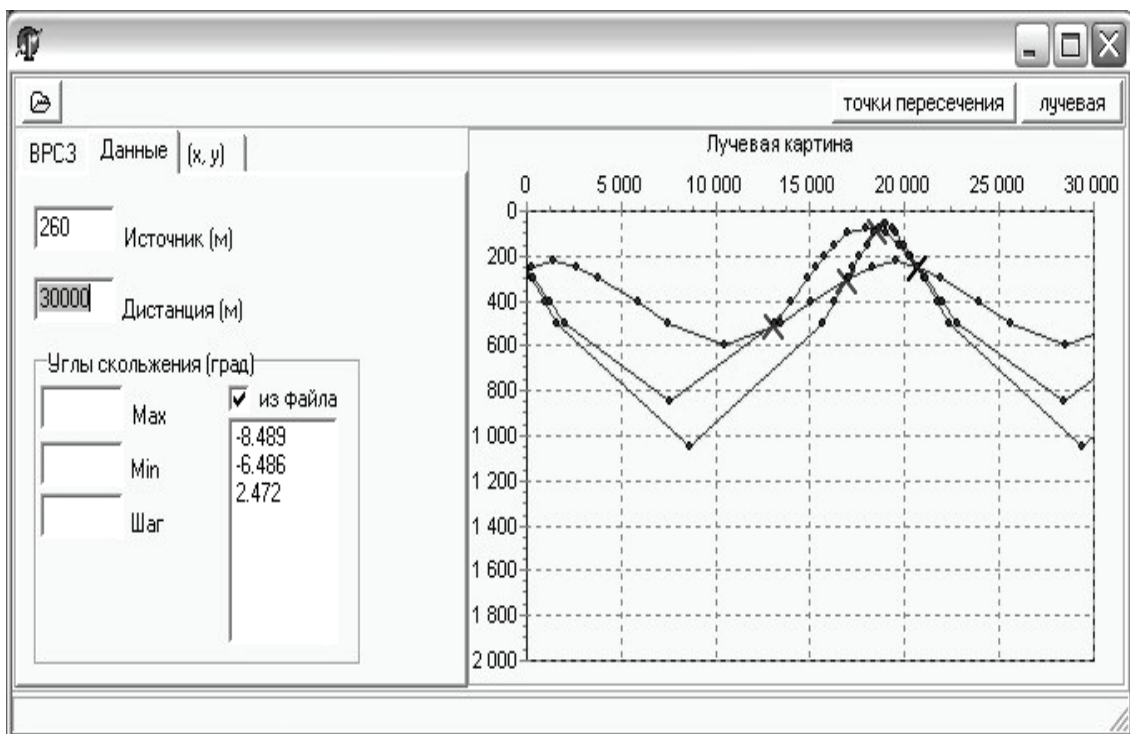


Рис. 6.17. Решение обратной лучевой задачи

Решая обратную лучевую задачу для углов скольжения, полученных в области пересечения лучей, и глубины источника 260 м, найдены координаты излучателя:  $x = 20,702$  км;  $z = 251$  м (рис. 6.17). Относительные погрешности оценки координат положения источника звуковых волн в данном случае составили: 0,4 % по глубине; 0,02 % по расстоянию.

Рассмотрим пример оценки влияния погрешности измерения углов прихода сигналов на гидроакустическую антенну на погрешность вычисления координат объекта. На рис. 6.18 по оси абсцисс нанесены абсолютные значения погрешности измерения углов скольжения сигналов в вертикальной плоскости в пределах  $\pm 3^\circ$ , а по оси ординат – относительная погрешность оценки вертикальной координаты источника. На рис. 6.19 представлены аналогичные данные для горизонтальной координаты. Шаг погрешности измерения углов в данном варианте составил  $0,5^\circ$ .

Погрешность координаты положения источника звуковых волн по глубине принимает значения от 0,4 до 101,61 % (см. рис. 6.18), погрешность координаты по расстоянию изменяется от 0,01 до 16,64 % (рис. 6.19). Максимальная погрешность оценки координат источника соответствует величине погрешности измерения угла скольжения, равной  $0,5^\circ$ .

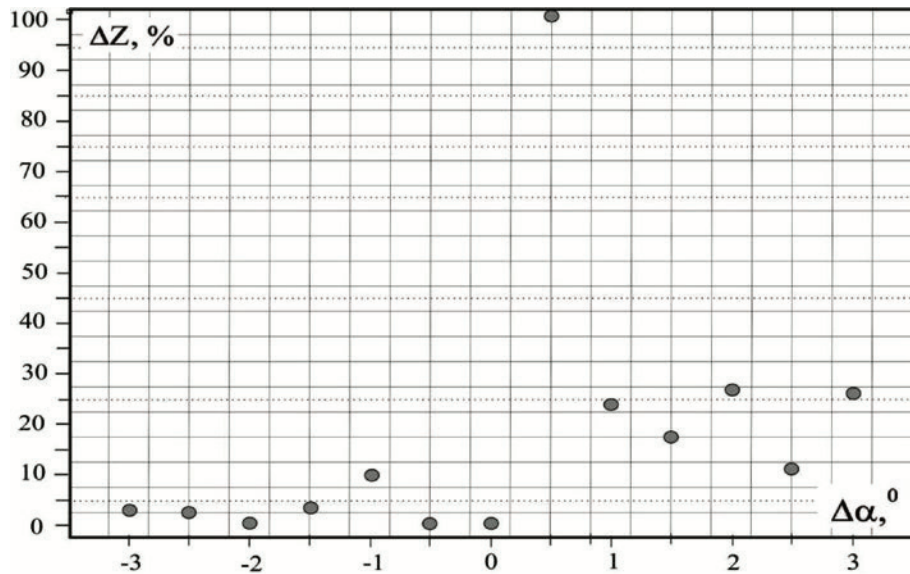


Рис. 6.18. Зависимость погрешности вычисления вертикальной координаты ( $\Delta Z$ ) объекта от погрешности измерения углов ( $\Delta\alpha$ ) прихода сигналов на гидроакустической антенне

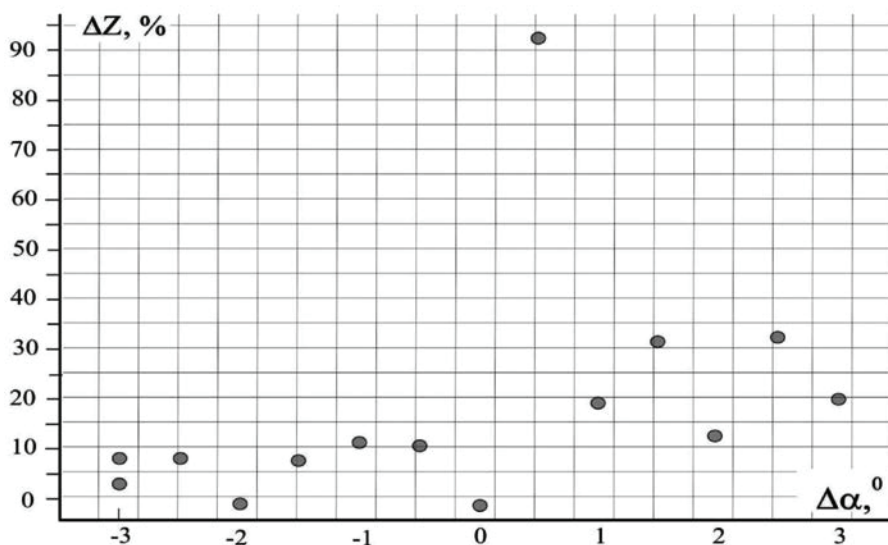


Рис. 6.19. Зависимость погрешности вычисления горизонтальной координаты ( $\Delta X$ ) объекта от погрешности измерения углов ( $\Delta\alpha$ ) прихода сигналов на гидроакустической антенне

Статистический анализ результатов расчетов показал, что для заданных гидрологических условий среднее значение погрешности определения координаты  $z$  составляет примерно 17,52 % со значением среднеквадратичного отклонения 27,21 %, а погрешность определения координаты  $x$  – 3,65 и 4,31 % соответственно.

Среднее значение погрешности метода при различных типах вертикального распределения скорости звука не превышает 20 %, что позволяет решать практические задачи обнаружения и классификации объекта.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического применения разработанной программы определения координат источника звуковых волн методом решения обратной лучевой задачи.

## 6.5. Горизонтальная рефракция акустических волн в шельфовой зоне

Известно, что на распространение звука в условиях берегового шельфа, где применяются просветные системы, большое влияние оказывает рельеф морского дна.

Остановимся на некоторых случаях горизонтальной рефракции, когда профиль дна имеет сравнительно простой вид. При этом используем примеры, приведенные в работах [1, 2, 123], дающие хорошее представление об особенностях рассеяния и рефракции на шельфе и позволяющие в дальнейшем объяснить некоторые неожиданные экспериментальные результаты.

С учетом рельефа дна вычисление траектории многократно отраженных поверхностью и дном лучей может быть осуществлено только в трехмерной системе координат. Такая система координат и обозначения углов приведены на рис. 6.20. Здесь  $z$  – вертикальная координата, определяющая соотношение точки падения луча у дна и точки его отражения от поверхности;  $X, Y$  – координаты плоскости, нормалью которой является  $z$ ;  $\gamma$  – угол, образованный нормалью касательной плоскости в точке падения луча с вертикалью  $z$ ;  $\Phi$  и  $\Phi'$  – горизонтальные проекции углов падения и отражения на плоскость  $X, Y$ ;  $\nu$  и  $\nu'$  – вертикальные углы падения и отражения относительно плоскости  $X, Y$ . Так как мы в перспективе будем анализировать горизонтальную рефракцию, то нас интересует траектория луча только в плоскости  $X, Y$ .

Данная плоскость соответствует географической карте с нанесенными на ней изолиниями глубины. Следует иметь в виду, что в результате последовательных отражений траектория должна иметь вид ломаной, поскольку горизонтальные углы  $\Phi$  меняются скачками при каждом очередном отражении от дна. Для малых углов наклона  $\gamma$ , удовлетворяющих условию

$$\gamma \ll \frac{1}{2} \omega t \cos \Phi,$$

вертикальный угол после  $n$ -го отражения определяется выражением

$$\sin \nu_n = \frac{H_0}{H_n} \sin \nu_0.$$

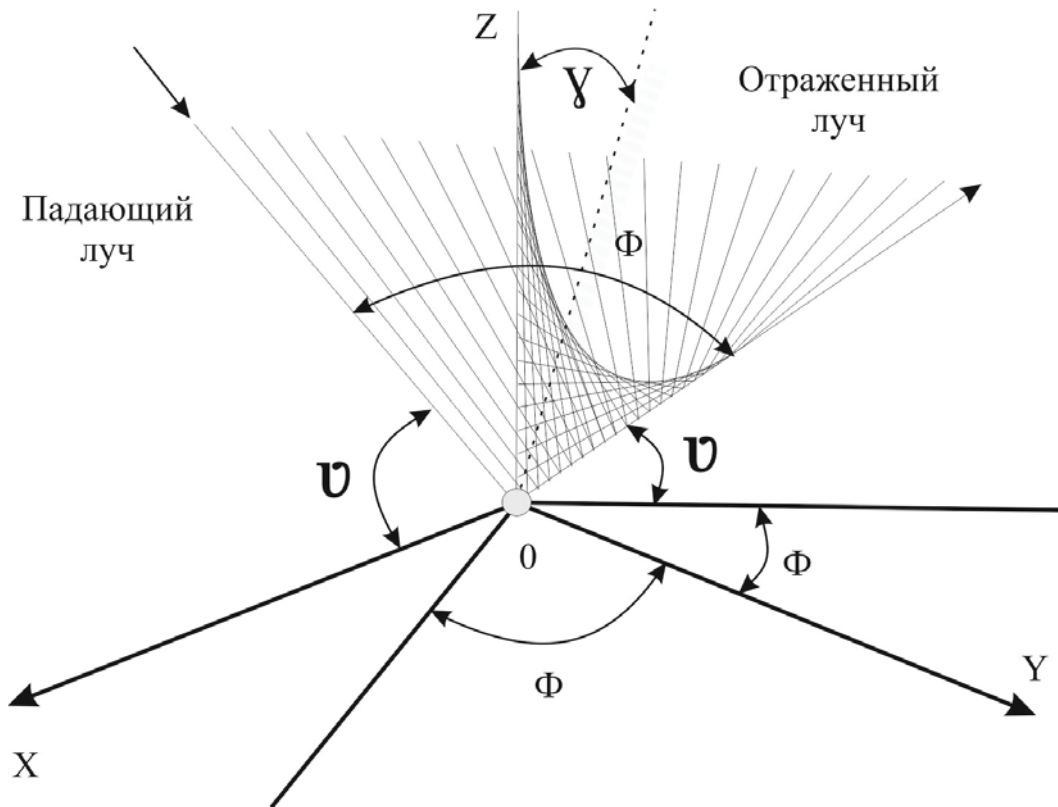


Рис. 6.20. Система координат и углы, принятые при расчете траектории акустических лучей

При возрастании  $\nu$  траектория луча в плоскости  $X, Y$  описывается плавной кривой. Для клина или желоба данная траектория определяется выражением

$$L = \int \frac{\sin\Phi_0 \cos\nu_0 dy}{\left[ (1 - \sin^2\Phi_0 \cos^2\nu_0) - \left( \frac{H_0^2}{H^2(y)} \sin^2\nu_0 \right) \right]^{1/2}},$$

где  $H(y)$  – профиль дна; постоянная интегрирования  $(\nu_0, \Phi_0, H_0)$  определяется в точке  $X_0$  и  $Y_0$ .

В случае цилиндрической симметрии (для круглой впадины или подъема дна) вводятся полярные координаты  $\Phi$  и  $r$ , а траектория луча определяется выражением

$$\Phi = \int \frac{\sin\Phi_0 \cos\nu_0 dr}{r \left\{ \left( \frac{r^2}{r_0^2} \right) \left[ (1 - \sin^2\nu_0) \frac{H_0^2}{H^2(r)} \right] - \sin^2\Phi_0 \cos^2\nu_0 \right\}^{1/2}}, \quad (6.1)$$

где  $H(r)$  – профиль дна, а постоянная интегрирования определяется при  $\Phi = 0, r = r_0$ .

Приведем пример горизонтальной рефракции в том случае, когда береговой рельеф представляет собой клин. В этом случае в выражении (6.1) вместо  $H(r)$  следует подставить  $H(y)dy$ , получим уравнение траектории акустического луча:

$$y = (1 - \cos^2 \nu_0 \sin^2 \Phi_0)^{-\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \left\{ \left[ \frac{x(1 - \cos^2 \nu_0 \sin^2 \Phi_0)}{\sin \Phi_0 \cos \nu_0} - y_0 \cos \nu_0 \cos \Phi_0 \right]^2 + \right.$$

$$\left. + y_0^2 \sin^2 \nu_0 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (6.2)$$

На рис. 6.21 приведены два семейства траекторий лучей для горизонтальных углов падения:  $\Phi_0 = 10^\circ$  и  $\Phi_0 = 60^\circ$ . Расчет траекторий лучей произведен для клина с углом раствора  $\gamma = 2^\circ 20'$ ,  $y_0 = 7$  км и  $x_0 = 0$  км. В обоих случаях вертикальные углы падения  $\nu_0$  изменяются в пределах от  $1^\circ$  до  $51^\circ$ . Из этого следует, что если в направлениях  $\Phi_0 = 10^\circ$  и  $\Phi_0 = 60^\circ$  содержатся лучи с вертикальными углами падения на дно от  $1^\circ$  до  $51^\circ$ , то в результате рефракции будет наблюдаться их пространственное разделение в плоскости X, Y.

При увеличении угла  $\Phi_0$  пространственное разделение увеличивается (наблюдается своеобразный веер расходящихся лучей с углами  $\nu_0$ ). Это обстоятельство играет очень существенную роль в тех случаях, когда акустический сигнал формируется в приповерхностном подводном звуковом канале. На рис. 6.22 схематически изображен такой случай. Различные лучи, распространяющиеся в вертикальной плоскости, при выходе на береговой шельф имеют различные точки отражения от дна и различные вертикальные углы отражения:  $\nu_{01}$  и  $\nu_{02}$ .

В результате горизонтальной рефракции происходит пространственное разделение данных лучей в плоскости (X, Y), причем чем ближе к оси подводного звукового канала находится источник акустических сигналов, тем большее количество лучей будет участвовать в этом процессе и более плотно будет заполнена зона пространственного разделения в плоскости (X, Y). Зоны пространственного разделения, соответствующие горизонтальным углам  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  могут перекрываться (рис. 6.23). Акустическое поле в точке приема будет формироваться сложной совокупностью лучей, имеющих разные углы:  $\Phi_{i0}$  и  $\nu_{i0}$ . При этом границы влияния горизонтальной рефракции на суммарный акустический сигнал становятся весьма протяженными и размытыми. Возникает ситуация, напоминающая эффект рассеяния. В формировании сигнала могут принимать участие протяженные участки берегового шельфа с различными свойствами.

В теории лучевого приближения распространения акустических сигналов упрощенное представление наблюдаемых явлений как «отражение» от береговой черты является весьма условным (см. рис. 6.23). При более строгом решении задачи учет влияния границ и рельефа дна может быть выполнен с достаточной степенью точности. В этом случае условное разделение приходов на «отраженные» и «рефрагированные» лучи теряет реальный смысл.

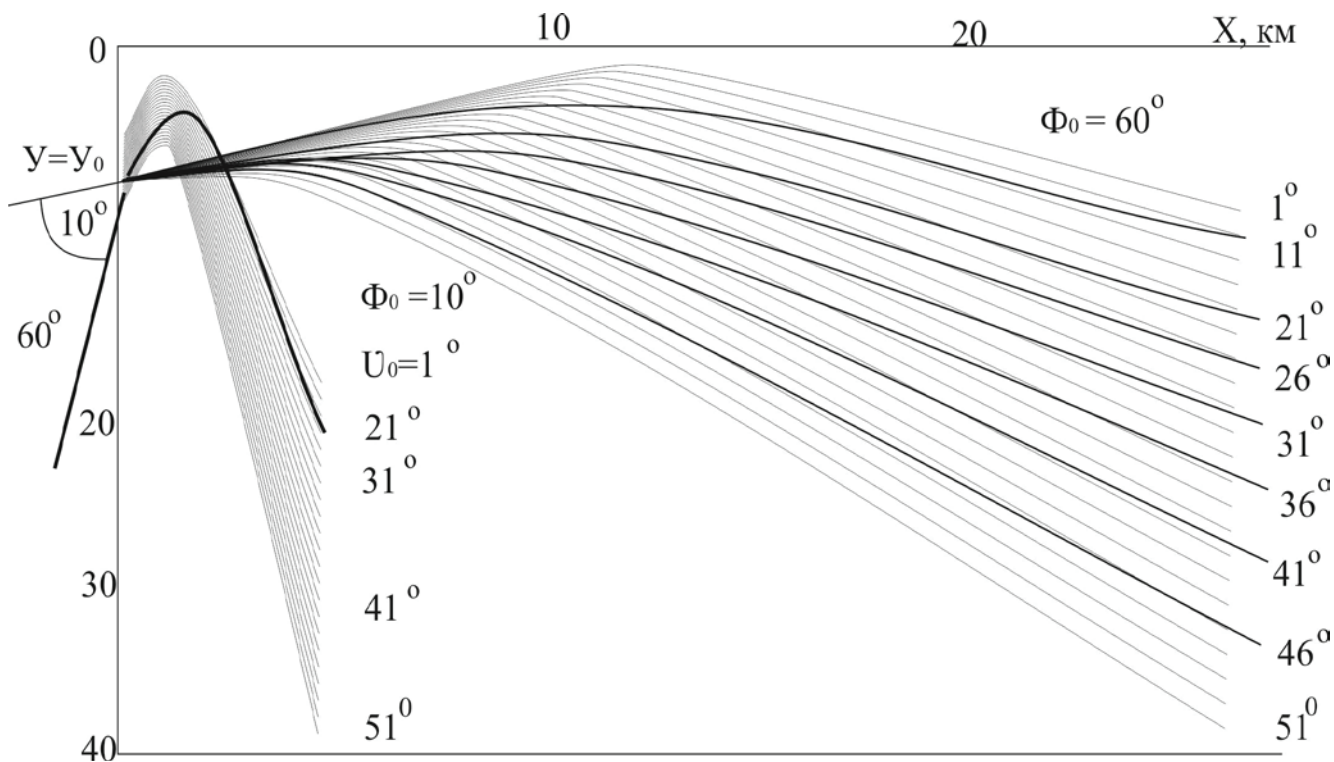


Рис. 6.21. Семейства траекторий лучей для двух характерных горизонтальных углов падения

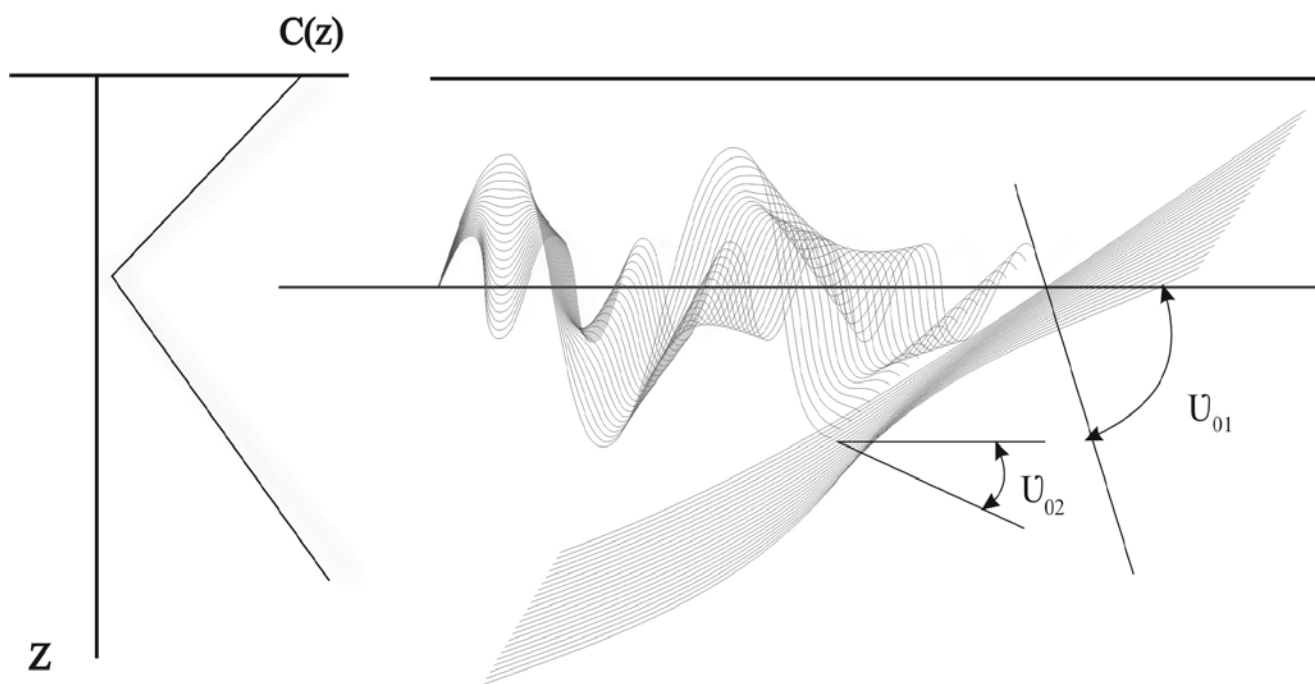


Рис. 6.22. Вертикальные углы  $\nu_{01}$  и  $\nu_{02}$  при наличии подводного звукового канала в береговом клине

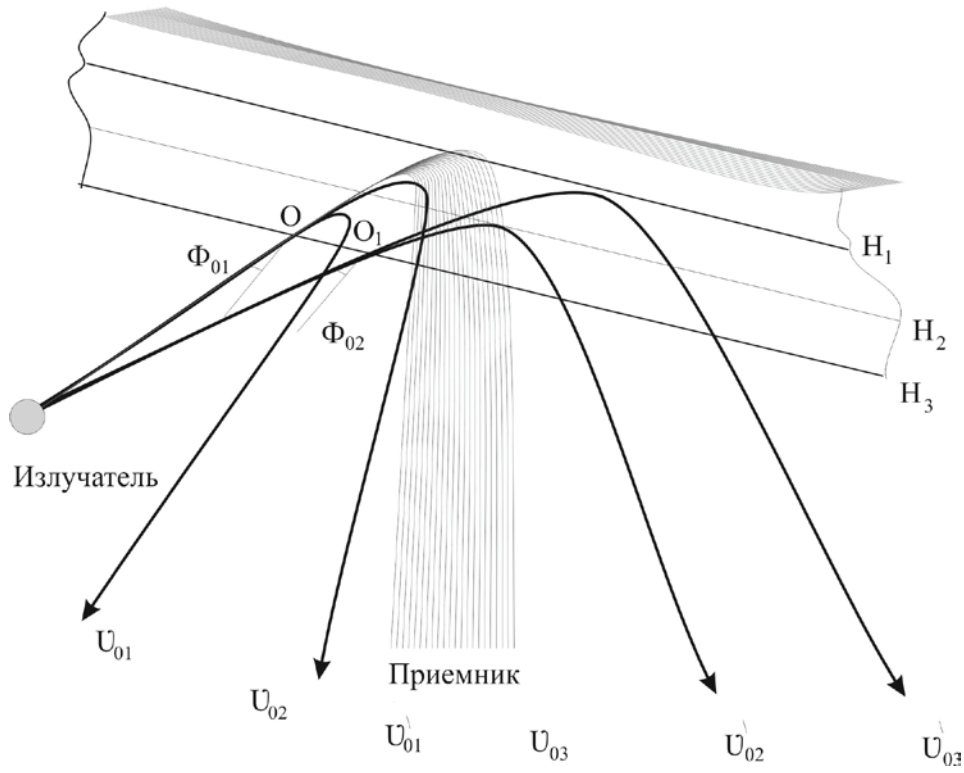


Рис. 6.23. Зоны пространственного разделения для двух горизонтальных углов  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$

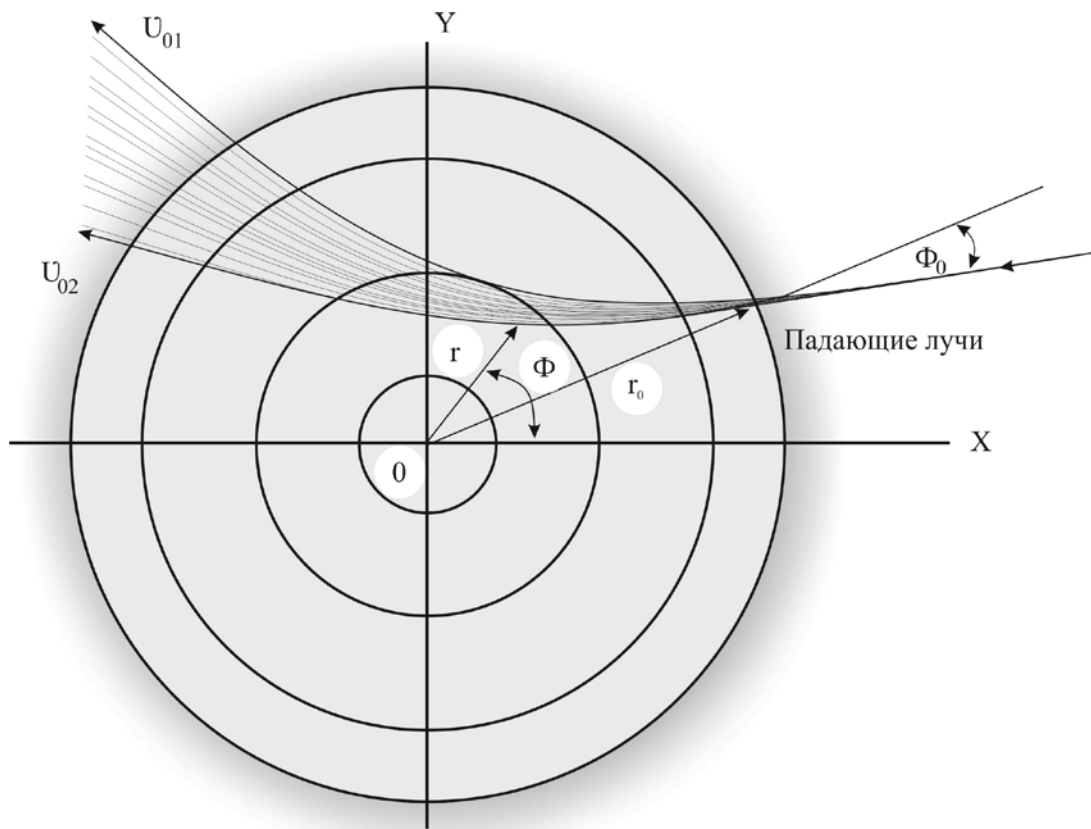


Рис. 6.24. Рефракция на конической возвышенности

Для конической подводной возвышенности с вершиной на поверхности моря получим с помощью постановки  $H(r)$  в формулу (6.2) следующее уравнение траектории в полярных координатах  $r, \Phi$ :

$$r = r_0(1 - \cos^2 \nu_0 \cos^2 \Phi_0)^{\frac{1}{2}} \operatorname{csc} \left[ \frac{(1 - \cos^2 \nu_0 \cos^2 \Phi_0)^{\frac{1}{2}}}{\sin \Phi_0 \cos \nu_0} (\Phi + \Phi') \right],$$

$$\Phi' = \sin \Phi_0 \cos \nu_0 \frac{\arcsin \left[ (1 - \cos^2 \nu_0 \cos^2 \Phi_0)^{\frac{1}{2}} \right]}{(1 - \cos^2 \nu_0 \cos^2 \Phi_0)^{\frac{1}{2}}}.$$

Переходя к координатам  $X$  и  $Y$  –  $x = r \cos \Phi, y = r \sin \Phi$ ,  $\nu_0$  имеет то же значение, что и в рассмотренном выше случае. Смысл  $r_0, \Phi_0, \Phi, r$  ясен из рис. 6.23. Можно убедиться в том, что здесь имеет место пространственное распределение лучей  $\nu_{01}$  и  $\nu_{02}$  в плоскости  $(X, Y)$ , которые до рефракции лежали в одной плоскости, след которой мы видим на рис. 6.24.

### **6.6. Амплитудно-фазовая структура акустического поля в протяженном океанском волноводе с переменными характеристиками среды**

Исходное уравнение Гельмгольца (в цилиндрических координатах) имеет вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(z, r) p = 0, \quad (6.3)$$

где  $p$  – давление;  $k_0 = \omega / c_0$  ( $\omega$  – угловая частота),  $n(z, r) = c_0 / c(z, r)$ ;  $c_0$  – нормировочная скорость звука.

Проведенные далее вычисления акустического поля выполнены с учетом теоретических положений, изложенных в работах [47-49]. Основная идея состоит в том, что в первом приближении все существенные на низких частотах волны распространяются практически горизонтально от источника.

Следовательно, акустическое поле можно представить как «уходящую» функцию Ханкеля  $H_0^{(1)}(k_0 r)$ , промодулированную огибающей, медленно меняющейся с глубиной и расстоянием:

$$p(r, z) = \psi(r, z) H_0^{(1)}(k_0 r). \quad (6.4)$$



Функция Ханкеля  $H_0^{(1)}(k_0 r)$  удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 H_0^{(1)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_0^{(1)}}{\partial r} + k_0^2 H_0^{(1)} = 0.$$

Можно ожидать, что такая аппроксимация окажется хорошей только в дальнем поле точечного источника, где  $k_0 r \gg 1$  и

$$H_0^{(1)}(k_0 r) \sim \sqrt{\frac{2}{i\pi k_0 r}} e^{ik_0 r}. \quad (6.5)$$

Подставив выражение (6.4) в формулу (6.3), находим, что

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \left( \frac{2}{H_0^{(1)}} \frac{\partial H_0^{(1)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2(z, r) - 1) \psi = 0.$$

Введём приближение дальнего поля  $k_0 r \gg 1$  и отметим, что в силу выражения (6.5)

$$\frac{2}{H_0^{(1)}} \frac{\partial H_0^{(1)}}{\partial r} + \frac{1}{r} = 2ik_0 \left[ 1 + O\left( \frac{1}{k_0^2 r^2} \right) \right].$$

Пренебрегая членом порядка  $(k_0 r)^{-2}$ , получим

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2 - 1) \psi = 0.$$

Следующее допущение состоит в том, что если зависимость акустического поля от  $\Gamma$  при некотором выборе  $k_0$  имеет в основном вид значение  $e^{ik_0 r}$ , то на расстояниях порядка длины волны  $\Psi$  как функция от  $\Gamma$  будет меняться очень медленно, т.е.

$\frac{\partial \psi}{\partial r} \ll k_0 \psi$ , и оправданным будет соотношение

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} \ll 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r},$$

которое даёт стандартное параболическое уравнение:

$$2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2 - 1) \psi = 0.$$

Рассмотрим аналитические выражения начальных (исходных) полей. Начинать с дельта - функции нельзя, поскольку она даёт излучение, равномерное по углу, а параболическое уравнение плохо обращается с путями, соответствующими высоким углам выхода. Есть варианты:

– запуск гауссианом (просто сглаженная дельта-функция):

$$\psi(0, z) = \sqrt{k_0} e^{-\frac{k_0^2}{2}(z-z_s)^2};$$

– модовый запуск;

– источник Грина:

$$\psi(0, z) = \sqrt{k_0} [1,4467 - 0,4201k_0^2(z - z_s)^2] \times e^{-\frac{k_0^2}{3,0512}(z-z_s)^2}.$$

Расчётные формулы для вычисления пространственной амплитудно-фазовой структуры акустического поля заключаются в следующем. Пусть  $\psi_j^i = \psi(r_i, z_j)$ , т.е.  $\psi^i$  – это вектор, аппроксимирующий поле на расстоянии  $r_i$ . Тогда выражение

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2(n^2 - 1)\psi,$$

можно приближённо представить как  $A\psi$ , где

$$A = \begin{bmatrix} d_1 & e_2 & & & & \\ e_2 & d_2 & e_3 & & & \\ & e_3 & d_3 & e_4 & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & e_N & d_N \end{bmatrix},$$

$$d_j = \frac{-2}{h^2} + k_0^2(n^2(z_j) - 1), \quad e_j = \frac{1}{h^2}.$$

Из уравнения

$$2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2(n^2 - 1)\psi = 0$$

сначала получим:

$$2ik_0 \frac{\psi^{i+1} - \psi^i}{\Delta r} + A \frac{\psi^{i+1} + \psi^i}{2} = 0,$$

а после преобразования имеем

$$\left[ \frac{2ik_0}{\Delta r} + \frac{A}{2} \right] \psi^{i+1} = \left[ \frac{2ik_0}{\Delta r} - \frac{A}{2} \right] \psi^i,$$

или

$$C\psi^{i+1} = B\psi^i.$$

Для анализа структуры акустического поля проводится расчёт по Тапперту и Хардину на прямоугольной сетке и в комплексных числах, поэтому в каждом узле сетки мы получим значение как амплитуды, так и фазы акустического давления (точнее, его огибающей). Рассматриваемый волновод может иметь переменные по трассе гидрологию и глубину. В расчете лучевой картиной участвуют лучи с углом выхода максимум  $\pm 20^\circ$ , т.е. в основном рефрагированные, так как отражённые от дна лучи достаточно быстро затухают. Преимущество параболического уравнения состоит в том, что оно позволяет решать себя пошагово, т.е. для вычисления поля на каждом шаге по расстоянию требуется лишь знание его значения на предыдущем шаге, что снижает требования к вычислительным ресурсам, но выводит из рассмотрения такие физические явления, как рассеяние звука назад и реверберация.

*В шестой главе:*

Представлена программа расчета параметров гидроакустического поля, с контролем критериев применимости лучевой теории, условий отражения от взволнованной поверхности моря и ледового покрова, с учетом акустических свойств морского грунта и переменного рельефа дна [74]. Отличительной особенностью от ранее разработанных методик является то, что горизонтальные неоднородности поля скорости звука представляются по дистанции набором элементарных одномерно-слоистых задач, что обеспечивает более устойчивую и быструю по времени работу программы в сложных гидрологических условиях, например по натурным данным скорости звука при вторжении синоптического вихря.

Проведены расчеты лучевых картин и потерь акустической энергии на распространение для лучей, выходящих из глубокого протяженного волновода на мелководный шельф. При распространении сигналов в шельфовой зоне в результате горизонтальной рефракции происходит пространственное разделение лучей. Причем чем ближе к оси подводного звукового канала находится источник акустических сигналов, тем более плотно будет заполнена зона пространственного разделения лучей в горизонтальной плоскости. Зоны пространственного разделения могут перекрываться. Акустическое поле в точке приема будет формироваться сложной совокупностью лучей, при этом границы влияния горизонтальной рефракции на суммарный акустический сигнал становятся протяженными и размытыми [123,128]. Наблюдается ситуация, напоминающая эффект рассеяния лучей, как акустических волн на объекте.

Для описания закономерностей формирования лучевой структуры акустических полей предложена методика получения переходной характеристики гидроакустической трассы с использованием импульсных сигналов. Приведен пример практических расчетов переходной характеристики среды на различных расстояниях от источника.

Представлена программа определения местоположения подводного объекта, основанная на известном методе решения обратной лучевой задачи. Рассмотрен пример влияния погрешности определения углов приходов сигналов от объектов на гидроакустическую антенну на точность вычисления их координат [74].

Рассмотрены аналитические выражения для вычисления пространственной амплитудно-фазовой структуры акустического поля по Тапперту и Хардину на прямоугольной сетке в комплексных числах [123,128].

Разработанные программы и результаты их применения в расчетах полей, обеспечивают возможность обоснованного формирования и последующей эффективной эксплуатации гидроакустических систем мониторинга, как блоков общей Дальневосточной системы освещения и мониторинга гидрофизических и геофизических полей, установленных на протяженных морских трассах с переменными характеристиками среды и границ.

## 7. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ В ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОСВЕТНЫХ СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА

### 7.1. Выбор характеристик зондирующих сигналов

Проведенные исследования показывают, что для задач классической акустической томографии разрешающая способность является одной из важнейших характеристик системы обнаружения. При этом с учетом нестационарности и неоднородности морской среды как волновода наибольший интерес представляет разрешающая способность по временному положению (из-за многолучевости), сдвигу несущей частоты (из-за доплеровских деформаций спектра) и углу прихода акустической волны (из-за вариаций структуры акустического поля) [151–153].

Данные положения в большей степени присущи высокочастотной акустической томографии, для которой лучевое распространение сигнала является определяющим при формировании срезовой структуры томографических образов обнаруженных объектов. Условия распространения низкочастотных сигналов несколько иные, чем высокочастотных, но процесс формирования томографического образа в широкомасштабной низкочастотной томографии, основанной на параметрическом взаимодействии акустических волн, в некотором приближении такой же, как и в высокочастотной, и производится по конкретным значениям одного параметра. За основной информационный параметр разового фронтального «среза» пространственно-временного амплитудно-фазового поля подводного объекта (ПО) принимаются фазовые изменения или фаза просветного сигнала. Такие «срезы» из-за большого объема пространственного положения различных составляющих поля объекта получаются при одном и том же низкочастотном зондирующем сигнале, с некоторыми временными задержками. Для их дальнейшего интегрирования на горизонтальных и вертикальных приемных элементах системы наблюдения, обоснования оптимальных параметров просветных сигналов необходимо иметь качественный показатель, объективно оценивающий их различимость, например разрешающая способность по временному положению. Поэтому дальнейшие теоретические рассуждения будут схожи с элементами лучевой теории распространения акустических сигналов и высокочастотной локации водного пространства, с ограничениями их применимости для низкочастотной акустической томографии. Количественно разрешающая способность по некоторому параметру  $\eta$  сигнала характеризуется минимальной разностью  $\delta\eta = \eta_1 - \eta_2$  двух разрешаемых по этому параметру сигналов, имеющих одинаковые прочие параметры. Чтобы два сигнала  $v_1(t) = v(t, \eta_1)$  и  $v_2(t) = v(t, \eta_2)$  были различимы в устройстве обработки сигналов, необходимо, чтобы они как можно больше отличались друг от друга по своим параметрам. Оценим это различие интегральной мерой – средним квадратом их разности [3, 4]:

$$\Delta_{\eta}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [v_1(t) - v_2(t)]^2 dt.$$

Очевидно, что

$$\Delta_{\eta}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} v_1^2(t) dt + \int_{-\infty}^{+\infty} v_2^2(t) dt - 2 \int_{-\infty}^{+\infty} v_1(t) v_2(t) dt = E_1 + E_2 - 2R_{12},$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – энергии сигналов;  $R_{12}$  – функция их взаимной корреляции.

Поскольку сигналы различаются только параметром  $\eta$ , который считается неэнергетическим (т.е. его изменение не влияет на энергию), то энергии сигналов одинаковы, а функция их взаимной корреляции  $R_{12}$  является автокорреляционной функцией, зависящей от разности параметров  $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$ :

$$R_{12}(\eta_1, \eta_2) = R_{12}(\Delta\eta).$$

Для обеспечения высокого разрешения сигналов по параметру  $\eta$  необходимо выбрать эти сигналы так, чтобы их автокорреляционная функция была максимально компактна; другими словами, уменьшалась при возможно меньшем изменении этого параметра.

С учетом резонансных свойств акустических систем (особенно в области низких частот) не представляется возможным генерировать сигналы по полосе шире, чем описываемые представлением Гильберта [3, 4]:

$$v_1(t) = V_1(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_1(t)] = \frac{1}{2} [\bar{V}_1(t) e^{j\omega_0 t} + \bar{V}_1^*(t) e^{-j\omega_0 t}];$$

$$v_2(t) = V_2(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_2(t)] = \frac{1}{2} [\bar{V}_2(t) e^{j\omega_0 t} + \bar{V}_2^*(t) e^{-j\omega_0 t}],$$

$\bar{V}_1(t) = V_1(t) e^{-j\varphi_1(t)}$ ;  $\bar{V}_2(t) = V_2(t) e^{-j\varphi_2(t)}$  – комплексные амплитуды;

$\bar{V}_1^*(t) = V_1(t) e^{j\varphi_1(t)}$ ;  $\bar{V}_2^*(t) = V_2(t) e^{j\varphi_2(t)}$  – комплексно-сопряженные функции.

Поэтому

$$R_{12} \approx \frac{1}{4} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{V}_1(t) \bar{V}_2^*(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} \bar{V}_1^*(t) \bar{V}_2(t) dt \right].$$

Легко убедиться, что подынтегральные выражения являются комплексно-сопряженными функциями. Поэтому их сумма является действительной функцией и равна

$$R_{12} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{V}_1(t) \bar{V}_2^*(t) dt.$$

Пусть сигналы для любой пары мод различаются смещением, как по времени на величину  $\tau$ , из-за дисперсии скорости звука, так и по частоте на величину  $F$ , из-за доплеровских деформаций, т.е.

$$\bar{V}_1(t) = \bar{V}(t);$$

$$\bar{V}_2(t) = \bar{V}(t - \tau)e^{-j2\pi F(t-\tau)}.$$

Тогда их разрешающую способность по  $\tau$  и  $F$  будет характеризовать интеграл

$$\int_{-\infty}^{+\infty} V_1(t)V_2^*(t)dt = e^{-j2\pi Ft} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{V}(t)\bar{V}^*(t - \tau)e^{j2\pi Ft} dt.$$

А выражение

$$\Psi(t, F) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{V}(x)\bar{V}^*(x - t)e^{j2\pi Fx} dx$$

может трактоваться как совместная корреляционная функция модуляции, по существу являющаяся обобщением автокорреляционной функции комплексной огибающей (амплитуды) сигнала двух переменных  $t$  и  $F$ .

Например, при  $F = 0$  имеем обычную автокорреляционную функцию комплексной огибающей сигнала:

$$\Psi(t, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{V}(x)\bar{V}^*(x - t)dx. \quad (7.1)$$

Из изложенного следует, что совместная корреляционная функция модуляции характеризует разрешающую способность системы обнаружения по временному сдвигу и смещению частоты.

Выражение (7.1) из временной формы записи легко может быть преобразовано к частотному виду:

$$\bar{V}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{S}(2\pi f)e^{j2\pi ft} df,$$

где  $\bar{S}(2\pi f)$  – частотный спектр комплексной амплитуды сигнала  $\bar{V}(t)$ .

Тогда имеем

$$\bar{V}(x)e^{j2\pi Fx} = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{S}[2\pi(v - F)]e^{j2\pi vx} dv;$$

$$\bar{V}^*(x - t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{S}^*(2\pi f)e^{-j2\pi f(x-t)} df,$$

а выражение (7.1) представится в виде

$$\Psi(t, F) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{S}[2\pi(v - F)] dv \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}^*(2\pi f) e^{j2\pi ft} df \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi(v-f)x} dx.$$

Так как внутренний интеграл представляет собой дельта-функцию  $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi(v-f)x} dx = \delta(v - f)$ , то, используя ее фильтрующие свойства, получим частотную форму записи функции (7.1):

$$\Psi(t, F) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{S}^*(2\pi f) \bar{S}[2\pi(f - F)] e^{j2\pi ft} df.$$

Из теории оптимальной фильтрации известно, что  $\bar{S}^*(2\pi f)$  с точностью до постоянного множителя представляет собой передаточную функцию оптимального фильтра для сигнала  $\bar{V}(t), S[2\pi(f - F)]$ , где  $s[2\pi(f - F)]$  – спектр сигнала, сдвинутого по частоте на  $F$ , а произведение – спектр отклика оптимального фильтра на сдвинутый по частоте сигнал. Поэтому совместная корреляционная функция, будучи преобразованием Фурье от этого произведения, является указанным откликом. Эта функция в литературе имеет название времячастотной функции рассогласования [3, 4]. Обычно используется нормированная совместная корреляционная функция модуляции:

$$\Psi_0(t, F) = \frac{1}{2} E \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{V}_x \bar{V}^*(x - t) e^{j2\pi Fx} dx,$$

где  $E = \frac{1}{2} \Psi(0, 0) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{V}(x) \bar{V}^*(x) dx$  – энергия сигнала.

Физически эта функция показывает относительную величину отклика оптимального фильтра на сигнал, сдвинутый по времени на  $t$  и по частоте на  $F$  относительно сигнала, оптимального этому фильтру. Иными словами, она характеризует степень различия откликов фильтра на два указанных выше сигнала и тем самым количественно описывает разрешающую способность по времени и частоте. Поэтому, анализируя совместную корреляционную функцию модуляции различных сигналов, можно подобрать подходящие сигналы для решения конкретных задач обнаружения и тем самым оптимизировать приемно-излучающий комплекс.

При использовании тонального сигнала (в случае прямоугольного импульса длительностью  $\tau_1$ ) его комплексная амплитуда может быть определена как

$$\begin{cases} \bar{V}(t) = V & \text{при } -\frac{\tau_1}{2} \leq t \leq \frac{\tau_1}{2}; \\ \bar{V}(t) = 0 & \text{при } |t| > \frac{\tau_1}{2}. \end{cases}$$



Соответственно энергия сигнала  $E = 0,5V \frac{2}{\tau_1}$ . Искомая функция  $\Psi_0(t, F)$  равна

$$\Psi_0(t, F) = 0 \text{ при } |t| > \tau_1;$$

$$|\Psi_0(t, F)| = \left| \frac{\sin F(\tau_1 - |t|)}{\pi F \tau_1} \right| \text{ при } -\tau_1 < t < \tau_1. \quad (7.2)$$

В частности, при  $F = 0$  получим автокорреляционную функцию огибающей:

$$\Psi_0(t, 0) = 1 - \frac{|t|}{\tau_1} \text{ при } -\tau_1 < t < \tau_1;$$

$$\Psi_0(0, F) = \frac{\sin \pi F \tau_1}{\pi F \tau_1} \text{ при } t = 0.$$

Таким образом, сечение этой функции вертикальной плоскостью  $F = 0$  является треугольным, а сечение  $t = 0$  и  $t = \text{const}$  имеют вид функции  $\sin x / x$  с шириной центрального максимума по оси частот  $2 / \tau_1$  и последующим уширением по мере увеличения  $t$ . Нормированная функция рассогласования дает исчерпывающую характеристику разрешающей способности по времени и частоте, но ее анализ обычно затруднен вследствие трехмерности. С целью упрощения вместо всей функции анализируют ее область корреляции, которая объединяет все значения величин  $t$  и  $F$ , для которых выполняется условие  $0,5 \leq \Psi_0(t, F) \leq 1$ .

Согласно классическому критерию разрешения Рэля два сигнала, сдвинутые относительно опорного по времени на  $t$  и по частоте на  $F$ , которые соответствуют на плоскости переменных  $t, F$  точкам, лежащим в пределах этой области, разрешить невозможно. Поэтому область высокой корреляции в литературе называют диаграммой неопределенности. Чем она меньше, тем выше разрешение сигнала по времени и частоте. Эту область можно определить как проекцию на плоскости  $t, F$  сечения нормированной совместной корреляционной функции модуляции горизонтальной плоскости  $\Psi_0(t, F) = 0,5$ . Диаграмма неопределенности для тонального сигнала представляет собой фигуру, подобную усеченному овалу, с шириной по оси времени, равной длительности  $\tau_1$  импульса, по оси частот  $-1, 2/\tau_1$  и площадью порядка единицы. Ширина области высокой корреляции по времени и частоте является количественной мерой разрешающей способности сигнала по этим параметрам:  $\delta t = \tau_1, \delta E = 1,2/\tau_1$ .

Из полученных характеристик следует вывод, что увеличение длительности излучения тонального сигнала ухудшает разрешающую способность по времени, приводит к невозможности разрешения разовых фронтальных срезов пространственно-временного, амплитудно-фазового поля обнаруживаемого объекта и потери объективности при проведении классификации, улучшает разрешение по частоте. Кроме того, при анализе необходимо учитывать характерное время нестационарности среды и время существования объемной локальной неоднородности, вызванное прохождением объекта (или время нахождения цели в канале распространения звука). Исходя из изложенного, следует

признать данный класс сигналов малоподходящим для локации водного пространства. С точки зрения диагностики среды использование тональных сигналов представляет собой наихудший вариант, поскольку для него, при любых соотношениях параметров зондирующего сигнала, база равна  $\Delta f \tau_1 \approx 1$ .

При использовании режима излучения непрерывного тонального сигнала в точке приема суммируются сигналы, прошедшие по всем путям, в том числе и через области пространства, «не затронутые» локальной неоднородностью, вызванной присутствием объекта. В данном случае эти сигналы выступают в качестве помехи, маскируя наряду с классической помехой полезные изменения отклика [154–157].

В случае значительной протяженности трасс потребуется и значительный энергетический потенциал источника. Так как для тонального непрерывного и для импульсного сигналов невозможно улучшение отношения сигнал/помеха методами временной компрессии, то лучше использовать сложные сигналы.

Практические возможности генерирования сложных сигналов ограничены двумя основными случаями. Это использование либо частотно-модулированных импульсов с большой девиацией, либо фазоманипулированных сигналов, т.е. импульсов с многократными скачками фазы несущей [156], например линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ).

Применение сигналов с внутриимпульсной частотной модуляцией вполне возможно. Первичные исследования с ними в направлении диагностики среды проводились [163] и дали обнадеживающие результаты, но их использование сомнительно с точки зрения наличия оказийных источников сигналов этого типа, хотя сами сигналы широко используются в современных средствах наблюдения. При обработке сигналов данного класса огибающая отклика на выходе оптимального фильтра, представляющего собой дисперсионную линию задержки и осуществляющего временную компрессию спектральных компонент сигнала, наряду с основным выбросом имеет достаточно интенсивные боковые (дополнительные) пики, которые могут маскировать соседние, более слабые, сигналы от совокупности мод и тем самым ухудшать разрешающую способность системы по времени. Несущая частота таких сигналов составляет несколько килогерц, что говорит о необъективности полученных результатов для низкочастотной акустической томографии океанской среды.

Для разрешения сигналов от локальных неоднородностей необходимо, чтобы область высокой корреляции была единственной. Это требование принципиально невыполнимо в случае периодического или квазипериодического сигнала. Поэтому приходится ограничиваться требованием, чтобы различные области высокой корреляции были достаточно удалены друг от друга. Для получения высокой разрешающей способности необходимо использовать такие формы сигналов, времячастотная функция рассогласования которых удовлетворяет двум требованиям [151]:

– она близка к единице только в небольшой, максимально компактной, окрестности точки  $t = F = 0$ ;

– во всех других областях плоскости  $t, F$  модуль этой функции значительно меньше единицы.

Невозможно достичь одновременного сосредоточения области высокой корреляции в неограниченно малой окрестности начала координат и равенства нулю совместной корреляционной функции во всех других областях плоскости  $t, F$ . Причина в том, что эта функция удовлетворяет условию, описывающему принцип неопределенности, согласно которому всякое сужение центральной области высокой корреляции с неизбежностью ведет к увеличению значений совместной корреляционной функции в других

областях и может вызвать появление новых областей высокой корреляции, что является причиной неоднозначности измерений:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dF \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_0(t, F)|^2 dt = 1.$$

Указанным выше требованиям в наибольшей степени удовлетворяет совместная корреляционная функция шумового сигнала. При этом ширина главного максимума этой функции имеет порядок  $1/\Delta f$ , а по частоте –  $1/\tau_1$ . Общая протяженность функции по осям: времени –  $2\tau_1$ ; частоте –  $2\Delta f$ , где  $\Delta f$  – ширина спектра, а  $\tau_1$  – длительность сигнала. В случае  $\Delta f\tau_1 \gg 1$  при постоянстве значений квадрата модуля функции в указанном участке плоскости  $t, F$  из принципа неопределенности (7.2) следует:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dF \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_0(t, F)|^2 dt \approx |\Psi_0(t, F)|^2 4\Delta f\tau_1 = 1.$$

Отсюда

$$|\Psi_0(t, F)| = \frac{1}{2\sqrt{\Delta f\tau_1}}$$

для зоны вне области главного максимума. В действительности же указанная функция не постоянна, а колеблется около нулевого значения. Поэтому боковые максимумы этой функции по крайней мере в два раза выше проведенной оценки и для шумового сигнала в качестве основы может быть взято соотношение

$$|\Psi_0(t, F)| \leq 1/\sqrt{\Delta f\tau_1},$$

из которого следует, что по мере увеличения базы шумового сигнала превышение главного максимума над боковыми может быть очень большим. Однако применение шумовых сигналов связано с большими техническими трудностями при осуществлении оптимальной фильтрации, но обеспечивает оптимальность подсветки водного пространства при параметрическом взаимодействии низкочастотных акустических сигналов.

В связи с этим рассмотрим основные характеристики еще одного вида сигналов, манипулированных по фазе псевдослучайными кодами и обладающими по меньшей мере двумя свойствами:

- каждый из сигналов данного множества легко отличим от своей сдвинутой по времени копии;
- каждый из сигналов данного множества легко отличим от любого другого (возможно, сдвинутого по времени) сигнала этого множества.

Данный вид сигналов достаточно подробно рассмотрен в существующей литературе, но его применимость в низкочастотной акустической томографии океанской среды нигде не обоснована.

Оба свойства сигналов определяют разрешающую способность системы и в процессе отбора сигналов, обладающих наилучшей структурой, особое внимание специалистов было привлечено к псевдослучайным и родственным им последовательностям, изучение которых ведется свыше 25 лет.

В большинстве работ по периодическим последовательностям термины «бинарные псевдослучайные последовательности максимальной длины, генерируемые линейными сдвиговыми регистрами», и «M-последовательности» используются как синонимы [150, 152]. Такое внимание обусловлено целым рядом уникальных свойств, которыми они обладают, и, прежде всего, их превосходными периодическими автокорреляционными свойствами.

В литературе наибольшее внимание уделяется двоичным последовательностям максимальной длины, порождаемым линейными сдвиговыми регистрами (M-последовательностям). В полном соответствии с названием эти последовательности представляют собой последовательности максимально возможного периода (равного  $N = 2^n - 1$ ), генерируемые n-каскадным двоичным сдвиговым регистром с линейной обратной связью. Наиболее важная особенность M-последовательности состоит в том, что ее автокорреляционная функция равна N при отсутствии сдвига или  $-1$  для всех остальных значений сдвига ( $1 \leq l < N$ ), т.е. оптимальна в классе возможных автокорреляционных функций двоичных последовательностей периода  $N = 2^n - 1$ . Оптимальность здесь понимается в смысле минимальности пикового значения боковых лепестков в функции автокорреляции.

Основные свойства двоичных последовательностей можно получить из рассмотрения механизма их генерации.

Пусть  $h(x) = h_0x^n + h_1x^{n-1} + \dots + h_{n-1}x + h_n$  – двоичный полином степени n. Здесь  $h_0 = h_n = 1$ , а другие  $h_i$  принимают значения 0 или 1. Двоичная последовательность  $\{u_j\}$  порождается полиномом  $h(x)$ , если при всех j

$$h_0u_j \oplus h_1u_{j-1} \oplus h_2u_{j-2} \oplus \dots \oplus h_nu_{j-n} = 0. \quad (7.3)$$

Здесь  $\oplus$  – знак операции сложения по модулю 2 (т.е. логическая операция «Исключающее ИЛИ»). Производя в выражении (7.3) замену индекса j на  $j + n$  и учитывая, что  $h_0 = 1$ , получим

$$u_{j+n} = h_nu_j \oplus h_{n-1}u_{j+1} \oplus \dots \oplus h_1u_{j+n-1}.$$

Отсюда следует, что последовательность  $\{u_j\}$  можно получить с помощью n-каскадного сдвигового регистра с линейной цепью обратной связи, к которой подключены отводы от каскадов с теми номерами  $0 < i \leq n$ , для которых  $h_i = 1$ . Поскольку  $h_n = 1$ , отвод от n-го каскада используется всегда. Любой сдвиговый регистр может генерировать множество различных последовательностей, в том числе и тривиальную нулевую. Поскольку последняя интереса не представляет, то ее специальными мерами исключают из механизма генерации сдвиговым регистром – нулевое состояние является запрещенным. В связи с этим период последовательности максимальной длины не превосходит величины  $2^n - 1$ , где n – число разрядов регистра или, что эквивалентно, степень порождающего полинома  $h(x)$ .

В отношении самого полинома  $h(x)$  и M-последовательностей, им порождаемых, следует сделать несколько замечаний, описывающих их основные свойства.

Во-первых, период истинной  $M$ -последовательности в точности равен  $N = 2n - 1$  и получить ее можно лишь в единственном случае, если порождающий полином  $\bar{h}(x)$  примитивен, т.е. неприводим и первичен на поле Галуа. При выполнении этого условия появляется возможность для генерирования детерминированного процесса, значения которого в точности известны наперед и который обладает в то же время статистическими свойствами идеального процесса бросания симметричной монеты. Причем достаточно несложное устройство в принципе позволяет сформировать последовательность, которая будет идти бесконечно долго без повторения. Например, при  $n = 100$  период повторения последовательности, генерируемой с тактовой частотой 10 МГц, в миллионы раз превышает возраст Вселенной. Подобные свойства обусловили широкое использование  $M$ -последовательностей в криптографии, при линейном шифровании сообщений, кодировании речи, обнаружении ошибок и стимулировали их углубленное изучение, поскольку подбор и численная проверка результатов в свете сделанной оценки представляются абсолютно бесперспективным делом.

Во-вторых, существует в точности  $N$  различных последовательностей, порождаемых полиномом  $h(x)$ . Все они являются  $N$  различными сдвигами  $M$ -последовательности  $\{u\}$  и имеют вид  $\{u\}$ ,  $\{Tu\}$ ,  $\{T^2u\}$ .

В-третьих, для произвольных  $i$  и  $j$ ,  $0 \leq i, j < N$ , существует единичное  $K$ ,  $0 \leq K \leq N$ , отличное от  $i$  и  $j$  и такое, что

$$T_u^i \oplus T_u^j = T_u^K. \quad (7.4)$$

Последовательность периода  $N$  является  $M$ -последовательностью тогда и только тогда, когда она обладает свойством выражения (7.4), которое обычно называют свойством сдвига и сложения. В-четвертых, если  $M$ -последовательность  $\{u\}$  выступает как двоичный  $N$ -фактор, то вес Хэмминга этого вектора (число входящих в него единиц) в точности равен

$$2^{n-1} = \frac{N+1}{2}.$$

В-пятых, если окно ширины  $n$  перемещается вдоль  $M$ -последовательности, то каждый из  $2n - 1$  ненулевых двоичных наборов из  $n$  чисел будет виден точно один раз. Это свойство окна следует из примитивности полинома  $h(x)$ . Чтобы избежать затруднений на концах последовательности, ее следует записать в виде замкнутой окружности.

Последние два свойства фактически означают, что в каждом цикле генерации  $M$ -последовательности ( $N$  периодов тактовой частоты) половину всех единиц составляют «одиночные», четвертую часть – двойные (то есть две следующие подряд), восьмую часть – тройные и т.д. То же самое относится и к последовательно идущим нулям, за исключением, разумеется, пропущенного при состоянии «все разряды регистра – ноль». Это свидетельствует о том, что вероятность появления начала и конца единичного состояния не зависит от результата последнего переброса, и, следовательно, вероятность завершения цепочки последовательно возникших единиц или нулей для каждого переброса составляет одну вторую.

В-шестых, если последовательность полного цикла ( $N$  периодов тактовой частоты) сравнить с этой же последовательностью по сдвинутой на любое число тактов  $n$

(где  $n \neq 0$  и не кратно  $N$ ), то число несовпадений будет превышать число совпадений на единицу. Иными словами автокорреляционная функция  $M$ -последовательности при нулевой задержке равняется  $N$ , а во всех остальных точках:  $-1$ . Иногда говорят о нормированной автокорреляционной функции:

$$\rho(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^{u_j + u_{i+j}}.$$

В этом случае

$$\rho(0) = 1, \rho(i) = -1/N, \quad 1 \leq i \leq 2n - 2$$

и существует доказательство, что в смысле минимизации величины  $\rho(i)$  эта функция является возможной наилучшей автокорреляционной функцией любой двоичной последовательности длины  $2n - 1$ .

Следует отметить, что в большинстве практических приложений алфавит двоичной последовательности сдвигового регистра, т.е. ноль и единица, замещается на бинарную последовательность бинарных импульсов с амплитудами  $\pm 1$ , от чего свойства  $M$ -последовательностей не изменяются, за исключением некоторых численных оценок.

До сих пор рассматривались свойства модулирующей функции, между тем и выбор типа модуляции имеет существенное значение. Практические возможности генерирования сложных сигналов ограничены двумя основными случаями, если это:

- частотно-модулированные импульсы с большой девиацией;
- фазоманипулированные сигналы.

Частотно-модулированные импульсы с большой девиацией кратко уже рассматривались, а фазоманипулированные сигналы представляют собой непрерывную последовательность прямоугольных радиоимпульсов, образованную в результате многократных скачков фазы несущей. Скачкообразные изменения фазы возможно осуществлять на любую величину в пределах от нуля до  $2\pi$ , но практическое применение нашли сигналы, у которых каждый скачок равен  $\pi$ . Это объясняется тем, что два импульса, имеющие одинаковую мощность и отличающиеся только фазой на  $\pi$ , обладают максимально возможной степенью различия.

Функция их взаимной корреляции при отсутствии временного сдвига равна  $-1$ . Именно поэтому использование таких сигналов при передаче дискретных сообщений обеспечивает наибольшую помехоустойчивость [155]. Последнее существенно, поскольку оптимизирует энергетический потенциал источника сигнала.

Сигналы такого рода сравнительно просто формировать, коммутируя «полярность» в нужные моменты времени, хотя получение любой другой дискретности по фазе не вызывает особых проблем. Особенностью фазоманипулированного сигнала является то, что он состоит из прямоугольных импульсов фиксированной длительности (дискретов). Моменты скачков фазы кратны этой длительности, ввиду детерминированности тактового интервала у модулирующей  $M$ -последовательности. Может показаться, что такое положение дел неоправданно сужает класс рассматриваемого сигнала, поскольку скачки фазы можно расположить произвольно. В действительности это ограничение несущественно, так как, увеличивая число дискрет  $N$ , всегда можно выбрать интервал дискрета достаточно малым.

Рассмотрим возможности использования фазоманипулированного бинарной M-последовательностью  $\{d_i\}$  гармонического сигнала в низкочастотной акустической томографии океанской среды, основанной на дифракционном способе обнаружения и параметрическом взаимодействии звуковых волн. Аналитически данный вид сигнала может быть представлен в виде

$$v(t) = V \sin[\omega_0 t + \theta(t)],$$

где  $\theta(t)$  – функция, описывающая закон манипуляции фазы с дискретностью  $\pi$  в моменты времени  $t = i\tau_0$ .

Изменение начальной фазы в моменты времени  $t = i\tau_0$  составляет  $\theta(i\tau_0) = \theta_i = \arccos d_i = \pi$ , что соответствует  $d_i = -1$ . В остальные дискретные моменты времени  $t = i\tau_0$  начальная фаза не меняется, поскольку для них  $d_i = +1$  и  $\theta(i\tau_0) = \theta_i = \arccos d_i = 0$ ;  $\tau_0$  – длительность одного дискрета [3, 4].

Полученный в результате фазоманипулированный сигнал имеет период  $T = N\tau_0 = (2n - 1)\tau_0$  и комплексную амплитуду

$$\bar{V}(f) = V \sum_{i=-\infty}^{+\infty} d_i \{1[t - (i-1)\tau_0] - 1(t - i\tau_0)\},$$

где  $1(f)$  – единичная функция.

Нормированная корреляционная функция комплексной амплитуды этого сигнала при временном сдвиге  $k\tau_0 + \varepsilon$ , где  $k$  – целое неотрицательное число,  $0 < \varepsilon < \tau_0$ , имеет вид

$$\begin{aligned} r(k\tau_0 + \varepsilon) &= \frac{1}{V^2 N \tau_0} \int_0^{N\tau_0} \bar{V}(x) \bar{V}(x - k\tau_0 - \varepsilon) dx = \\ &= \frac{1}{N} \left[ \left(1 - \frac{\varepsilon}{\tau_0}\right) \sum_{i=1}^N d_i d_{i+k} + \frac{\varepsilon}{\tau_0} \sum_{i=1}^N d_i d_{i+k+1} \right]. \end{aligned}$$

Поскольку рассматриваемый сигнал является непрерывным и периодическим, то корреляционная функция вычисляется путем интегрирования по времени на интервале длительности периода  $T = N\tau_0$  сигнала. Используя свойство M-последовательностей,  $\sum_{i=1}^N d_i d_{i+k} = -1$ , предыдущее выражение может быть приведено к виду

$$r(\varepsilon) = 1 - \left(\frac{\varepsilon}{\tau_0}\right) \left(1 - \frac{1}{N}\right) \text{ при } 0 \leq \varepsilon < \tau_0;$$

$$r(k\tau_0 + \varepsilon) = -\frac{1}{N} \text{ при } 1 \leq k < N - 2 \text{ или, что то же,}$$

$$r(t) = 1 - \left(1 + \frac{1}{N}\right)|t|/\tau_0 \text{ при } |t| < \tau_0;$$

$$r(t) = -\frac{1}{N} \text{ при } \tau_0 \leq t \leq (N-1)\tau_0.$$

Кроме того, поскольку сигнал периодический, то его корреляционная функция имеет тот же период  $r(t + \rho N\tau_0) = r(t)$ , где  $\rho$  – любое целое число.

Таким образом, корреляционная функция имеет за период  $T = N\tau_0$  один максимум шириной порядка  $\tau_0$ ; в течение большей части периода длительностью  $(1 - 2/N)T$  ее абсолютная величина в  $N$  раз меньше максимума. Поскольку  $N$  можно выбрать сколь угодно большим, то корреляционная функция таких сигналов может быть получена весьма близкой к идеальной. Дополнительные максимумы нормированной совместной корреляционной функции модуляции  $\Psi_0(t, F)$  на плоскости  $t, F$  имеют высоту порядка  $1/\sqrt{N}$ , т.е. могут быть достаточно малыми.

Для оценки возможностей использования фазоманипулированных сигналов, в интересах обнаружения и уточнения технических требований к аппаратуре излучения, приема и обработки, необходимо определиться со спектральными характеристиками  $M$ -последовательностей. Прежде всего следует отметить, что рассматриваемый сигнал является периодическим, с периодом  $T = N\tau_0$ , и поэтому имеет дискретный спектр. Модуляционный сигнал в бинарном представлении относится к классу последовательности прямоугольных импульсов со случайным периодом, кратным детерминированному тактовому интервалу  $\tau_0$ . Поэтому наиболее целесообразным путем расчета энергетического спектра [191–193] является определение его по автокорреляционной функции, которая ввиду периодического характера последовательности также является периодической.

Амплитуда  $k$ -й гармоники автокорреляционной функции последовательности может быть представлена [4, 173] как

$$B\left(\frac{2\pi k}{N\tau_0}\right) = \frac{2}{N\tau_0} \int_0^{N\tau_0} r(t) \cos\left(\frac{2\pi k}{N\tau_0} t\right) dt = \frac{2V^2(N+1)}{\pi^2 k^2} \sin^2 \frac{\pi k}{N},$$

а постоянная составляющая этой функции примет вид

$$B(0) = \frac{1}{N\tau_0} \int_0^{N\tau_0} r(t) dt = \frac{V^2}{N^2}.$$

Вследствие этого постоянная составляющая двоичной псевдослучайной последовательности равна

$$\rho(0) = \left|e(0)^{1/2}\right| = \frac{V}{N}, \quad (7.5)$$

а амплитуда ее  $k$ -й гармоники имеет вид



$$\rho\left(\frac{2\pi k}{N\tau_0}\right) = \left[ \left[ 2B\left(\frac{2\pi k}{N\tau_0}\right) \right]^{1/2} \right] = \frac{2V}{\pi k} \left| (N+1)^{1/2} \sin \frac{\pi k}{N} \right|. \quad (7.6)$$

Если рассмотреть периодическую последовательность, период которой имеет ту же длительность, что и период двоичной М-последовательности, но включающей один прямоугольный импульс той же амплитуды, и с длительностью  $\tau_0$ , равной детерминированному тактовому интервалу, как и у псевдослучайной последовательности, то тогда имеем:

- для постоянной составляющей

$$\rho_1(0) = \frac{V}{N}, \quad (7.7)$$

- для амплитуды k-й гармоники

$$\rho_1\left(\frac{2\pi k}{N\tau_0}\right) = \frac{2V}{\pi k} \left| \sin \frac{\pi k}{N} \right|. \quad (7.8)$$

Из сопоставления четырех последних выражений (7.5 – 7.8) следует, что кодирование прямоугольных импульсов по закону бинарной М-последовательности не изменяет постоянной составляющей, что объясняется спецификой этой последовательности. Но она увеличивает в  $(N+1)^{1/2} = 2n/2$  раз амплитуды всех гармонических составляющих сигнала (функциональная зависимость от частоты огибающей спектра с точностью до постоянного множителя сохраняется).

Таким образом, фазовая манипуляция М-последовательностью несущей с частотой  $f_0$  сводится к сдвигу спектра модулирующей функции из области низких частот в область с центральной частотой  $f_0$ .

Спектральные характеристики зондирующего сигнала полностью определяются модулирующей М-последовательностью, огибающая спектральной плотности мощности, которой может быть описана следующей функциональной зависимостью:

$$G_i(f) = 2\sigma^2\tau_0 \left[ \frac{\sin \pi f \tau_0}{\pi f \tau_0} \right]^2, \quad (7.9)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия процесса.

Фактически имеем линейчатый спектр, но это проявляется только в случае анализа за время, которое много больше периода последовательности  $T = N\tau_0$ .

Степень неравномерности спектральной плотности можно оценить путем разложения в ряд частотно-зависимого члена выражения (7.9):

$$\left[ \frac{\sin \pi f \tau_0}{\pi f \tau_0} \right]^2 = \left[ 1 - \frac{1}{3!} (\pi f \tau_0)^2 + \dots \right]^2 \approx 1 - \frac{1}{3} (\pi f \tau_0)^2.$$

Так, в полосе частот равной 26 % от тактовой частоты сдвигающего регистра, неравномерность спектра составляет – 1дБ, а первый ноль спектра размещается на частоте, равной тактовой, как и у обычного прямоугольного импульса.

В заключение рассмотрения свойств и параметров фазоманипулированных псевдослучайными последовательностями просветных сигналов можно отметить, что ширина их спектра равна ширине спектра элементарных импульсов длительности  $\tau_0$  (дискретов), из которых составлены эти сигналы, т.е.  $\Delta f \cong 1/\tau_0$ . Поэтому база сигнала, характеризующая его информативность, определяющая размеры диаграммы неопределенности и численно равная произведению ширины спектра  $\Delta f$  на длительность периода  $T = N\tau_0$ , определяется как  $B = \Delta f T = N = 2n - 1$  и обычно много больше единицы. Томографические системы, использующие такой сигнал, позволяют получать высокую разрешающую способность, как по пространственным структурам (времени), так и по радиальной скорости перемещения неоднородностей (частоте), и проводить оптимальную фильтрацию при обработке принимаемых сигналов и восстановлении пространственных образов.

Указанные характеристики достигаются при сравнительно больших значениях  $N$  (порядка тысячи). Это требует выбора  $n$  (разрядность регистра) порядка десяти. Следует обратить внимание на энергетический аспект. При одинаковой пиковой мощности и сохранении той же разрешающей способности по пространственной координате (времени) применение систем со сложным сигналом, по сравнению с простейшей, применяемой в настоящее время, импульсной системой, позволяет увеличить энергию сигнала в  $N$  раз. При этом энергетическая дальность действия возрастет в  $\sqrt{N}$  раз (или  $\sqrt[4]{N}$  для гидролокационных систем), что при  $N = 1023$  дает рост этого параметра приблизительно в 32 раза (или 5,66 раз для сонара) [4, 193].

Теоретические рассуждения в разделе были основаны на принципах высокочастотной локации водной среды. В связи с повышенной устойчивостью просветных сигналов к условиям нестабильности канала их распространения, наилучшим вариантом зондирующих сигналов являются посылки с бинарной  $M$ -последовательностью.

## **7.2. Рассеяние акустических волн при распространении в океанском волноводе**

Улучшение характеристик устройств обработки требует более глубокого понимания особенностей распространения акустических волн в водной среде, а усовершенствование акустических моделей стимулирует разработку более сложных методов обработки. Характер распространения акустических волн в океане определяется целым рядом факторов, обусловленных характеристиками как самой среды, так и ее границ. Для морской среды характерно наличие неоднородностей или в общем случае областей с различными значениями показателей преломления звука, которые находятся в состоянии турбулентного движения. Наличие подобных пространственно-временных неоднородностей среды обуславливает прием сигналов по нескольким лучам, причем их количество и углы прихода, а также их амплитуды и фазы будут непрерывно изменяться [195].

Наибольшее влияние на распространение звука в море оказывают вертикальные градиенты скорости звука, создающие рефракцию, и, как следствие, многолучевость сигнала в точке приема. Акустическое поле описывается уравнениями линейной акустики, в которых детерминированная компонента скорости звука представляет явле-

ние рефракции, а случайная компонента, вызванная флуктуациями поля температуры и поля солености, а также внутренними волнами, – явления объемного рассеяния звука [196].

Рефракция как физическое явление характерна для распространения волн в среде с изменяющейся регулярным образом в пространстве-времени скоростью звука. Она состоит в искривлении лучей, возникающем в результате их внутренних отражений от областей с различными скоростями звука. В плоскостой модели морского волновода искривление лучей возникает в вертикальной плоскости. В областях с вертикально-горизонтальными градиентами скорости звука лучи искривляются в двух плоскостях – перпендикулярной и параллельной поверхности. При волновой трактовке задачи распространения рефракция возникает как результат интерференции различных мод колебаний и имеет форму лучевых трубок, по которым происходит преимущественное распространение звуковой энергии.

Детерминированная компонента акустического поля допускает модовое (волновое) представление, а в области средних и высоких частот – лучевую (оптическую) асимптотику.

Для учета реальных условий распространения низкочастотных звуковых волн в океанском волноводе выведем математические зависимости для определения коэффициентов их межмодового рассеяния на основании уравнения Гельмгольца [155]:

$$\rho \operatorname{div}(\rho^{-1} \operatorname{grad} u) + (\omega^2 / c^2) u = 0, \quad (7.10)$$

для области, включающей слой донных пород. Вводится малый параметр  $\varepsilon$  и разложения

$$u = u_0 + \varepsilon, \quad \rho = \rho_0 + \varepsilon \rho_1, \quad c = c_0 + \varepsilon c_1.$$

Предполагается, что  $\rho_0$  и  $c_0$  зависят только от  $z$ , и неоднородности  $\rho_1$  и  $c_1$  как функции  $x, y$  имеют компактный носитель  $\Omega$ .

Подстановки

$$u_0 = \varphi_j(z) H_0^1(k_j R'), \quad u_1 = \sum_i C_{ij}(x, y) \varphi_i,$$

где  $\varphi_i$  – моды,  $R' = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ ,  $(x_0, y_0)$  – координаты источника звука; дают, с помощью приближений дальнего поля, формулы для вычисления величины  $C_{ij}$ . Эти формулы обобщают соответствующие формулы из работы [156], где рассматривался случай

$$\rho = \bar{\rho}_1 + \Theta(z - \varepsilon f(x, y))(\bar{\rho}_2 - \bar{\rho}_1), \quad c = \bar{c}_1 + \Theta(z - \varepsilon f(x, y))(\bar{c}_2 - \bar{c}_1)$$

с постоянными величинами параметров  $\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \bar{c}_1, \bar{c}_2$  ( $\Theta$  – ступенчатая функция Хевисайда).

С помощью специального выбора  $(x, y)$ -координатной системы с началом в ограниченной области  $\Omega$  простые формулы, использующие двумерное преобразование Фурье-функции топографии  $f(x, y)$ , были получены в случае удаленного источника. Решающее

приближение состояло в замене  $1/\sqrt{R'}$  на  $1/\sqrt{x_0^2 + y_0^2}$  в асимптотике функции Ханкеля. С помощью использования разложений Фурье и Фурье – Бесселя  $\rho_1$ ,  $(\rho_1/\rho_0)_z$  и  $c_1$  по угловой и радиальной координатам соответственно мы получим простые формулы расчета для  $C_{ij}$ , которые не используют это приближение и работают одинаково хорошо как для удаленных, так и для близко расположенных источников. При выводе этих формул существенно использованы теоремы сложения для цилиндрических функций и замкнутые выражения для трilinearных комбинаций для функций Бесселя. Полученные формулы могут быть использованы для регуляризации обратной задачи. Перейдем к более подробному изложению. Звуковое поле точечного источника в волноводе постоянной глубины  $H$  описывается уравнением Гельмгольца

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2} u = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$$

с граничными условиями:

$$u \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0.$$

Будем предполагать, что повсюду, за исключением некоторой ограниченной области  $\Omega$ , плотность и скорость звука однородны относительно горизонтальных координат и принимают значения соответственно  $\rho_0(z)$  и  $c_0(z)$ . Внутри области  $\Omega$  плотность и скорость звука неоднородны и принимают значения  $\rho_1(x, y, z)$  и  $c_1(x, y, z)$ .

Предполагая, что эти значения малы, решим задачу рассеяния звукового поля точечного источника на области неоднородности.

Запишем скорость звука и плотность в виде

$$c = c_0(z) + \varepsilon c_1(x, y, z); \quad \rho = \rho_0(z) + \varepsilon \rho_1(x, y, z),$$

где  $\varepsilon$  – малый параметр.

Звуковое поле  $u$  запишем в виде

$$u = u_0 + \varepsilon u_1,$$

где  $u_0$  – звуковое поле источника;  $u_1$  – рассеянное поле.

Подставим выражения для  $\rho$ ,  $c$  и  $u$  в уравнение (7.10) и выпишем члены при  $\varepsilon$ :

$$\rho_0 \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\rho_0} u_{1x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\rho_0} u_{1y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho_0} u_{1z} \right) + \frac{\omega^2}{c_0^2},$$

$$u_1 = \frac{\rho_{1x}}{\rho_0} u_{0x} + \frac{\rho_{1y}}{\rho_0} u_{0y} + \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)_z + 2 \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{c_1}{c_0} u_0.$$

Полагаем  $u_0 = \phi_j(z)H_0^{(1)}(k_j R')$ , где  $R' = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  – расстояние от источника с координатами  $(x_0, y_0)$  до точки наблюдения в декартовой системе координат, центр которой находится в области  $\Omega$ ;  $\phi_j$  и  $k_j$  – собственная функция и собственное значение с номером  $j$ , удовлетворяющие следующей краевой задаче:

$$\rho_0 \partial_z \left( \frac{1}{\rho_0} \phi_z \right) + \frac{\omega^2}{c^2} \phi = k^2 \phi, \phi|_{z=0} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0.$$

Проведя необходимые преобразования, получим следующие формулы для коэффициентов рассеяния из  $i$ -й моды в  $j$ -ю [3, 4, 159]:

$$C_{ij}(\eta, \theta) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_x \int_y f(x, y) \exp(ir(x \cos \Psi + y \sin \Psi)) \times \\ \times \exp(ir \eta \cos(\Psi - \theta)) \frac{1}{\Lambda_i^2 - r^2} r dy dx d\Psi dr, \quad (7.11)$$

где

$$f(x, y) = \int_{-H}^0 \left\{ \left( -\frac{\rho_{1x}}{\rho_0} \frac{k_j(x - x_0)}{R'} - \frac{\rho_{1y}}{\rho_0} \frac{k_j(y - y_0)}{R'} \right) \frac{\phi_i}{\rho_0} \frac{\phi_j}{\rho_0} \times \right. \\ \left. \times H_1^{(1)}(k_j R') + \left( \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)_z \frac{\phi_i \phi_{jz}}{\rho_0} + 2 \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{c_1}{c_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} \right) H_0^{(1)}(k_j R') \right\} dz. \quad (7.12)$$

Для оценки интеграла по  $\Psi$  в формуле (7.11) воспользуемся методом стационарной фазы в точке  $\Psi = \theta$ . Получим следующее выражение:

$$C_{ij}(\eta) = \frac{\sqrt{2\pi}}{4\pi^2} \frac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{\eta}} \int_x \int_y \int_0^\infty f(x, y) \frac{r \exp(ir(\eta - [x \cos \theta + y \sin \theta]))}{\sqrt{r(\Lambda_i^2 - r^2)}} dr dy dx.$$

Найдем теперь асимптотику для интеграла по  $r$ . Рассмотрим замкнутый контур, охватывающий первую четверть комплексной плоскости. Интеграл по этому контуру будет равен вычету в точке  $\Lambda_i$  и интегралу по мнимой оси, оценку которого найдем по методу Лапласа. Для интеграла вида

$$I = \int_0^\infty \frac{r \exp(ir(\eta - [x \cos \theta + y \sin \theta]))}{\sqrt{r(\Lambda_i^2 - r^2)}} dr$$

имеем оценку

$$I = \frac{-i\pi}{\sqrt{\Lambda}} \exp(i\Lambda(\eta - [x \cos \theta + y \sin \theta])) + \\ + \frac{\sqrt{i\pi}}{2i\Lambda^2} \frac{1}{(\eta - (x \cos \theta + y \sin \theta))^{3/2}}.$$

Поскольку второе слагаемое мало, мы можем им пренебречь и окончательно получить следующее выражение:

$$C_{ij}(\eta) = -\frac{i\sqrt{2\pi}}{4\pi} \frac{\exp(i\Lambda\eta - i\pi/4)}{\sqrt{\Lambda\eta}} \times \\ \times \int_x \int_y f(x, y) \exp(-i\Lambda(x \cos \theta + y \sin \theta)) dy dx$$

Чтобы восстановить из производных плотность, в выражении для  $f(x, y)$ , проинтегрируем первое слагаемое по частям по  $x$  и по  $y$ . Тогда формула (7.12) будет иметь вид

$$f(x, y) = \int_{-H}^0 \left( k_j^2 \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\Phi_i \Phi_j}{\rho_0} + \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)_z \frac{\Phi_i \Phi_j}{\rho_0} + 2 \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{c_1}{c_0} \frac{\Phi_i \Phi_j}{\rho_0} \right) H_0^{(1)}(k_j R') dz - \\ - i\Lambda \int_{-H}^0 \left( \frac{k_j(x-x_0)}{R'} \cos \theta - \frac{k_j(y-y_0)}{R'} \sin \theta \right) \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\Phi_i}{\rho_0} \frac{\Phi_j}{\rho_0} H_1^{(1)}(k_j R') dz. \quad (7.13)$$

Перейдем в полярные координаты  $x = R \cos \alpha$ ,  $y = R \sin \alpha$ ,  $R' = \sqrt{R^2 + R_0^2 - 2RR_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}$ , где  $(R_0, \alpha_0)$  – координаты точечного источника. Отметим, что поскольку коэффициенты  $k_j(x-x_0)/R'$  и  $k_j(y-y_0)/R'$  представляют собой соответственно  $\cos(\psi - \alpha)$  и  $\sin(\psi - \alpha)$ , где  $\psi$  – угол между  $R$  и  $R'$ , то по теореме сложения Графа имеем разложения [170]:

$$\cos \psi H_1^{(1)}(k_j R') = \sum_{m=-\infty}^{\infty} H_{m+1}^{(1)}(k_j R_0) J_m(k_j R) \cos m(\alpha - \alpha_0);$$

$$H_0^{(1)}(k_j R') = \sum_{m=-\infty}^{\infty} H_m^{(1)}(k_j R_0) J_m(k_j R) \cos m(\alpha - \alpha_0).$$

Подставляя разложения в формулу (7.13), имеем

$$\begin{aligned}
C_{ij}(\eta) = & -\frac{i\sqrt{2\pi} e^{(i\Lambda\eta - i\pi/4)}}{4\pi \sqrt{\Lambda\eta}} \times \\
& \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ H_m^{(1)}(k_j R_0) \int_0^{\infty} R J_m(k_j R) \int_0^{2\pi} f_0(R, \alpha) \exp(-iR\Lambda \cos(\theta - \alpha)) \times \right. \\
& \quad \times \cos m(\alpha - \alpha_0) d\alpha dR - \\
& - i\Lambda H_{m+1}^{(1)}(k_j R_0) \int_0^{\infty} R J_m(k_j R) \int_0^{2\pi} f_1(R, \alpha) \exp(-iR\Lambda \cos(\theta - \alpha)) \times \\
& \quad \times (\cos m(\alpha - \alpha_0) \cos(\alpha_0 + \theta) + \sin m(\alpha - \alpha_0) \sin(\alpha_0 + \theta)) d\alpha dR,
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
f_0(R, \alpha) = & \int_{-H}^0 \left\{ k_j^2 \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} + \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)_z \frac{\phi_i \phi_{jz}}{\rho_0} + 2 \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{c_1}{c_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} \right\} dz, \\
f_1(R, \alpha) = & \int_{-H}^0 k_j^2 \frac{\rho_1}{\rho_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} dz.
\end{aligned}$$

Разложим  $\exp\{-iR\Lambda \cos(\theta - \alpha)\}$  по функциям Бесселя  $J_n(\Lambda R)$ , а функции  $\rho_1$ ,  $(\rho_1/\rho_0)_z$  и  $c_1$  разложим в ряды Фурье:

$$\rho_1 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k(R) e^{ik\alpha}, \quad \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)_z = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l(R) e^{il\alpha}, \quad c_1 = \sum_{s=-\infty}^{\infty} c_s(R) e^{is\alpha}.$$

Теперь интегралы по  $\alpha$  во всех слагаемых будут иметь вид

$$\int_0^{2\pi} e^{i(k+n)\alpha} \cos m(\alpha - \alpha_0) d\alpha = \pi e^{i\alpha_0} \delta_{k+n,m},$$

где  $\delta_{k+n,m}$  – символ Кронекера, в результате чего в рядах Фурье остаются только члены с индексом  $m-n$ .

Тогда получим следующее выражение для межмодовых коэффициентов:

$$C_{ij}(\eta) = -\frac{i\sqrt{2\pi} \exp(i\Lambda\eta - i\pi/4)}{4\pi \sqrt{\Lambda\eta}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n \exp(-in\theta) \times \\ \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp(im\alpha_0) \left\{ \left( k_j^2 H_m^{(1)}(k_j R_0) - i\Lambda H_{m+1}^{(1)}(k_j R_0) e^{i(\alpha_0 + \theta)} \right) \times \right. \\ \times \int_0^{\infty} \tilde{a}_{m-n}(R) J_m(k_j R) R dR + \\ \left. + H_m^{(1)}(k_j R_0) \int_0^{\infty} \tilde{b}_{m-n}(R) J_m(k_j R) R dR + \right. \\ \left. + H_m^{(1)}(k_j R_0) \int_0^{\infty} \tilde{c}_{m-n}(R) J_m(k_j R) R dR \right\},$$

где

$$\tilde{a}_{m-n} = \int_{-H}^0 k_j^2 \frac{a_{m-n}}{\rho_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} dz, \quad \tilde{b}_{m-n} = \int_{-H}^0 b_{m-n} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} dz, \\ \tilde{c}_{m-n} = \int_{-H}^0 2 \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{c_{m-n}}{c_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} dz.$$

Коэффициенты  $a(R)$ ,  $b(R)$ ,  $c(R)$  разложим в ряды Фурье – Бесселя по функциям  $J_{m-n}(\gamma_k R/L)$ , где  $L$  – правая граница интервала разложения ( $0 < R < L$ );  $\gamma_k$  – положительные корни уравнения  $J_{m-n}(R) = 0$ . Коэффициенты разложения обозначим соответственно  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $C_k$ .

Подставляя эти разложения в выражение  $C_{ij}$ , окончательно получим

$$C_{ij}(\eta) = -\frac{i\sqrt{2\pi} \exp(i\Lambda\eta - i\pi/4)}{4\pi \sqrt{\Lambda\eta}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n \exp(-in\theta) \times \\ \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \exp(im\alpha_0) \times \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \left( k_j^2 H_m^{(1)}(k_j R_0) - i\Lambda H_{m+1}^{(1)}(k_j R_0) e^{i(\alpha_0 + \theta)} \right) \tilde{A}_k + \right. \\ \left. + H_m^{(1)}(k_j R_0) \tilde{B}_k + H_m^{(1)}(k_j R_0) \tilde{C}_k \right\} \int_0^{\infty} J_{m-n} \left( \frac{\gamma_k}{L} R \right) J_m(k_j R) J_n(\Lambda R) R dR;$$

$$\frac{2}{\pi} \frac{\exp(i(m\phi - n\phi_2))}{\sqrt{4 \left( \frac{\gamma_k}{L} \right)^2 \Lambda^2 - \left( k_j^2 - \left( \frac{\gamma_k}{L} \right)^2 - \Lambda^2 \right)^2}},$$



где

$$\tilde{A}_k = \int_{-H}^0 k_j^2 \frac{A_k}{\rho_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} dz, \quad B_k = \int_{-H}^0 B_k \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} dz,$$

$$\tilde{C}_k = \int_{-H}^0 2 \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{c_{m-n}}{c_0} \frac{\phi_i \phi_j}{\rho_0} dz.$$

Полученное выражение можно свести к еще более простому виду, подставив значение интеграла:

$$I_{mn} = \int_0^\infty J_{m-n} \left( \frac{\gamma_k}{L} R \right) J_m(k_j R) J_n(\Lambda R) R dR,$$

$$I_{mn} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \frac{\exp(i(m\varphi - n\varphi_2))}{\sqrt{4 \left( \frac{\gamma_k}{L} \right)^2 \Lambda^2 - \left( k_j^2 - \left( \frac{\gamma_k}{L} \right)^2 - \Lambda^2 \right)^2}} & \text{при } \left( \left| \frac{\gamma_k}{L} - \Lambda \right| < k_j < \left| \frac{\gamma_k}{L} + \Lambda \right| \right) \\ 0 & \text{при невыполнении условия.} \end{cases} \quad (7.14)$$

Формула (7.14) может использоваться для решения обратной задачи восстановления неоднородности морской среды, что позволяет в приближенной форме учитывать условия распространения зондирующего сигнала. Обрезая входящие в данное выражение ряды конечным числом членов, приходим к линейной системе уравнений, которая в общем случае является невырожденной. Численные исследования показывают, что эта система плохо обусловлена, так что требуется дополнительная регуляризация дескриптивного характера [4, 160–162]. Получены решения задач восстановления томографических образов неоднородностей морской среды с приближенным учетом преобразования сигналов в условиях волновода.

*В седьмой главе.*

Рассмотрены основные положения классических высокочастотных методов гидролокации водной среды, томографического восстановления образов объектов и неоднородностей морской среды. Обоснована возможность их практической реализации в низкочастотных просветных гидроакустических системах мониторинга полей объектов и среды морских акваторий с повышенной нестабильностью и наличии помех. Наиболее помехоустойчивыми сигналами в просветных системах мониторинга полей объектов и среды, являются посылки с бинарной M-последовательностью. Они обеспечивают повышенную разрешающую способность, как по пространству, так и по радиальной скорости перемещения объекта при восстановлении томографических образов их полей. Такие сигналы легко реализуются при формировании и излучении (подсветке) среды, а также при обработке в приемных трактах (при отфильтровке) и последующем восстановлении пространственных образов измеряемых полей;

Проанализированы закономерности рассеяния просветных акустических волн на неоднородностях при распространении в океанском волноводе. Обоснованы пути их устранения как случайных помех в приемных трактах обработки и выделения информационных признаков объектов.

## **8. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОСВЕТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ И СРЕДЫ**

### **8.1. Основные понятия и определения акустической томографии**

При исследовании проблемы акустической диагностики неоднородностей и возмущений морской среды на современном этапе используются в основном различные «типично радиофизические» методы. Примерами этого могут служить попытки использовать метод темного поля, доплеровское смещение частоты и т.д. Однако непосредственный перенос данных методов в акустическую томографию океана наталкивается на трудности, связанные с особенностями распространения просветных сигналов и взаимодействия их с пространственными неоднородностями в стратифицированной, нестационарной океанской среде.

Свойства просветного сигнала, прошедшего через океанскую толщу, определяются интегральным влиянием расположенных по трассе неоднородностей и возмущений морской среды.

Использование теоретических представлений о взаимодействии просветного сигнала с локальными неоднородностями и возмущениями среды дает возможность по характеристикам принятого сигнала судить об усредненных по трассе распространения волн параметрах этих физических явлений [1, 2, 196, 197, 227- 228].

Регистрация вариаций просветного сигнала позволяет разделить вклады, вносимые мелко- и крупномасштабными неоднородностями и возмущениями от движущихся объектов, однако это еще не решает задачу получения информации о пространственном распределении этих неоднородностей и возмущений. Импульсный локационный подход в таком многообразии одновременно существующих неоднородностей не применим, поскольку речь идет о мелких, плавных и крупных (по сравнению с длиной волны просветного сигнала) образованиях, которые практически не рассеивают сигнал в обратном направлении [230].

Томографические методы позволяют получить представление о пространственной структуре неоднородности, с чем связано и происхождение слова «томография», в основе которого лежат греческие корни «томос» – слой, сечение и «граф» – пишу, рисую, поскольку исторически первые томографические методы давали именно послойное изображение объемной структуры.

В общем виде акустическую томографию можно отнести к группе методов, позволяющих получить локальные характеристики внутренней структуры исследуемого возмущения (неоднородности) по характеристикам просветного сигнала, прошедшего через исследуемую область.

В настоящее время существует большое число методов реконструкции пространственной структуры возмущений, в которых не предполагается, в буквальном смысле, послойное восстановление, но которые по ряду существенных общих признаков следует отнести к томографическим.

Предложенные в последние годы томографические методы предполагают аналоговую и цифровую обработку набора проекций, полученных как по одному, так и по различным направлениям.

Математическая обработка набора интегральных изображений-проекций, которая и составляет основу метода акустической томографии, позволяет реконструировать ло-

кальную (дифференциальную) структуру томографируемой изучаемой неоднородности (возмущений). Подобное понимание существа томографического подхода принято в подавляющем числе публикаций последних лет, поэтому в дальнейшем мы будем придерживаться определения томографии как метода реконструкции локальных характеристик объекта по набору его интегральных характеристик-проекций путем их специальной обработки.

Аналогично в просветной, как активно-пассивной низкочастотной томографии можно использовать метод реконструкции локальных характеристик возмущений водной среды, созданных движущимся объектом, на основе интегральных проекций совокупности просветных сигналов, дискретно измеренных на приемных элементах и специально обработанных. С точки зрения общности математических методов томографической можно считать группу задач, связанных с различными операциями (свертка, построение корреляторов, фильтрация, сжатие, расчет энергетического и фазового спектров, разности фаз спектральных компонент и т.п.) над функциями одной или нескольких переменных в пространстве Радона [1, 2, 4, 7, 209, 223, 224].

## 8.2. Особенности решения задач активно-пассивной томографии

В общем случае любая томографическая задача (акустическая, модовая, интерференционная, дифракционная) сводится к решению интегрального уравнения вида [4,7, 230]

$$\int_{M(\rho)} P(\rho, r)g(\rho)d\rho = f(r), \quad (8.1)$$

где  $\rho$  и  $r$  – пространственные координаты (в принципе это могут быть координаты в обобщенном фазовом пространстве);  $g(\rho)$  – реконструируемый образ;  $f(r)$  – измеряемый параметр, характеристика-проекция;  $P(\rho, r)$  – ядро интегрального преобразования;  $M(\rho)$  – траектория, вдоль которой осуществляется измерение.

Определение «классического» фазового пространства, взятое из Физического энциклопедического словаря, звучит следующим образом: «Геометрический образ, представленный множеством всевозможных состояний физической системы, наделенных естественным понятием близости». При этом состояние такой системы в некоторый момент времени изображается в виде точки в этом пространстве. Бесконечномерные фазовые пространства имеют распределенные физические системы, такие, как струна, мембрана, упругая водная среда, электромагнитное поле [230, 231].

При изменении состояния системы точка (фазовая точка), изображающая это состояние в фазовом пространстве, описывает некоторую кривую, называемую фазовой траекторией. Через каждую точку фазового пространства проходит одна и только одна фазовая траектория, поэтому фазовое пространство разбивается на непересекающиеся фазовые траектории, соответствующие всевозможным состояниям системы. Этот геометрический образ – фазовое пространство, заполненное непересекающимися фазовыми траекториями, называется фазовым портретом системы.

Как видно из «классического» определения, фазовое пространство имеет следующие особенности:

1. Время не является одной из координат фазового пространства. Течению времени соответствует перемещение фазовой точки по фазовой траектории.

2. Через каждую точку проходит одна и только одна фазовая траектория.

3. В неявном виде подразумевается, что все координаты фазового пространства непрерывны, т.е. задаются действительным числом и измеряются шкалами отношений.

Некоторые свойства «обобщенного» фазового пространства, которые отличают его от «классического» фазового пространства, мы в дальнейшем будем использовать при формировании активно-пассивной низкочастотной томографии:

1. Время может быть одной из координат обобщенного фазового пространства.

2. Через одну точку обобщенного фазового пространства может проходить сколько угодно фазовых траекторий.

3. Различные координаты в обобщенном фазовом пространстве могут быть заданы в различных шкалах: номинальной, порядковой, интервальной, шкалой отношений.

Учитывая данные свойства, физический смысл уравнения (8.1) прост. Измеряемая характеристика  $f(r)$  определяется параметром среды  $g(\rho)$  вдоль всего пути распространения зондирующей волны. Информация о геометрии просвечивающего излучения содержится в структуре ядра  $P(\rho, r)$ . В геофизических приложениях  $g(\rho)$  может иметь смысл коэффициента преломления среды –  $f(r)$  временная задержка зондирующего импульса, например, для акустической томографии Манка и Вунша.

В настоящее время томография Манка и Вунша является наиболее теоретически обоснованной и экспериментально востребованной, поэтому на нее обратим наиболее пристальное внимание. На контрасте с ней и построим всю сравнительную характеристику активно-пассивной томографии [230]. В томографии Манка и Вунша измеренным параметром является звуковое поле, полученное на приемниках пространственно развитой антенны. С помощью согласованной фильтрации измерения звукового поля пересчитываются во времена распространения или задержки (в зависимости от того, есть или нет синхронизация излучения и приема). Ядром преобразования является система нелинейных уравнений, связывающих эти времена и поле скорости звука:

$$t_i = \int_{z_i} \frac{ds}{c(x_i(s))},$$

где  $t_i$  – время распространения;  $z_i$  и  $x_i$  – траектория  $i$ -го луча;  $c = c_0 + \delta c$  – поле скорости звука ( $c_0$  – априорно известное распределение скорости звука,  $\delta c$  – возмущение, вызванное: естественными движениями водной среды –  $\delta c_0$ ; движениями подводного объекта –  $\delta c_1$ ).

Обнаруживаемым и реконструированным параметром является  $\delta c_1$ ; он же является изучаемой морской неоднородностью. В данной главе обсуждается активно-пассивная низкочастотная томографическая схема дальнего обнаружения акустически слабозаметных подводных объектов по результатам изменения параметров стратифицированной водной среды и квазидифракционный метод ее реализации, в алгоритме которого:

– измеряемым параметром  $f(r)$  для реконструкции является разность фаз спектральных компонент совокупности низкочастотных просветных сигналов, дискретно измеряемых на горизонтально-разнесенных приемных элементах;

– ядром преобразования алгоритма  $P(\rho, r)$  является система нелинейных уравнений, путем линеаризации которых на основе быстрого преобразования Фурье рассчитываются энергетический и фазовые спектры осредненной совокупности низкочастотных просветных сигналов, принятых на горизонтально-разнесенные приемные элементы;

– представление звукового поля для реконструкции пространственного спектра морских неоднородностей, возникших в результате воздействия морского объекта на водную среду, может быть: модовое – для вертикальной плоскости, лучевое – для горизонтальной плоскости из-за особенностей формирования пространственного спектра возмущений;

– реконструируемым параметром  $g(\rho)$  является результат широкомасштабной фазовой модуляции низкочастотных просветных сигналов возмущенной областью водной среды, созданной подводным объектом;

– обнаруживаемой неоднородностью является возмущенная область среды, созданная движущимся подводным объектом;

– результаты пространственной реконструкции полученных разностей фаз спектральных компонент низкочастотных просветных сигналов представляют собой линейчатые конические поверхности с элементами перевернутого параболического гиперболоида.

Исходя из этого остановимся теперь на некоторых моментах, связанных с классификацией всех существующих томографических задач для того, чтобы определиться с местом, которое займет активно-пассивная низкочастотная томография. Как ясно из описанного принципа томографирования, в любом случае информацию о среде несет распространяющийся в ней просветный сигнал. В том случае, когда среда пассивна, то есть поле излучается внешним по отношению к среде источником, томографическая схема называется трансмиссионной, а в случае, если сам томографируемый объем является излучающим, – эмиссионной.

Эмиссионные схемы наиболее распространены в задачах, связанных с диагностированием плазмы [4,7], и близких к ним по физике формирования излучения астрофизических обратных задачах, хотя и при исследовании океана можно ставить задачу томографирования источников шумовых полей.

Другой классификационный признак томографических схем – различие схем по природе зондирующего излучения:  $\gamma$ -томография, рентгеновская, оптическая, акустическая, а так же ультразвуковая и сейсмическая.

Следующим признаком данных схем может быть физическая природа реконструируемой характеристики (распределение локального коэффициента затухания зондирующего сигнала, интенсивности источников в эмиссионных схемах, поле показателя преломления среды, изменение разности фаз спектральных компонент низкочастотных просветных сигналов).

Тесно связан с типом реконструируемого параметра и тип характеристики зондирующего сигнала, используемый в качестве носителя информации (хотя эта связь и не является однозначной).

В качестве информационной характеристики может выступать амплитуда (интенсивность) волны, частота или фаза квазимонохроматического сигнала, фаза спектральных компонент, время распространения импульсной посылки или более сложные параметры, типа уровня когерентной компоненты. Отметим, что иногда один и тот же параметр неоднородности (возмущений) может проявляться сразу в нескольких характеристиках зондирующего поля, так что выбор типа информационной характеристики будет определяться, прежде всего, удобством экспериментального осуществления соответствующих измерений.

Неоднородности скорости звука в океанском подводном звуковом канале приводят к изменению как фазово-временных, так и амплитудных характеристик распространяющегося звукового поля. В зависимости от конкретной ситуации свои преимущества

в качестве информационной характеристики может иметь использование того или иного из перечисленных параметров.

Одни параметры являются чисто кинематическими характеристиками (типа фазы сигнала), другие определяются динамическими закономерностями (амплитудные характеристики). В соответствии с этим томографические схемы логично также делить на кинематические и динамические (хотя иногда термин «динамическая томография» используют для обозначения схем томографии океана с нестационарными трассами – движущимися источниками или приемниками).

Приведенные выше классификационные признаки томографических схем основывались на физических свойствах сигнала и среды.

Другим направлением, по которому можно проводить классификацию, является принцип описания звукового поля, например приближение, используемое при описании зондирующего поля (хотя адекватность выбранного способа описания природной ситуации определяется из анализа физической стороны вопроса). Схемы, основанные на геометрически лучевом приближении, можно называть лучевыми, а использующие более общее волновое описание – волновыми. В частности, для ситуаций, в которых распространение зондирующего поля носит волноводный характер, волновое поле может описываться на языке нормальных волн, или мод, а соответствующие томографические алгоритмы, использующие модовое представление, могут называться модовыми [7, 227].

Понятие активно-пассивной томографии, как просветной и место ее схемы в ранге классификации можно охарактеризовать следующим образом:

– если среда пассивна относительно объекта (в нее излучается просветный сигнал), то схему можно назвать пассивной;

– если объект активен относительно среды (он изменяет структуру водной среды и фазовую скорость распространения просветного сигнала), то схему можно назвать активной.

Возвращаясь к выражению (8.1), заметим, что ядро интеграла  $P(p,r)$  зависит от неизвестной функции  $g(x,y)$  (например, форма лучевой траектории, информация о которой содержится в структуре ядра). Функция, в свою очередь, зависит от реконструируемого распределения показателя преломления скорости звука среды или фазовой модуляции.

Таким образом, любая задача томографического обращения является нелинейной и некорректной относительно неизвестного распределения возмущения водной среды. Нелинейность определяется невозможностью прямого решения исходного уравнения и требует приближений в своем исполнении. Некорректность определяется несоответствием количества неизвестных и количеством линейных уравнений в системе. Поэтому все томографические задачи (схемы) требуют математической линеаризации, поскольку для линейных задач существуют достаточно универсальные, простые и эффективные алгоритмы их исполнения. Пренебрегать зависимостью  $P(p,r)$  или формой траектории  $L$  в уравнении (8.1) от  $g(x,y)$  можно в случае достаточно малых величин функции  $g(x,y)$ .

Неизвестная функция  $g(x,y)$  во многих случаях может рассматриваться как поправка к некоторому выбранному опорному распределению искомого параметра. Выбирая опорное распределение достаточно близким к ожидаемой структуре неоднородности, удастся линеаризовать проекционный интеграл и пользоваться при обращении существующими универсальными алгоритмами, разработанными для линейных задач. Условия «малости» неизвестной функции зависят от выбранного способа описания зондирующего поля и будут оговариваться при формулировке конкретных алгоритмов акустической томографии океана.

Приближение неизменности формы лучевой траектории (или, в более общем случае, ядра проекционного интеграла) предполагает не только «слабость» неоднородности, но и ее плавность, позволяющую не учитывать перерасеяние на данной неоднородности зондирующего поля. Основанные на таком приближении, называемом обычно адиабатическим, томографические алгоритмы можно называть адиабатическими; схемы, основанные на получении информации о неоднородностях из измерения характеристик дифрагированного поля (из одной моды в другие), естественно определять как дифракционные.

Интересно под «томографическим» углом зрения посмотреть на традиционные методы реконструкции расположения неоднородностей. Время задержки зондирующего импульса можно записать в виде интеграла, подобного в выражении (8.1), но в направлении туда – обратно. Еще более наглядно видно сходство с томографической постановкой, если записать для одной спектральной составляющей импульсного сигнала интегральное выражение для комплексной амплитуды обратно рассеянного поля. Набор комплексных амплитуд обратно рассеянного поля для некоторой полосы частот содержит информацию, позволяющую в результате определенных вычислений локализовать положение рассеивателя с разрешением, определяемым полосой наблюдения.

В гидролокации в результате суперпозиции спектральных компонент зондирующего импульса подобная обработка сигнала происходит аналоговым образом: рассеянные поля в результате надлежащего соотношения фаз гасят друг друга повсюду, кроме ограниченной пространственно-временной области, что и позволяет сразу определять положение рассеивателя. Подобного рода частичная «аналоговая обработка» имеет место и в рассматриваемых ниже томографических алгоритмах, например, использующих лучевое представление поля. Такой же подход будет использоваться и в активно-пассивной томографии, где на разности фаз спектральных компонент и будет построен процесс реконструкции локальных характеристик возмущений водной среды, созданных движущимся подводным объектом. В этом случае физический луч производит «выкалывание» расположенных на его траектории возмущений. Такая локализация связана с суперпозицией большого числа пространственно-распределенных плоских (или квазиплоских) волн (волноводных мод).

Ограничимся на этом проведенным кратким обсуждением особенностей томографических проблем и принципов классификации томографических схем.

Излагаемые ниже методы и используемая терминология еще не являются вполне устоявшимися. Предложенная Манком и Вуншем лучевая схема реконструкции неоднородностей синоптического масштаба к настоящему времени опробована в достаточно полном объеме в натуральных условиях и является наиболее изученной в теоретическом плане.

В настоящее время предложены и другие направления развития акустической томографии океана. Альтернативные варианты могут быть более удобными в ряде случаев с технической точки зрения, а также могут позволить получить дополнительную информацию.

Для решения ряда океанологических и технических проблем необходимо иметь информацию не только о синоптических полях скорости звука и течения, но и о мезоструктурах (мелкомасштабных), морском волнении, пространственном распределении источников шума, возмущений от подводных объектов.

Исследования возмущений водной среды, особенно в мелководных районах и шельфовых зонах, также проводятся давно и достаточно интенсивно. Инструментом при этом служили гидроакустические барьерные линии. Существующий интерес к про-

цессам распространения звука очень низких частот, для которых влияние таких возмущений существенно, а также проблемы поиска акустически слабозаметных подводных объектов потребовали более детального изучения слоистой структуры возмущений водной среды. В связи с этим в последние годы заметно расширились исследования, посвященные разработке и развитию акустических методов определения структуры и характеристик возмущений от подводных объектов в сложной помеховой обстановке закрытых и мелководных морей, а также на подходах к Камчатке. По сравнению с традиционной схемой квазидифракционный метод активно-пассивной томографии исследован в гораздо меньшей степени и в экспериментальном и в теоретическом плане.

В данной главе поставлена цель обосновать принципиальные возможности, которыми обладает активно-пассивная низкочастотная томографическая схема реконструкции возмущений водной среды, квазидифракционный метод и алгоритм, их реализующий, и тем самым стимулировать постановку новых задач и активизацию дальнейших работ в этой области.

### **8.3. Методы акустической томографии**

Многообразие типов изучаемых возмущений морской среды и гидролого-акустических условий распространения звука естественным образом привели к разработке большой группы существенно различающихся между собой методов акустической томографии океана (АТО). При их теоретическом обосновании используются различные физические приближения, что обуславливает и различия в конкретной форме интегрального уравнения (8.1).

В этом подразделе будет дан краткий обзор основных физических приближений для ряда методов, которые, на наш взгляд, можно отнести к томографическим. Конкретный выбор способа решения зависит от ряда факторов, в частности от томографической схемы измерения, объема и вида априорной информации, процесса линеаризации исходных нелинейных уравнений и вида представления конечной информации. Обосновать выбор метода акустической томографии ввиду обилия факторов, играющих в нем значимую роль, можно провести на основе работ по нелинейно акустике [1, 2, 141-146].

Одна из возможных классификаций может быть проведена по типу исследуемого объекта (дно, естественные и искусственные возмущения морской среды, поверхности и источники помех).

Учитывая особенности процесса взаимодействия просветного сигнала с возмущениями морской среды, совокупность методов томографии водной толщи и морской поверхности можно разбить на две группы: методы реконструкции синоптических (гиромасштабных) неоднородностей и методы реконструкции мезонеоднородностей (мелкомасштабных). Принципиальное различие между этими двумя группами состоит в следующем.

Влияние неоднородностей на распространение низкочастотного просветного сигнала определяется не только интенсивностью возмущений (например, величиной вариаций поля скорости звука и поля течений, глубиной фазовой модуляции, величиной возвышений неровной поверхности, разностью фаз спектральных компонент и т.д.), но и характерными пространственными масштабами (или градиентами) возмущения. В зависимости от пространственных масштабов реконструируемых возмущений можно условно выделить методы, которые используют и которые не используют адиабатическое приближение.



Условием применимости адиабатического приближения является неравенство  $l \gg L$  [141–146], где  $l$  – характерный масштаб неоднородности по горизонтали;  $L$  – горизонтальная длина цикла луча (или горизонтальный масштаб интерференции соседних по номеру акустических мод). Неоднородности синоптические и гиромасштабные имеют горизонтальные пространственные размеры порядка или больше 100 км, что практически всегда гарантирует адиабатичность распространения звукового сигнала (отсутствует межмодовая перекачка энергии).

Мезонеоднородности (мелкомасштабные) занимают диапазон пространственных масштабов от единиц метров до десятков километров. В глубоком море, когда  $L = 50 - 70$  км, влияние мезонеоднородностей (мелкомасштабных) приводит к существенной трансформации энергетического спектра мод и значительному возмущению лучевых траекторий в вертикальной плоскости.

Методы томографии неоднородностей, для которых эффекты дифракции или рассеяния существенны, в дальнейшем будут называться дифракционными. По принципу формирования вторичного поля они наиболее близки к задаче реконструкции возмущений морской среды (созданы движущимся подводным объектом) и названы квазидифракционным методом.

В мелком море (когда  $L < 10$  км) условие применимости адиабатического приближения может иногда выполняться и для мезомасштабных неоднородностей. В этом случае для их диагностики могут быть использованы адиабатические методы, развитые для крупномасштабных неоднородностей.

Удобно выделить три основные группы методов акустической томографии океана [7, 218, 227]: методы томографии гиромасштабных и синоптических неоднородностей (используется адиабатическое приближение), методы томографии мезонеоднородностей (мелкомасштабных) (когда адиабатическое приближение неприменимо), а также методы томографии источников помех (морского шума) и сейсмоакустической томографии дна.

К первой группе адиабатических методов относим: лучевой, модовый и интерференционный. Во вторую группу неадиабатических (дифракционных) методов включаем: дифференциальный, локационный, лучевой доплеровский, фазовый, «двухмасштабный», «квазидифракционный», а также специальные методы зондирования локализованных в пространстве неоднородностей океана. Третью группу образуют методы эмиссионной томографии, а четвертую – сейсмотомография и томографии случайных нерегулярностей дна. Другой возможный признак классификации методов акустической томографии океана – способ описания неоднородностей: статистический или детерминированный [6, 7, 229–231].

Выбор способа описания зависит от соотношения пространственно-временных масштабов неоднородностей и характерных интервалов пространственно-временного анализа. Для методов, которые диагностируют неоднородности, достаточно медленно меняющиеся во времени, используется детерминированный подход. При этом быстро меняющиеся во времени нерегулярности играют роль мультипликативной помехи, вносящей в реконструкцию случайную погрешность.

Для диагностики неоднородностей, у которых масштабы временных флуктуаций малы по сравнению с необходимым для реконструкции временным интервалом накопления информации, характерно статистическое описание. Обычно в этих методах определяются пространственно-временные распределения статистических (часто средних по относительно небольшому интервалу времени и пространства) характеристик неоднородностей. При этом более медленные неоднородности играют роль опорного фона,

информация о котором априорно закладывается в метод реконструкции. Существенные различия во временной изменчивости неоднородностей позволяют путем выбора оптимального временного окна анализа разделить эффекты воздействия неоднородностей различных типов.

Далее будут рассмотрены томографические методы, которые дают возможность объяснить принципы формирования активно-пассивной томографии океанской среды.

### **8.3.1. Обобщенные характеристики методов реконструкции пространственных образов мелкомасштабных неоднородностей морской среды**

В соответствии с приведенной выше классификацией типов океанских неоднородностей в группе методов, учитывающих эффекты дифракции или рассеяния звука, можно выделить алгоритмы реконструкции распределенных в пространстве нерегулярностей поля скорости звука и волнения (как правило, используется статистическое описание) и алгоритмы реконструкции локализованных в пространстве неоднородностей (используется детерминированное описание) [227, 230].

Прямые задачи рассеяния волн в случайных средах обычно решаются приближенными методами, область применимости которых определяется интенсивностью флуктуации волнового поля. Часто выделяют два случая: слабые флуктуаций волнового поля и сильные флуктуации волнового поля.

Случай слабых флуктуаций волнового поля, когда степень когерентности распространяющегося в океане сигнала близка к единице, реализуется для достаточно слабых неоднородностей и относительно небольших акустических трасс. Теоретической основой анализа слабых флуктуаций звукового поля чаще всего служит первое приближение метода малых возмущений (приближение Борна), а для плавных крупномасштабных неоднородностей – метод плавных возмущений (приближение Рытова) [229–231]. В рамках первого приближения метода малых возмущений, реконструкция в дифракционных методах томографии осуществляется по измеренным характеристикам пространственно-временной (или частотно-угловой) функции когерентности (в частном случае – интенсивности) рассеянной компоненты звукового поля.

При этом восстанавливаемой характеристикой служит пространственно-временное распределение локального частотно-углового спектра неоднородностей поля скорости звука или волнения (часто называемого функцией Винера). Существенное различие в горизонтальных масштабах диагностируемых мезо- и мелкомасштабных неоднородностей обуславливает и существенное различие в конкретной форме уравнения (8.1). Мезомасштабные неоднородности поля скорости звука крупномасштабны в том смысле, что часть акватории, формирующей рассеянное поле на приемнике, концентрируется вблизи отрезка прямой, соединяющей источник и приемник (для определенности считаем опорный волновод однородным по горизонтали). В качестве грубого условия, при выполнении которого можно пренебречь отклонением траектории лучей в горизонтальной плоскости от прямой, служит неравенство  $\theta_s < \theta_p$ , где  $\theta_s$  – характерная ширина индикатрисы рассеяния звука в горизонтальной плоскости,  $\theta_p$  – характерная величина углового разрешения приемной системы.

При выполнении соотношения  $\theta_s < \theta_p$  рассеянный сигнал маскируется более мощным сигналом подсветки (недифрагированная или нерассеянная компонента звукового

поля). Чтобы «отстроиться» от этого сигнала (выделить слабый рассеянный сигнал), необходимо осуществить его подавление. В дифференциальной схеме томографии эта задача решается за счет возбуждения и приема групп мод, разнесенных по модовому спектру (формирование «модовой тени»), или за счет формирования различно ориентированных в вертикальной плоскости диаграмм направленности источника и приемника, или благодаря использованию существующих в океане естественных зон «модовой тени».

Дифференциальный метод является переходным от методов, основанных на адиабатическом приближении, к обычным дифракционным методам. В нем эффекты дифракции (рассеяния) в горизонтальной плоскости еще не существенны, а в вертикальной плоскости уже существенны и несут полезную информацию о параметрах неоднородностей.

Траектория акустического сигнала, рассеянного мелкомасштабной неоднородностью, значительно отклоняется в горизонтальной плоскости от траектории сигнала подсветки. В этом случае рассеянный сигнал можно выделить или за счет соответствующей ориентации диаграммы направленности в горизонтальной плоскости, или за счет импульсного стробирования (локационный метод), поскольку время распространения рассеянного сигнала оказывается существенно больше времени распространения сигнала подсветки. При этом многомодовый (или многолучевой) характер звукового поля не играет существенной роли. Локационный метод дает возможность определять характеристики как мелкомасштабных неоднородностей поля скорости звука, так и морского волнения.

Для диагностики взволнованной поверхности океана предложен фазовый алгоритм, теоретическим основанием для которого служит приближение, аналогичное приближению Рытова: фазу или время задержки моды (или луча) представляют в виде разложения в ряд по степеням высот морских волн и ограничивают только слагаемыми до первого порядка включительно. В результате получается интегральное соотношение (8.1), связывающее функции когерентности флуктуации фазы или времени задержки с энергетическим спектром волнения.

Численные эксперименты [3, 4, 218, 230], проведенные для условий мелкого моря и акватории размером в несколько десятков километров, показали, что по измерениям функции временной корреляции или частотного спектра фазы (времени задержки) моды (луча) можно осуществить достаточно точную реконструкцию пространственного распределения частотно-углового спектра возвышений морских волн.

В случае сильных флуктуаций акустического поля, когда степень когерентности сигнала мала по сравнению с единицей, при анализе применяются различные приближенные подходы: приближение параболического уравнения и Марковского процесса, приближение Кирхгофа и ряд других. Даже после этого прямая задача остается более сложной, чем для случая слабых флуктуаций. Соответственно и решение обратной задачи оказывается сложной проблемой. Связано это с тем, что вклад компонент второй и большей кратности рассеяния в результирующее поле приводит к запутыванию информации о неоднородности и появлению неоднозначности в решении обратной задачи, для компенсации которой приходится привлекать дополнительную априорную информацию.

В простейшем случае учета только первого приближения теории многократного рассеяния (модифицированное борновское приближение) требуется дополнительно привлекать информацию о границах области изменчивости параметров неоднородностей.

В случае рассеяния звука на взволнованной поверхности океана ситуация оказывается более благоприятной. За счет особенностей рассеяния звука на морском волнении удается реализовать схему доплеровской томографии, которая с математической точки

зрения идентична классической схеме томографии на основе преобразования Радона. Измеряемым параметром в доплеровской томографии взволнованной поверхности является коэффициент затухания когерентной компоненты акустического поля.

Инверсия двумерного преобразования Радона позволяет по набору интегральных по трассе значений коэффициента определять локальные значения, по которым восстанавливаются локальные характеристики волнения. Методика измерения коэффициента затухания предусматривает выделение когерентной компоненты поля путем частотной «отстройки» (фильтрации) от стохастической составляющей, линия которой смещена по частоте из-за эффекта Доплера. Аналогично коэффициенту затухания когерентной компоненты в качестве измеряемого параметра также может быть использовано и доплеровское уширение частотного спектра акустического сигнала.

Возможность решения обратной задачи в области сильных флуктуаций поля для случая мезомасштабных возмущений скорости звука рассматривалась в работах [218, 229, 230]. Теоретической основой здесь является «двухмасштабное» решение уравнения для функции когерентности (в общем случае двухчастотной и двухточечной) звукового поля. Суть метода состоит в следующем [4, 7]. Искомое решение уравнения для функции когерентности, полученного в приближении параболического уравнения и Марковского процесса, представляется в виде разложения по малому параметру:

$$\varepsilon = \left[ l_{\text{Э}} \lambda / l^2 \right]^{1/2},$$

где  $l_{\text{Э}}$  – длина экстинкции;  $l$  – радиус корреляции неоднородностей.

Слагаемое наиболее низкого порядка по  $\varepsilon$  – удовлетворяет дифференциальному уравнению первого порядка в частных производных, решение которого находится методом характеристик.

«Двухмасштабное» решение дает представление о функции пространственной и частотной когерентности акустического поля в виде двойного преобразования Фурье по частотной и пространственной переменной от величины  $g = \exp[Q]$ , где  $Q$  – фазовый параметр, который интегральным соотношением типа (8.1) связан со структурной функцией флуктуации скорости звука. Последовательное обращение интегральных преобразований позволяет по функции когерентности звука восстановить структурную функцию неоднородностей. Существенная особенность этого метода заключается в том, что метод требует измерения как пространственной, так и частотной корреляции акустического поля.

Для реконструкции мезомасштабных неоднородностей поля скорости звука и течений, создаваемых внутренними волнами, применялся и лучевой алгоритм. Измеряемыми параметрами служили статистические характеристики высокочастотных вариаций (высокочастотных по сравнению с вариациями, вызываемыми синоптическими неоднородностями) временной задержки вдоль луча. Восстанавливаемыми параметрами среды являлись усредненные по трассе: глубинное распределение энергии внутренних волн и величина горизонтальной компоненты скорости течения. Объектом исследования дифракционных методов акустической томографии океана является также и класс локализованных возмущений, включающий в себя как океанические образования типа акустических линз, не имеющих относительно резких границ, так и тела с резкими границами. В первом случае задача реконструкции заключается в определении поля скорости звука внутри возмущения, во втором – в определении характеристической функции (характере-

ристическая функция равна 0 вне области пространства, занятой телом, и равна 1 внутри нее). Измеряемым параметром в обоих случаях служит комплексная амплитуда или полного звукового поля, или только дифрагированной компоненты, которые измеряются, как правило, на удаленной поверхности, охватывающей исследуемый объект.

Рассеяние звукового поля на локализованном возмущении приводит к эффектам интерференции дифрагированного и недифрагированного полей. С учетом особенностей океанского волновода этот эффект рассмотрен в работах [218, 227–231]. Метод реконструкции, основанный на анализе дифракционной картины на поперечной к направлению распространения акустического сигнала плоскости, рассмотрен ниже. В этом методе из решения интегрального уравнения (8.1) определяются коэффициенты матрицы межмодового рассеяния. На основе физического приближения связи функции  $g(x)$  с неоднородностью восстанавливаются вариации скорости звука или определяется характеристическая функция. Итоговая сводка дифракционных методов представлена в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Метод	Тип данных	Объект исследования	Реконструируемый параметр
Дифференциальный	Интенсивность + задержка моды	мезомасштабные неоднородности	Локальный спектр неоднородности
Локационный	Интенсивность + задержка	мелкомасштабные неоднородности	
2-масштабный	Функция когерентности поля	мезомасштабные неоднородности скорости звука	Структурная функция вариаций скорости звука
Лучевой	Задержка луча	Внутренние волны	Пространственно-усредненные характеристики скорости звука и течения
Фазовый	Задержка или фаза моды (луча)	Волнение	Локальный спектр
Доплеровский	Затухание или уширение частотного спектра	Волнение	Высота волн или скорость приводного ветра
Дифракционный, локализованных неоднородностей	Комплексная амплитуда полного поля	Локализованные неоднородности водной толщи	Скорость звука
			Характеристическая функция области, занятой неоднородностью

Рассмотренные выше методы томографии основаны на измерении либо вариаций времени задержки импульсов, отвечающих модам или лучам, либо вариаций фаз отдельных мод. Для реализации таких схем необходима высокая точность определения времени распространения (или фазы) сигнала, что требует, в свою очередь, высокой точности определения расстояния между источником и приемником. Это предъявляет достаточно жесткие требования к параметрам технических средств и условиям проведения экспериментов. Кроме того, использование фаз может оказаться затруднительным по ряду других причин. Так, неоднозначность определения фазы (определить ее можно только с точностью до компоненты  $2\pi$ ) делает невозможной реализацию метода в случае возмущений фазы, превышающих  $2\pi$ .

Это не абстрактная трудность: при прохождении низкочастотного просветного сигнала через синоптические вихри отклонения фаз мод могут достигать десятков и сотен циклов. Значительные возмущения фазы могут возникнуть также под воздействием мезонеоднородностей (мелкомасштабных), которые при реконструкции синоптических неоднородностей выступают как помеха.

Например, из-за влияния внутренних волн флуктуации фаз акустических мод достигают  $2\pi$  уже на дистанциях порядка 100 км. Ввиду специфики решения задачи реконструкции возмущений морской среды, созданных движущимся подводным объектом, отдельно рассмотрим дифракционные методы акустической томографии океанской среды [4, 7, 227].

### **8.3.2. Дифракционные методы акустической томографии**

Рассмотренные методы акустической томографии, основанные на использовании дифракционных явлений, характеризуются неадиабатическим распространением звука в океане с мезо- и мелкомасштабными неоднородностями. Адиабатическое описание, т.е. пренебрежение межмодовой или межлучевой трансформацией энергии, допустимо при малости длины цикла луча по сравнению с горизонтальными масштабами неоднородностей. Для мезонеоднородностей (мелкомасштабных), которыми являются и результаты гидродинамического воздействия движущихся объектов на водную среду, это условие, особенно для глубокого моря, как правило, нарушается [4, 7 227].

В ряде существующих дифракционных методов эффекты межмодового или межлучевого рассеяния энергии принципиально необходимы для работоспособности томографической схемы, в других же они играют роль усложняющего фактора.

Не претендуя на исчерпывающее изложение всего многообразия возможных дифракционных методов акустической томографии океана, остановимся на некоторых из них, которые достаточно полно представляют основные физические принципы дифракционной томографии и перспективы формирования квазидифракционного метода активно-пассивной томографии океанской среды.

Вначале рассмотрим дифракционные методы томографии, в которых используется борновское приближение применительно к однородной безграничной среде, затем рассмотрим более детально конкретные алгоритмы реконструкции распределенных случайных неоднородностей океана, основанные на томографическом методе, использующем импульсное стробирование (т.е. выделение заданных временных интервалов). В заключение рассмотрим доплеровский метод томографии взволнованной поверхности, область применимости которого, в отличие от других дифракционных методов, включает в себя и случай сильных флуктуаций акустического поля (область, где существенны эффекты многократного рассеяния звука).

Дифракционные методы томографии известны давно [3, 4, 6, 227]. Они широко применяются в различных областях науки и техники: ультразвуковой диагностике сред, медицинской интроскопии, неразрушающем контроле. Носителями информации при этом являются акустические и электромагнитные поля. Объектом исследования могут быть как детерминированные, так и случайные неоднородности среды. Реконструируемыми параметрами часто являются возмущения поля скорости звука и плотности, характеристическая функция области, занятой неоднородностью, функции корреляций (или спектр) показателя преломления среды и возвышений поверхности.

Каждый из конкретных способов реализации дифракционной томографии обладает своими специфическими особенностями, обусловленными свойствами исследуемой среды. В этом плане не является исключением и дифракционная акустическая томография океана. В данном разделе постараемся дать некоторое общее представление об основных свойствах методов дифракционной томографии океана, непосредственно связанных как с волноводным характером распространения звука в океане, так и с особенностями строения океанических неоднородностей; также обсудим возможные схемы измерения (варианты перебора проекций), которые могут использоваться в практике.

#### **8.4. Дифракционные методы томографии в однородной безграничной морской среде**

Дифракционная томография охватывает широкий диапазон алгоритмов, использующих различные физические приближения (Борна, Рытова, Кирхгофа). Для того чтобы пояснить некоторые общие проблемы реконструкции неоднородностей и дифракционной томографии, остановимся подробнее на методе, основанном на приближении Борна.

Одно из наиболее широко используемых приближений – борновское (приближение однократного рассеяния), условием применимости которого служит требование малости энергии рассеянного поля  $p(R_s)$  по сравнению с полем подсветки  $p_0(R)$ . В борновском приближении полное поле  $p(R)$  под интегралом приближенно заменяется на недифрагированное поле  $p_0(R)$ . Под данное требование подходит процесс взаимодействия возмущений водной среды, созданных движущимся подводным объектом, с просветным сигналом, где были отмечены слабые проявления дифракционных эффектов.

Рассмотрим связь неоднородностей поля скорости звука с характеристиками измеряемого давления звукового поля  $p(R_s)$ . Если источник звука монохроматический, комплексная амплитуда звукового давления  $p(R) \exp[i\omega t]$  удовлетворяет уравнению

$$\Delta p + \frac{\omega^2}{c^2(R)} p \cong 2 \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\delta c}{c} p, \quad (8.2)$$

где  $\overline{\delta c}$  – малые возмущения скорости звука ( $|\delta c| \ll c$ ), подлежащие определению.

Отсюда, используя формулу Грина, получим

$$p_s(\mathbf{R}) = p(\mathbf{R}) - p_0(\mathbf{R}) \approx \int_{-\infty}^{+\infty} d^3\mathbf{R}' G_0(\mathbf{R}, \mathbf{R}') K_0^2 g(\mathbf{R}') p(\mathbf{R}'), \quad (8.3)$$

где  $p_0(\mathbf{R})$  – звуковое поле подсветки в отсутствие неоднородности  $\bar{\delta c} \equiv 0$ ;  $p_s(\mathbf{R})$  – рассеянное или дифрагированное поле;  $G_0(\mathbf{R}, \mathbf{R}')$  – функция Грина невозмущенной среды;  $K_0^2 = \omega^2 / c^2(\mathbf{R})$ ,  $g(\mathbf{R}) = 2\delta c / c$  – функция, описывающая неоднородность.

Интегральное соотношение (8.3) показывает, что задача томографической реконструкции неоднородности  $g(\mathbf{R})$  по измеряемым данным  $p_s(\mathbf{R})$  сводится к решению интегрального уравнения (8.3) с ядром  $W'(\mathbf{R}, \mathbf{R}') = G_0(\mathbf{R}, \mathbf{R}') K_0^2(\mathbf{R}') p(\mathbf{R}')$ . Поле  $p(\mathbf{R})$  и, следовательно, ядро  $W'(\mathbf{R}, \mathbf{R}')$  зависят не только от положения источников и приемников, но и от условий распространения звука, описываемых функцией  $g(\mathbf{R})$ . Поэтому в общем случае дифракционная томографическая задача является нелинейной. Точного решения уравнения (8.3) в большинстве случаев получить не удастся. Однако во многих конкретных задачах можно с приемлемой для практических целей точностью найти приближенное решение. В результате точное интегральное соотношение (8.3) можно свести к приближенному интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода с ядром

$$W'(\mathbf{R}, \mathbf{R}') = G_0(\mathbf{R}, \mathbf{R}') \times \times K_0^2(\mathbf{R}') p_0(\mathbf{R}'): \\ p_s(\mathbf{R}) = \int_{-\infty}^{+\infty} d^3\mathbf{R}' W_0^i(\mathbf{R}, \mathbf{R}') g(\mathbf{R}'). \quad (8.4)$$

Таким образом, в приближении однократного рассеяния интегральное уравнение дифракционной томографии допускает линеаризацию.

В общем случае решение уравнения (8.4) также сопряжено с определенными трудностями. Однако в ряде частных случаев алгоритм восстановления  $g(\mathbf{R})$  упрощается. Продемонстрируем это обстоятельство на примере плоской зондирующей волны  $p_0(\mathbf{R}') \exp[iK_i R']$  в предположении, что опорная невозмущенная среда однородна ( $c(\mathbf{R}) = \text{const}$ ) и безгранична. Тогда уравнение (8.4) с учетом представления функции Грина однородного безграничного пространства примет следующий вид:

$$p_s(\mathbf{R}) = \int_{V_g} \frac{\exp[iK_0 |\mathbf{R} - \mathbf{R}'| + iK_i R']}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}'|},$$

где  $V_g$  – область, занятая неоднородностью.

Если измерения  $p_s(\mathbf{R})$  осуществляются в дальней по отношению к неоднородностям зоне ( $|\mathbf{R}'| \ll R$ ), то

$$|\mathbf{R} - \mathbf{R}'| \approx R - \frac{R}{R} R' + \frac{1}{2R} \left[ (R')^2 - \left\langle \frac{R R'}{R} \right\rangle^2 \right] + \dots \quad (8.5)$$



При подстановке выражения (8.5) в показатель экспоненты функции Грина учтем только первые два члена разложения (зона дифракции Фраунгофера) –  $K_0 |R'|^2 \ll |R|$ , а в знаменателе подынтегрального выражения (8.4) пренебрежем слабой зависимостью от  $R'$ . Тогда получим

$$p_s(R) = A_0 \int_{V_g} g(R') \exp[-iq(R)R'] d^3R' = A_0 \hat{g}(q(R)), \quad (8.6)$$

$$q(R) = ks - Ki, \quad A_0 = \frac{K_0^2}{R} e^{iK_0 R},$$

где  $\hat{g}(q(R))$  – пространственный спектр  $g(R)$ ;  $ks = K_0 R/R$  – волновой вектор дифрагированного волнения.

Полученное уравнение, связывающее измеряемое поле  $pS(R)$  с реконструируемой функцией  $g(R')$ , лежит в основе дифракционной томографии, получившей развитие в ультразвуковой технике, в частности применительно к медицине.

Как следует из выражения (8.6), измеряемая и восстанавливаемая функции связаны, в рамках принятых допущений, простым интегральным соотношением, а именно преобразованием Фурье.

С точки зрения томографической реконструкции каждая из измеряемых величин является интегральной проекцией (связанной с пространственной частотой) наблюдаемой неоднородности.

Для восстановления неоднородности, как и в случае традиционной томографии, в которой измеряются интегральные проекции вдоль некоторых траекторий, необходимо осуществить обратное интегральное преобразование для совокупности всех измеренных проекций. Другими словами, следует решить интегральное уравнение (8.6).

Если в традиционной томографической схеме обращение интегрального уравнения осуществлялось путем решения эквивалентной системы алгебраических уравнений, то в случае дифракционной томографии интегральное уравнение удастся упростить путем сведения его к интегралу Фурье. Поскольку преобразование Фурье основано на использовании полного ортонормированного базиса собственных функций, интегральное уравнение может быть решено с помощью обратного преобразования Фурье, которое на практике сводится к использованию дискретного аналога обратного преобразования Фурье и реализуется с помощью ЭВМ.

Как и все томографические методы, дифракционная томография является некорректной задачей, поскольку высокочастотные компоненты не могут быть удовлетворительно реконструированы из-за влияния шумов.

Кроме этого существуют проблемы, связанные со спецификой именно дифракционной томографической схемы. К таким проблемам относится проблема аппроксимации результатов измерений в узлы эквидистантной прямоугольной решетки, что необходимо для осуществления обратного преобразования Фурье.

Таким образом, алгоритм дифракционной томографии состоит из трех операций: во-первых, измеряется необходимое количество комплексных значений рассеянных полей

(стадия перебора проекций); во-вторых, осуществляется аппроксимация измеренных данных в узлы эквидистантной прямоугольной решетки и, наконец, осуществляется обратное преобразование Фурье. Подобного рода алгоритм легко реализуется, если среда однородна и безгранична, однако океанскую среду следует считать неоднородной, поскольку на больших расстояниях проявляются волноводные свойства океана. Дальнейшей задачей будет анализ возможностей использования метода дифракционной томографии в волноводах.

В ряде работ [3, 4, 6, 7,] под термином «дифракционная томография» подразумевают только методы реконструкции на основе обращения результатов измерения пространственных неоднородностей гидрофизических полей с использованием преобразования Фурье. Этот термин в более широком смысле относят к тем томографическим методам, в которых дифракция (рассеяние) зондирующей волны на неоднородности играет заметную роль.

В связи с этим остановимся еще на одном важном примере – реконструкции неоднородностей по измерениям, осуществленным с помощью антенны, размеры которой сравнимы или больше расстояния до неоднородностей, так что неоднородности для антенны находятся в области Френеля. В этом случае приемная система позволяет измерить не только наклон волнового фронта рассеянных волн, как это имеет место в случае дифракции Фраунгофера, но также и кривизну их фронта. Это дает возможность сфокусировать антенну на заранее выбранную область пространства.

Метод построения подобного рода изображений известен в оптике и радиофизике в связи с фокусировкой поля антенн. Применительно к акустике он также рассматривался в работе [227]. Формальный переход к дифракции Френеля состоит в учете третьего (квадратичного по  $R'$ ) члена разложения (8.5). В результате реконструкция неоднородностей будет заключаться в переборе параметров фокусировки или точек пространства, на которые фокусируется приемная система, с последующим интегральным преобразованием измеренных данных.

## **8.5. Особенности дифракционных методов акустической томографии неоднородностей поля скорости звука в океанском волноводе**

Обсуждая в предыдущем подразделе физические основы дифракционных методов томографии, предполагалось, что среда однородна и безгранична. Для океана это предположение несправедливо – существенны влияние границ (поверхность и дно океана) и эффекты рефракции звука в вертикальной плоскости. Остановимся на особенностях дифракционной томографии океана, связанных с волноводным характером распространения звука. В качестве неоднородностей рассмотрим малые возмущения поля скорости звука, считая выполненными условия применимости уравнения (8.3).

Определим связь измеряемого поля  $p_s(R)$  с функцией  $g(R')$ , описывающей неоднородности. При этом будем использовать модовое описание звукового поля. Пусть первичное поле  $p_0$  задается точечным источником с индексом  $i$ , помещенным в точке  $R_i = (r_i, z_i) = (x_i, y_i, z_i)$ . Полагая область  $Vg$ , занятую неоднородностями, ограниченной и расположенной достаточно далеко от источника и приемника, подставим модовое представление для функций Грина  $G_0(R, R')$  и  $p_0(R') = G(R', R)$  в волновой зоне  $(|R - R'|, |R' - R_i| \gg \lambda)$  в формулу (8.3). Тогда вместо интегрального уравнения (8.3) получим

$$p_s(\mathbf{R}, \mathbf{R}') = \sum_{n,m}^N A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i) \varphi_m(\mathbf{z}, \mathbf{r}) \varphi_n(\mathbf{z}_i, \mathbf{r}_i); \quad (8.7)$$

$$A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i) = \int_{V_g} d^3 \mathbf{R}' T_{nm}(\mathbf{R}') L_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}') g(\mathbf{r}', \mathbf{z}'); \quad (8.8)$$

$$T_{nm}(\mathbf{R}') = K_0^2(\mathbf{R}') \varphi_n(\mathbf{z}', \mathbf{r}') \varphi_m(\mathbf{z}', \mathbf{r}');$$

$$L_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}') = [h_n h_m | \mathbf{r} - \mathbf{r}' | | \mathbf{r}' - \mathbf{r}_i | ]^{1/2} \times \\ \times \exp[-ih_m | \mathbf{r} - \mathbf{r}' | - ih_n | \mathbf{r}' - \mathbf{r}_i | - i \frac{\pi}{2}].$$

Как следует из формулы (8.7), комплексная амплитуда рассеянного поля  $p_s(\mathbf{R}, \mathbf{R}')$  полностью характеризуется матрицей  $\|A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)\|$ , элементы которой определяются ориентацией акустической трассы (парой источник – приемник  $(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)$  и номерами мод: возбуждаемой источником моды (n) и принятой, т. е. рассеянной неоднородностью моды (m)). Следовательно, в трехмерном океане при учете только N захваченных волноводом мод максимальное число томографических проекций равно  $MN^2$ , где M – число акустических трасс.

Таким образом, процедура томографического восстановления неоднородности  $g(\mathbf{R})$  в океанском волноводе состоит из определения (измерения) матрицы  $A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)$  и последующего решения интегрального уравнения (8.8). В силу ортогональности собственных функций волновода  $\varphi_n(\mathbf{z}, \mathbf{r})$  и их нормировки  $\int \varphi_n^2(\mathbf{z}, \mathbf{r}) dz = 1$  из уравнения (8.7) легко определяются элементы матрицы  $\|A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)\|$ :

$$\|A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)\| = \int \int_{V_g} dz dz_i p_s(\mathbf{R}, \mathbf{R}') \varphi_m(\mathbf{z}) \varphi_n(\mathbf{z}). \quad (8.9)$$

Уравнение (8.7) каких-либо принципиальных ограничений на возможность определения  $\|A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)\|$  и, следовательно,  $g(\mathbf{R})$  не накладывает. Несколько неприятная ситуация имеет место при решении интегрального уравнения (8.8). Поясним суть дела на примере плоскостойкого волновода, когда  $K_0^2(\mathbf{R}') = K_0^2(\mathbf{z}')$  и  $T_{nm}(\mathbf{R}') = T_{nm}(\mathbf{z}')$ . В этом случае ядро интегрального преобразования (8.8) факторизуется по горизонтальным (ядро  $L_{nm}$ ) и вертикальным (ядро  $T_{nm}$ ) координатам, а уравнение (8.8) принимает вид

$$\|A_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)\| = \int \int_{V_g} d^2 \mathbf{r}' L_{nm}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}') g_{nm}(\mathbf{r}'), \\ g_{nm}(\mathbf{r}') = \int_{V_g} dz' T_{nm}(\mathbf{z}') g(\mathbf{r}', \mathbf{z}'). \quad (8.10)$$

Реконструкция горизонтальной структуры на основе уравнения (8.9) при фиксированных индексах  $n$  и  $m$  во многом тождественна рассмотренному выше случаю однородного безграничного пространства (8.2) с единственным отличием в размерности (2 вместо 3). Например, считая выполненными условия дифракции Фраунгофера ( $|r'| \ll |r|$ ,  $K_0 |r'|^2 \ll |r|$ ), получим соотношение, аналогичное выражению (8.6):

$$A_{nm}(r, r_i) = a_{nm} \hat{g}(q_{nm}), \quad (8.11)$$

$$q_{nm} = -h_m r / r - h_n r_i / r_i,$$

$$a_{nm} \approx [h_n h_m r r_i]^{1/2} \exp[-ih_m r - ih_n r_i + i\frac{\pi}{2}],$$

где  $\hat{g}_{nm}$  – пространственный спектр  $\hat{g}_{nm}(r')$ .

То есть алгоритм томографической реконструкции горизонтальной структуры также заключается в обратном преобразовании Фурье от  $A_{nm}(r, r_i)$ , но уже для каждой из пар мод.

В отличие от случая безграничной среды в соотношении (8.11) имеем дело с падающей на неоднородность модой с номером  $n$  и дифрагированной модой с номером  $m$ . В качестве волновых чисел выступают горизонтальные проекции волновых чисел для рассматриваемых мод, а реконструкция осуществляется относительно разностной компоненты горизонтальных волновых чисел  $q_{nm}$ .

Особенностью реконструкции на основе дифракционного томографического алгоритма (8.11) является зависимость результатов реконструкции падающей и рассеянной мод. Изменение индексов  $n$  и  $m$  в определенной степени изменяет результаты, поскольку меняется пространственная область по глубине, в которой осуществляется взаимодействие мод  $n$  и  $m$ .

При фиксированных номерах мод  $n$  и  $m$  реконструкция осуществляется относительно горизонтального распределения неоднородностей при усреднении в определенном интервале глубин. Конфигурация интервала, в частности его толщина и средняя глубина, определяется структурой волновода. Например, для мелководного района областью возможного взаимодействия мод (имеется в виду пространственная область, где обе моды достаточно велики по амплитуде) является практически вся толщина волновода. Для билинейного приповерхностного волновода такой областью может быть лишь некоторый интервал глубин вблизи оси волновода.

Для вертикального распределения неоднородности можно реконструировать только некоторую «интегральную» информацию об определенной вертикально ориентированной пространственной частоте  $|kn \pm km|$  на всей акустической трассе между источником и приемником. Возможность реконструкции неоднородностей в вертикальной плоскости на основе интегрального уравнения (8.10) зависит от матрицы  $T_{nm}(z')$ , которая определяется только свойствами опорного волновода. Неполнота системы из  $N^2$  функций  $T_{nm}(z)$  принципиально требует при решении уравнения (8.10) привлечения априорной информации (данная проблема аналогична той, что обсуждалась ранее для модового и интерференционного методов).

Покажем это, предположив, что волновод образован границами – поверхностью и дном, при  $K_0^2(z') = \text{const}$ . Тогда собственные функции волновода  $\varphi_n(z)$  представляются в виде суммы двух бриллюэновских волн  $\exp[\pm ik_n z]$ , где  $k_n = (K_0^2 - h_n^2)^{1/2}$ . Подставляя разложения  $\varphi_n(z)$  и  $\varphi_m(z)$  по осциллирующим функциям в формулу (8.10), получим

$$g_{nm}(r') \approx \sum_{\pm} \hat{g}(r'; \pm k_n; \pm k_m), \quad (8.12)$$

где  $\hat{g}(r, k)$  – пространственный спектр по координате  $z$ .

Суммирование в формуле (8.12) проводится по всем комбинациям знаков «+» и «-».

Отсюда видно, что матрица  $g_{nm}$  определяется компонентами типа  $\hat{g}(k_n - k_m)$  и  $\hat{g}(k_n + k_m)$ ; поскольку  $g(z)$  вещественно, то  $\hat{g}(-k) = \hat{g}(+k)$ . Информация о других спектральных компонентах в однократно рассеянном поле не содержится, кроме того, величина  $g_{nm}$  пропорциональна сумме спектральных компонент  $\hat{g}(k_n - k_m)$  и  $\hat{g}(k_n + k_m)$ . В общем случае из уравнений (8.12) и (8.10) нельзя определить вертикальный спектр неоднородности. Говорить о реконструкции распределения неоднородностей по глубине можно лишь в случае, когда в волноводе возбуждается большое количество мод, так что предполагаемый пространственный спектр распределения неоднородностей по глубине с достаточной точностью будет аппроксимирован всевозможными значениями компонент  $|k_n \pm k_m|$ . В этом случае необходимо осуществить модовую селекцию [227].

Подводя итоги анализа особенностей дифракционной томографии океана, можно сформулировать последовательность операций при реконструкции: во-первых, осуществляется селекция падающих и принимаемых мод (этот этап присущ только томографии волноводных систем); во-вторых, производится перебор проекций для реконструкции по глубине за счет перебора индексов мод, а для реконструкции распределения в горизонтальной плоскости – перебор всех возможных углов подсветки и всех углов рассеяния; в-третьих, аппроксимируются измеренные значения в узлы прямоугольной сетки; в-четвертых, осуществляется обращение измеренных данных на основе использования преобразования Фурье.

Особенностью представленной схемы дифракционной томографии является наличие нескольких ветвей обработки данных, определяющих реконструкцию по вертикали и по горизонтали. Появление дополнительного этапа обработки, связанного с перебором индексов мод, обусловлено спецификой распространения акустических полей в океанских слоистых волноводах, в которых хорошо распространяется на большие расстояния лишь ограниченное число волноводных мод. Следует заметить, что, если не осуществлять селекцию мод, результирующее реконструированное изображение будет искажено эффектами, связанными с интерференцией волноводных мод. Ниже проанализируем степень влияния подобного рода искажений. Рассматривая мезовозмущения (мелкомасштабные) поля скорости звука, которые, как правило, носят случайный характер, очень часто целесообразно для их описания применять статистический подход.

Естественно, что восстанавливаемыми параметрами при этом будут пространственные распределения статистических характеристик неоднородностей. Предположим, что поле неоднородностей является гауссовым, имеет нулевое среднее ( $\langle g \rangle = 0$ ) и квазиоднородно по горизонтальным переменным. Тогда все статистические характеристики возмущений поля скорости звука, к реконструкции которых и сводится задача томографии, определяются функцией корреляции или ее локальным спектром  $W$  по горизонтальным переменным [ 6, 7, 225]:

$$\langle g(r_1, z_1) g^*(r_2, z_2) \rangle = \int d^2 h W \left( h; \frac{r_1 + r_2}{2}; z_1, z_2 \right) \exp[-ih(r_1 - r_2)].$$

Действительно, после несложных вычислений из формул (8.7), (8.4) и (8.3) получим

$$\begin{aligned} \langle p_s(R_1, R_i) p_s^*(R_2, R_j) \rangle &= \sum_{n,m,v,\mu} a_{nm}(r_1, r_2) \times \\ &\times B_{nm}^{v,\mu}(r_1, r_2, r_i, r_j) \varphi_n(z_1) \varphi_m(z_i) \varphi_v(z_2) \varphi_\mu(z_j), \end{aligned} \quad (8.13)$$

$$\begin{aligned} B_{nm}^{v,\mu}(r_1, r_2, r_i, r_j) &= \int_{-\infty}^{+\infty} d^2 r' W_{nm}^{v\mu} \left( \frac{q_{nm}(r_1, r_i) + q_{v\mu}(r_2, r_j)}{2}; R \right) \times \\ &\times \exp[i(q_{nm}(r_1, r_i) - q_{v\mu}(r_2, r_j))r], \\ W_{nm}^{v\mu}(h, r) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dz' dz'' T_{nm}(z') T_{v\mu}^*(z'') W(h, r, z', z''). \end{aligned}$$

Из формул (8.11) – (8.13) видим, что последовательность решения задачи для случайных неоднородностей оказывается похожей на случай детерминированных возмущений. Сначала из формулы (8.12) определяется матрица  $B_{nm}^{v\mu}$ , потом к ней применяется обратное преобразование Фурье по горизонтальным переменным и далее определяется вертикальная структура. Каких-либо дополнительных потерь информации по сравнению со случаем детерминированных неоднородностей не происходит.

На практике источники зондирующего звукового поля являются некогерентными, поэтому измеряемой характеристикой служит только функция корреляции поля одного источника. Из формулы (8.13) при  $i = j$  видно, что в силу ортогональности собственных функций волновода величины  $B_{nm}^{v\mu}(-)$  при  $m \neq \mu$  без дополнительных априорных предположений определить не удастся. В случае, когда измеряемым параметром является интенсивность звукового поля ( $R_1 = R_2$  в формуле (8.13)), аналогичная ситуация имеет место и при определении величины  $B_{nm}^{v\mu}(-)$  при  $n \neq v$ .

Таким образом, для восстановления локального спектра неоднородностей поля скорости звука в океанском волноводе требуется априорная параметризация спектра (т. е. определение функциональной зависимости спектра от набора параметров, количественные значения которых неизвестны). При этом для случайных неоднородностей объем дополнительной информации существенно возрастает. Как увидим ниже, реально даже при заданной структуре пространственного спектра неод-

нородности по вертикали определяется только некоторая комбинация параметров, описывающих спектр. Количественные значения этих параметров в отдельности средствами чисто акустической томографии океана без привлечения априорной информации определить не удастся.

Как показывает проведенный выше анализ, схема дифракционной томографической реконструкции может быть практически без изменений перенесена в акустику океана, что позволяет осуществить реконструкцию пространственного распределения параметров океанических неоднородностей, вызывающих дифракцию зондирующих акустических сигналов.

Основой реконструкции является решение интегрального уравнения (с ядром, идентичным ядру преобразования Фурье) на основе совместной обработки набора томографических проекций, роль которых в случае дифракционной томографии играют совокупности пространственных частот, фиксируемых при различных ракурсах (углах падения поля подсветки). Отличительной особенностью дифракционной томографии океана является необходимость модовой селекции, что обуславливается волноводным характером распространения сигналов.

Таким образом, для процесса технической реализации дифракционной томографической схемы объективно существуют проблемы, связанные со спецификой формирования дифракционной томографической схемы. К таким проблемам относится задача аппроксимации результатов измерений в узлы эквидистантной прямоугольной решетки, что необходимо для осуществления обратного преобразования Фурье. Отличительной особенностью дифракционной томографии океана является необходимость модовой селекции, что обуславливается волноводным характером распространения просветных сигналов. Поэтому в дифракционных методах акустической томографии океана существенно возрастает роль априорной информации по сравнению со случаем неограниченного однородного пространства по следующим причинам.

Во-первых, диапазон углов падения и рассеяния акустических лучей в вертикальной плоскости из-за особенностей распространения часто ограничен малым интервалом значений.

Во-вторых, в горизонтальной плоскости из-за технических сложностей реализовать большое число приемных и излучающих систем затруднительно.

В-третьих, сильная зависимость коэффициента затухания звука от частоты ограничивает возможный диапазон варьирования частоты зондирующего поля.

В-четвертых, в «просветной» схеме рассеянный сигнал формируется практически всем пространственным спектром неоднородностей. Решение задачи для реальных неоднородностей, имеющих, как правило, степенной спектр, требует априорного задания формы спектра. Реконструкция тогда будет сводиться к определению количественных значений параметров стоящих в спектре.

В-пятых, как и все томографические методы, дифракционная томография является некорректной задачей, поскольку высокочастотные компоненты не могут быть удовлетворительно реконструированы из-за влияния шумов.

Для интегральной реконструкции образа морской неоднородности необходимо произвести большое количество измерений какого-то информационного параметра вдоль определенной траектории. В условиях широкомасштабного наблюдения за подводной обстановкой с помощью низкочастотного просветного метода невозможно произвести большое количество измерений информационного параметра при применении двух горизонтально-разнесенных приемников и одного излучателя.

## **8.6. Квазидифракционный метод реконструкции возмущений морской среды, сформированных движущимся подводным объектом**

Учитывая особенности дифракционной томографии и необходимость решения задачи упрощенной реконструкции возмущений морской среды, созданных движущимся подводным объектом, был предложен квазидифракционный метод, характеризующийся неадиабатическим распространением звука в океане с мезонеоднородностями (мелкомасштабными). По аналогии с акустической томографией Манка и Вунша томографическая схема, реализующая данный метод, выглядит следующим образом:

1. Измеряемый параметр. Акустическая томография Манка и Вунша – разность времени распространения акустического сигнала по лучу с учетом и без учета возмущенной области (времени распространения). Квазидифракционный метод – разность фаз спектральных компонент многочастотного фазомодулированного просветного сигнала, принятого на горизонтально-разнесенные приемники с узкой диаграммой направленности в вертикальной плоскости (для обеспечения модовой селекции).

2. Условия распространения упругой звуковой волны (просветного сигнала). Акустическая томография Манка и Вунша – лучевое приближение. Квазидифракционный метод: для горизонтальной плоскости – лучевое приближение, для вертикальной – волновое приближение. Это связано с процессом формирования возмущенной области и с ее геометрическими размерами: в горизонтальной плоскости приблизительно 20 км, что практически в 10 раз больше френелевского объема; в вертикальной плоскости приблизительно 500 м, что в 2 раза меньше, чем френелевский объем в вертикальной плоскости.

3. Реконструируемый параметр. Акустическая томография Манка и Вунша – изменения показателя преломления скорости звука. Квазидифракционный метод – фазовая модуляция как результат взаимодействия низкочастотного просветного сигнала с возмущенной областью, созданной движущимся подводным объектом.

4. Изучаемая или анализируемая неоднородность. Акустическая томография Манка и Вунша – синоптическая неоднородность. Квазидифракционный метод – возмущенная область, созданная движущимся подводным объектом.

Схема алгоритма представлена на рис. 8.1. Особенности алгоритма, реализующего квазидифракционный метод:

1. Используется дискретная выборка информации, когда источник и приемник разнесены, а возмущенная область движется с определенной скоростью. В этом случае в качестве томографических проекций могут быть использованы совокупности сигналов, зафиксированных при определенных значениях временных (фазовых) задержек двумя горизонтально-разнесенными приемниками.

Это позволяет осуществлять реконструкцию, не используя перебор большого количества угловых проекций для падающего поля в горизонтальной плоскости. Данный подход позволяет осуществлять модовую селекцию в вертикальной области, тем самым избегать искажений, связанных с интерференцией мод, и преодолевать априорную неопределенность в знании характеристик помехосигнальной обстановки в районе. В данном алгоритме временная длительность импульса выбирается такой, чтобы его пространственная длительность была мала по сравнению с характерным масштабом изменчивости статистических параметров возмущенной области в горизонтальной плоскости [3-7].

С другой стороны, ширина частотного спектра сигнала не должна быть слишком большой. Иначе существенным окажется изменение резонансной гармоник простран-



ственного спектра возмущений, т.е. в промодулированном просветном сигнале различные участки частотного спектра будут сформированы сильно отличающимися друг от друга участками пространственного спектра неоднородностей.

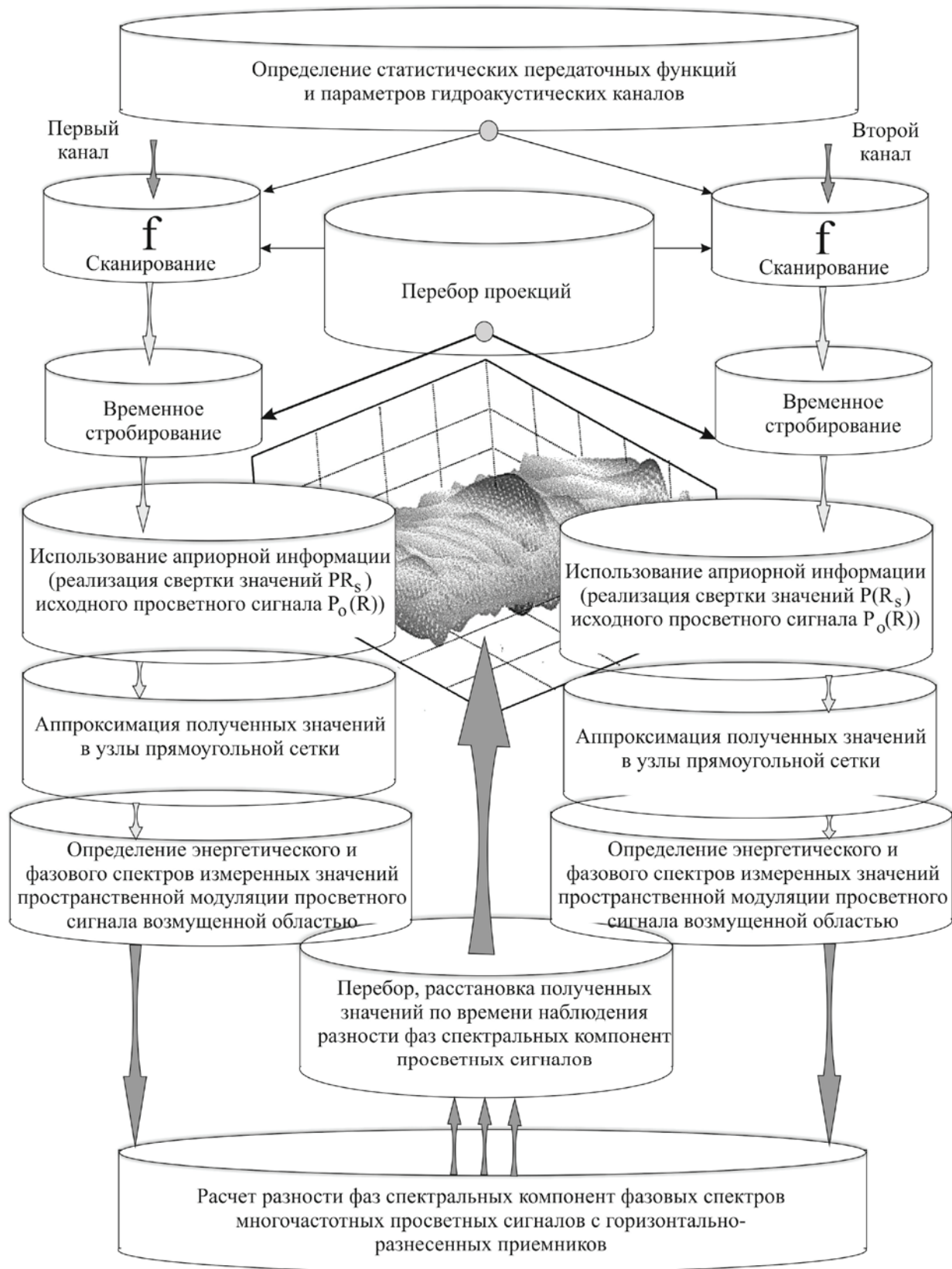


Рис. 8.1. Алгоритм реализации квазидифракционного метода реконструкции возмущений морской среды

2. Из-за поглощения большей части вертикальных компонент спектра промодулированного сигнала полная реконструкция пространственного распределения возмущений по глубине по данным, измеренным в дальней зоне, практически невозможна. В случае мелкого моря при реконструкции больших неоднородностей от движущихся подводных объектов в пределах ширины пространственного спектра укладывается только одна мода. Очевидно, что реконструкция вертикального распределения неоднородности невозможна. Однако реконструкция горизонтального распределения возможна путем перебора проекций.

3. Необходимо учитывать явления, связанные с интерференционной структурой полей в волноводах. В предложенном алгоритме реконструкции информация о модовой интерференции задается априорно, что практически выражается в предварительном построении океанского волновода, в котором осуществляется наблюдение.

4. Один из способов, позволяющих учесть априорную информацию о свойствах океанского волновода, заключается в селекции отдельных мод горизонтально-разнесенными приемниками.

5. При реконструкции мезомасштабных неоднородностей большая часть измененного поля сконцентрирована вблизи угла падения поля просветного сигнала. Если осуществлять реконструкцию на основе такого суммарного сигнала, то результирующее распределение будет представлено малыми по интенсивности вариациями на фоне большой по величине подсветки. Учитывая ограниченность динамического диапазона систем регистрации, для успешной реконструкции в алгоритме предусмотрена фильтрация, подавление прямого сигнала подсветки и расчет обратной свертки. Существенное ослабление подсветки возможно с помощью доплеровского смещения и при использовании больших горизонтально-разнесенных приемных антенн.

6. Совместной обработке информации от разнесенных в пространстве антенн уделялось достаточно большое внимание. На сигнальном уровне совместная обработка получила наименьшее развитие в силу наличия эффекта раскорреляции сигналов при разнесении приемников. При когерентной взаимной обработке сигналов от двух разнесенных антенн суммарная площадь зоны освещения может быть больше суммарной площади освещения двух антенн на величину до 27,2 %, при некогерентной – до 12 %. Для повышения эффективности томографических систем можно сформулировать подход, направленный на поиск методов и путей реализации квазиоптимальных алгоритмов обработки информации (с учетом особенностей поведения сигналов целей) в пассивном режиме обнаружения и в активном режиме облучения.

7. В мелком море томографические системы проще строить по рубежному принципу, а в глубоком – по зональному. Протяженность рубежа должна многократно превосходить дальности обнаружения отдельной антенной, а у зональной системы дальность обнаружения должна существенно превышать протяженность антенны (в десятки и сотни раз). Информация, полученная в результате обработки сигналов каждой антенной, поступает на совместную обработку, где принимается решение об обнаружении цели.

8. Согласно критерию Неймана – Пирсона оптимальная процедура проверки гипотез состоит в вычислении отношения правдоподобия и сравнении его с порогом. При изотропной некоррелированной помехе задача оптимальной пространственной обработки (в смысле достижения наибольшего отношения сигнал/шум) сводится к согласованному со средой объединению сигналов с двух разнесенных приемных элементов. Все это позволяет избежать потерь помехоустойчивости из-за сложного многомодового (многолучевого) характера распространения просветных сигналов в волноводе.

9. В алгоритме реализован процесс синхронизации спектральных компонент от двух хаотических динамических приемных систем, объединенных хаотическим осциллятором, реализованный на основе фазовой или лаг-синхронизации.

Рассмотрим связь процесса взаимодействия возмущенной области с характеристиками давления звукового поля  $P(R_s)$ , представляющего собой сумму переизлученного (измененного) поля и поля подсветки среды, не затронутого возмущенной областью, созданной движущимся подводным объектом. Как и в работах [4, 6, 7], если источник звука монохроматический, комплексная амплитуда звукового давления  $p(RS) \exp[i\omega t]$  удовлетворяет уравнению

$$\Delta P + \frac{\omega^2}{c^2(R)} p \cong 2 \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\delta c}{c} P, \quad (8.14)$$

где  $\delta \bar{c}$  – возмущения скорости звука ( $|\delta \bar{c}| \ll c$ ).

Отсюда, используя формулу Грина для случая просветной системы, получим

$$P_s(R) = P(R_s) - P_0(R) \approx \int_{-\infty}^{+\infty} d^3R' G_0(R, R') K_0^2 g(R') P(R'), \quad (8.15)$$

где  $P_0(R)$  – звуковое поле подсветки в отсутствие возмущенной области при  $\delta \bar{c} \equiv 0$  (однородная безграничная среда);  $P_s(R)$  – переизлученное или измененное на возмущенной области поле подсветки;  $K_0^2 = \omega^2 / c^2(R)$ ,  $G_0(R, R')$  – волновое число и функция Грина невозмущенной среды;  $g(R')$  – функция, описывающая физический процесс взаимодействия возмущенной области с просветным сигналом, или то, что требует реконструкции.

В борновском приближении полное поле  $P(RS)$  под интегралом в уравнении (8.15) приближенно можно заменить на недифрагированное поле  $P_0(R)$ . Интегральное соотношение (8.15) показывает, что задача томографической реконструкции возмущений  $g(R')$  по рассчитанным данным  $P_s(R)$  сводится к решению интегрального уравнения (8.14) с ядром  $W'(R, R') = G_0(R, R') K_0^2(R') P(R')$ . Поле  $P(RS)$  и, следовательно, ядро  $W'(R, R')$  будут зависеть не только от положения источника и горизонтов приемников, но и от условий распространения просветного сигнала через возмущенную область, описываемых функцией

$$g(R') = P_0(R) \cdot \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} \sum_{k_N=-\infty}^{\infty} J_{k_1}(m_1) J_{k_2}(m_2) \dots J_{k_N}(m_N) \times \\ \times \cos(\omega_0 + k_1 \Omega_1 + k_2 \Omega_2 + \dots + k_N \Omega_N) t.$$

В условиях однородной безграничной среды, происходит физический процесс фазовой модуляции просветного сигнала группой низкочастотных колебаний возмущенной

области с частотами  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N$  соответственно. В данном случае наблюдается отход от ситуации классической томографии к относительной, где реальный «физический объект» заменяется на «физический процесс».

В результате точное интегральное соотношение (8.15) можно свести к приближенному интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода

$$P_s(R) = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} d^3R' W_0^i(R, R') g(R') \right)^{1/2}, \quad (8.16)$$

с ядром

$$W'(R, R') = G_0(R, R') K_0^2(R') P_0(R').$$

С точки зрения такой томографической реконструкции, каждая из измеряемых величин  $P_s(R)$  является интегральной проекцией, связанной с пространственной модуляцией просветного сигнала возмущенной областью. Остановимся подробнее на особенностях томографии океана, связанных с волноводным характером распространения звука.

Определим связь измеряемого поля  $P_{\Sigma S}(\frac{L_n}{c_0}, \theta_{N, m_i}, V_g)$  с функцией  $g(R')$ , описывающей физический процесс фазовой модуляции просветного сигнала группой низкочастотных колебаний возмущенной областью.

При этом будем использовать геометрическое (в горизонтальной плоскости) и модовое (в вертикальной плоскости) описание звукового поля.

Для применимости геометрического способа учета влияния возмущенной области на распространение просветного сигнала в горизонтальной плоскости необходимо, чтобы характерный ее размер был много больше поперечного размера френелевского объема. При длине волны  $\lambda = 3,87$  м (т.е. частоте порядка 387,6 Гц) и характерном расстоянии  $\rho \approx 3,5 \cdot 10^5$  м френелевский радиус имеет порядок  $(\lambda \rho)^{1/2} \approx 1163,8$  м. Следовательно, для возмущенной области с горизонтальными масштабами порядка 8–10 км и более можно физический луч в горизонтальной плоскости заменить геометрическим. В вертикальной плоскости размер френелевского объема может быть приблизительно такого же порядка, как и в горизонтальной [3, 4, 6, 7]. При величине возмущенной области в вертикальной плоскости, равной 150–200 м, и френелевском объеме 1163,8 м поле в волноводе может быть представлено только в виде суммы нормальных волн (мод).

Пусть первичное поле  $P_0$  задается точечным источником с индексом  $i$ , помещенным в точке  $R_i = (r_i, z_i) = (x_i, y_i, z_i)$ . Полагая область  $V_g$  ограниченной и расположенной достаточно далеко от источника и приемника, подставим модовое представление для функций Грина  $G_0(R, R')$  и  $p_0(R') = G(R', R)$  в волновой зоне ( $|R - R'|, |R' R_i| \gg \lambda$ ) в формулу (8.16). Тогда вместо интегрального уравнения (8.16) получим:

– для горизонтальной плоскости

$$P_{\Sigma S}(\frac{L_n}{c_0}, \theta_{N, m_i}, V_g) = \left( \sum_{g=1}^Q P_0 \Psi_{\text{ПФ}}^G \frac{V_g}{c_0 R_S^2} \right) \pm P_{\pm S}(N_g^Q),$$

– для вертикальной плоскости

$$P_s(R, R') = \sum_{n,m}^N A_{nm}(r, r_i) \varphi_m(z, r) \varphi_n(z_i, r_i),$$

$$A_{nm}(r, r_i) = \int_{V_g} d^3R' T_{nm}(R') L_{nm}(r, r_i, r') g(r', z'), \quad (8.17)$$

$$T_{nm}(R') = K_0^2(R') \varphi_n(z', r') \varphi_m(z', r'),$$

$$L_{nm}(r, r_i, r') = [h_n h_m |r - r'| |r' - r_i|]^{1/2} \times$$

$$\times \exp[-ih_m |r - r'| - ih_n |r' - r_i| - i\frac{\pi}{2}]. \quad (8.18)$$

Как следует из формулы (8.18), комплексная амплитуда измененного (перерассеянного) поля просветного сигнала  $P_s(R, R')$  в вертикальной плоскости полностью характеризуется значениями величины  $\|A_{nm}(r, r_i)\|$ , элементы которой определяются ориентацией акустической трассы (источник-приемник сигналов)  $r, r_i$  и номерами мод: возбуждаемой источником моды ( $n$ ) и принятой, т. е. рассеянной морской неоднородностью моды ( $m$ ). Таким образом, процедура томографического восстановления  $g(R')$  в океанском волноводе состоит из определения (измерения) комплексной амплитуды  $A_{nm}(r, r_i)$  по каждой моде и последующего решения интегрального уравнения (8.17). В силу ортогональности собственных функций волновода  $\varphi_n(z, r)$  и их нормировки  $\int \varphi_n^2(z, r) dz = 1$  из уравнения (8.18) легко определяются элементы  $\|A_{nm}(r, r_i)\|$ :

$$\|A_{nm}(r, r_i)\| = \iint_{V_g} dz dz_i p_s(R, R') \varphi_m(z) \varphi_n(z).$$

Таким образом, суммарное давление на приемнике определяется как

$$P_{\Sigma S}(R) = \left( \sum_{g=1}^Q P_0 \Psi_{\Pi\Phi}^G \frac{V_g}{c_0 R_S^2} \right) \pm P_{\pm S}(N_g^Q) + \sum_{n,m}^N A_{nm}(r, r_i) \varphi_m(z, r) \varphi_n(z_i, r_i).$$

Особенностью реконструкции  $g(R')$  на основе «квазидифракционного» томографического алгоритма, связанного с волноводным характером распространения звука в вертикальной плоскости, является зависимость результатов реконструкции падающей и рассеянной мод. Изменение индексов  $n$  и  $m$  в определенной степени изменяет результаты, так как меняется пространственная область по глубине, где осуществляется взаимодействие мод  $n$  и  $m$ .

### 8.6.1. Специфика перебора проекций в квазидифракционном методе

В акустической томографии океана перебор проекций является сложной проблемой, и ее реализация имеет во многих случаях определяющее значение. Прежде всего это связано с техническими трудностями подобного рода измерений в естественных условиях, когда среда распространения просветных сигналов плохо прогнозируема.

Учитывая это, в дальнейшем будем уделять основное внимание учету многочисленных особенностей распространения акустических полей в океане, способных облегчить и упростить реализацию этапа сбора необходимого количества экспериментальных данных для томографической реконструкции.

Первый этап реконструкции в квазидифракционном методе, основанном на алгоритме (см. рис.8.1), заключается в дискретном измерении комплексного давления суммарного поля  $P_{\Sigma S}(R)$  для всех возможных векторов  $q = K_s - K_i$  совокупности просветных сигналов на двух горизонтально-разнесенных приемниках пространственно-временного спектра возмущений, созданных движущимся подводным объектом. При проведении данных измерений приемно-излучающая система стационарна, а объект с определенной скоростью движется между ними, что позволяет перебирать все частоты пространственного спектра при фиксированных углах наблюдения и падения.

Перечислим основные проблемы, свойственные практически всем дифракционным, в том числе и квазидифракционному, методам томографии. Прежде всего задача в целом является некорректной, и при решении интегрального уравнения (8.17) необходимо использовать методы регуляризации, которые будут рассмотрены ниже. Кроме того, необходимо решить ряд вопросов, связанных с аппроксимацией и дискретизацией данных [3, 4, 230]. Наиболее существенно ограничение возможностей реконструкции связано с трудностью измерения в натуральных условиях полного пространственного спектра возмущений, созданных движущимся подводным объектом. При переборе проекций в квазидифракционном методе дискретно измеренной областью  $P_{\Sigma S}(R)$  является величина проекции сечения возмущенной области в вертикальной плоскости в виде отрезка прямой, границы которого определяются диапазоном используемых частот пространственно-временного спектра возмущений морской среды в вертикальной плоскости. В квазидифракционном методе процедура реконструкции возмущений также требует или перебора всех возможных углов падения, или перебора частот, или того и другого одновременно, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Недостаточное число проекций в реальных экспериментах требует при решении усложненной задачи привлечения в той или иной форме априори информации. Возможные варианты перебора проекций в квазидифракционном методе в целом аналогичны тем, что используются в дифракционной томографии.

Существуют и некоторые особенности, связанные с процессом сбора информации о структуре фазомодулированных полей. Помимо вариантов перебора углов подсветки и регистрации фазомодулированных полей, частот просветных сигналов, частот допле-

ровских фильтров и временных задержек отдельных спектральных компонент можно отметить и способы перебора проекций, предназначенные для определения матрицы  $\|A_{nm}\|$ , т. е. способы, которые позволяют осуществить выделение отдельных волноводных мод или акустических лучей. По существу именно в этом и заключается специфика квазидифракционного метода. С этой целью используется пространственная, особенно горизонтальная, фильтрация, основанная на широкомасштабных горизонтально-разнесенных приемных антеннах. При этом селекция интервалов вертикальных углов прихода сигналов обеспечивает выделение определенной волноводной моды либо пачки мод. С той же целью применяют временное стробирование в сочетании с импульсным возбуждением просветных сигналов. В этом случае используются различия в скоростях распространения сигналов для различных волноводных мод [3-7]. Для диагностики неоднородностей возможно использование эффекта фазовой модуляции просветных сигналов возмущениями морской среды, созданными движущимся подводным объектом. Быстрая динамика изменения возмущений, особенно в горизонтальной плоскости, дает достаточно устойчивые характеристики для реконструкции пространственно-частотно-фазового спектра таких неоднородностей.

В океане присутствуют одновременно различные типы неоднородностей, пространственно-временные частотные спектры которых могут перекрываться. Указанное обстоятельство сужает области возможных изменений проекций (углов, частот), вынуждая ограничиваться их значениями, принадлежащими интервалам, в которых вклад определенных типов неоднородностей доминирует. Второй этап реконструкции в квазидифракционном методе, основанном на алгоритме (рис. 8.1), заключается в учете данных особенностей и излагается ниже в следующих подразделах.

### **8.6.2. Обратная свертка совокупности просветных сигналов, принятых на горизонтально разнесенные приемные элементы измерительной томографической системы**

Деконволюция или обратная свертка в гидроакустике используется не широко. В основном она применяется для сжатия сигналов с целью повышения временного или пространственного разрешения результатов измерений. В грави- и магниторазведке с ее использованием производятся перерасчеты аномальных полей вниз. В ядерной геофизике методы деконволюции являются основными при количественной интерпретации результатов измерений, чему способствует принцип суперпозиции ядерно-физических полей. Процесс восстановления, выделения полезного сигнала, несущего в себе информацию о структуре и характеристиках возмущений морской среды, для решения задачи реконструкции является основополагающим, поэтому в дальнейшем будем использовать понятие деконволюции [3-7]. Если для прямой свертки сигнала ( $P_{\Sigma S}(R) x(k)$ ) с импульсным откликом  $h(n)$  линейной системы (фильтра) мы имеем уравнение  $y(k) = h(n) x(k) \Leftrightarrow H(z)X(z) = Y(z)$ , то возможна постановка и обратной задачи деконволюции – определение просветного сигнала на входе линейной (томографической) системы по значениям выходного сигнала:

$$X(z) = Y(z)/H(z) = Y(z)H^{-1}(z) \Leftrightarrow y(k) h^{-1}(n) = x(k),$$

где индексом « - 1 » символически обозначен оператор обратного фильтра, инверсный прямому. Очевидно,

$$H(z)H^{-1}(z) = 1 \Leftrightarrow h(n) h^{-1}(n) = \delta_0(n),$$

$$H^{-1}(z) = 1/H(z) \Leftrightarrow h^{-1}(n). \quad (8.19)$$

где  $\delta_0(n)$  – импульс Кронекера ( $\delta_0(n) = 1$  при  $n = 0$ ,  $\delta_0(n) = 0$  при  $n \neq 0$ ).

Выражение (8.19) позволяет сделать некоторые выводы об особенностях выполнения деконволюции. При ограниченной импульсной реакции  $h(n)$  инверсный оператор  $h^{-1}(n)$  в общем случае не ограничен. Если импульсная реакция представлена нормированным диполем

$$h(n) = \{1, a\} \Leftrightarrow (1 + az) = H(z),$$

то имеем

$$H^{-1}(z) = 1/(1 + az) = 1 - az + a^2z^2 - a^3z^3 + \dots, \quad h^{-1}(n) = \{1, -a, a^2, -a^3, \dots\}.$$

Это действительно практически для любых операторов фильтров, энергия которых на каких-либо ограниченных участках главного частотного диапазона близка к нулю. При инверсии спектральной функции таких операторов на этих участках возникают резкие энергетические пики, которые при обратном преобразовании Фурье дают медленно затухающие функции операторов.

Отсюда следует, что для точного выполнения деконволюции необходимо располагать бесконечно длинным инверсным оператором фильтра. Инверсия операторов обычно всегда связана с усилением высоких частот, что приводит к резкому повышению коэффициента усиления дисперсии помех инверсных фильтров. Деконволюция выполняется, если инверсный оператор достаточно быстро затухает и может быть ограничен. Но использование усеченных операторов приводит к появлению определенной ее погрешности, величину которой следует контролировать. Функция  $H(z)$  в выражении (8.19) имеет особые точки – нули функции, которые становятся полюсами функции  $H^{-1}(z) = 1/H(z)$  и определяют устойчивость инверсного фильтра. Для того чтобы фильтр деконволюции был устойчивым, ряд  $1/H(z)$  должен сходиться, т.е. полюса функции должны находиться вне единичного круга на  $z$ -плоскости.

Многочлен  $H(z)$  порядка  $N$  может быть разложен на  $N$  простых сомножителей-двучленов (диполей):

$$H(z) = (a - z)(b - z)(c - z) \dots,$$

где  $a, b, c$  – корни полинома. Обращение передаточной функции равно

$$H^{-1}(z) = \frac{1}{a - z} \frac{1}{b - z} \frac{1}{c - z} \dots \quad (8.20)$$

Если каждый из диполей функции (8.20) является минимально-фазовым диракоидом, т.е. корни диполей находятся вне единичного круга на  $z$ -плоскости и модули нулевых членов диполей всегда больше следующих за ними первых членов (в данном случае  $|a| > 1$ ,  $|b| > 1$ ,  $|c| > 1$ ), то и функция  $H(z)$  в целом также является минимально-фазовым диракоидом. При этом максимум энергии импульсного отклика сосредоточен в его начальной части и последовательность отсчетов представляет собой затухающий ряд. Со-



ответственно и функция  $1/H(z)$  также будет представлять собой сходящийся ряд, и инверсный фильтр будет устойчив. Так, например, фильтр, реализующий передаточную функцию (8.19), в самой общей форме может быть выполнен в виде включенных последовательно фильтров, каждый из которых имеет передаточную функцию следующего типа (для первого фильтра):

$$H_1^{-1}(z) = 1/(a - z) = (1 + z/a + z^2/a^2 + \dots)/a.$$

Если диполи функции (8.20) представляют собой и диракоиды, и реверсоиды, то обращение будет центроидом и определяться рядом Лорана:

$$H^{-1}(z) = \dots + h_{-2}z^{-2} + h_{-1}z^{-1} + h_0 + h_1z^1 + h_2z^2 + \dots$$

То есть оператор инверсного фильтра является двусторонним и не обязательно симметричным, как мы обычно рассматривали ранее двусторонние операторы. Запишем уравнение (8.19) для инверсного фильтра в развернутой форме:

$$H^{-1}(z) = 1/(h_0 + h_1z + h_2z^2 + \dots). \quad (8.21)$$

Так как для минимально-фазового оператора всегда выполняется условие  $h_0 \neq 0$ , приведем выражение (8.21) к виду

$$H^{-1}(z) = (1/h_0)/(1 + h_1z/h_0 + h_2z^2/h_0 + \dots) = G/(1 + q_1z + q_2z^2 + \dots), \quad (8.22)$$

где  $G = 1/h_0$ ,  $q_1 = h_1/h_0$ ,  $q_2 = h_2/h_0$  и т.д.

Но уравнение (8.22) есть не что иное, как уравнение передаточной функции рекурсивного фильтра, где цепь обратной связи образована коэффициентами нормированного оператора  $h(n)$ . Алгоритм вычислений будет следующий:

$$y_k = Gx_k - \sum_{n=1}^N q_n y_{k-n}.$$

Выражение (8.22) уникально по своим возможностям. В принципе оно может реализовать оператор инверсной фильтрации с бесконечным импульсным откликом. На практике оно может использоваться вместо медленно затухающих инверсных операторов, модуль одного из полюсов которого очень близок к 1 (менее 1,1) при высоких требованиях к метрике приближения.

Рассмотренный выше метод относится к расчету так называемых идеальных инверсных фильтров, т.е. фильтров полной прямой инверсии системных операторов. Однако использование идеальных инверсных фильтров на практике не всегда возможно, так как регистрируемые данные обычно осложнены влиянием помех (шумов), а инверсные фильтры обычно имеют коэффициент усиления шумов значительно больше 1. Здесь мы подошли к задаче расчета устойчивости совокупности сигналов, которые используются для реконструкции возмущений морской среды.

В данном случае задача точной деконволюции (восстановления истинной первоначальной формы просветного сигнала), как правило, не ставится, и инверсные фильтры считаются оптимальными с точки зрения максимального приближения к форме полезного (информативного) сигнала с определенным допустимым коэффициентом усиления дисперсии помех. Такие фильтры называются фильтрами неполной (частичной, ограни-

ченной) деконволюции. При проектировании фильтров неполной деконволюции учитываются статистические характеристики помех во входном сигнале и их соотношение со статистическими характеристиками самого входного просветного сигнала. Передаточная функция фильтра неполной деконволюции с учетом помех во входном сигнале определяется выражением [3-7]:

$$H^{-1}(z) = H(z)/[|H(z)|^2 + g^2], \quad (8.23)$$

где  $g^2 = k \cdot \sigma_h^2$  – дисперсия шумов в единицах дисперсии оператора  $h_n$ ;  $\sigma_h^2$  – дисперсия значений оператора  $h_n$  (при условии суммы значений оператора, равной 1);  $k$  – отношение дисперсии шумов к дисперсии оператора  $h_n$ .

Коэффициент  $g^2$  играет роль регуляризирующего фактора при выполнении операции деконволюции информации.

Снижение усиления дисперсии шумов сопровождается увеличением погрешности приближения, при этом уменьшается амплитуда восстановления импульса Кронекера и появляются осцилляции после импульса. Но при наличии шумов и правильном выборе параметра  $g$  общее отношение амплитудных значений сигнал/шум для оператора по формуле (8.23) больше, чем для прямой инверсии по выражению (8.19), что объясняется более существенным уменьшением коэффициента усиления дисперсии шумов при увеличении параметра  $g$ , чем увеличением погрешности приближения.

Операторы оптимальных фильтров также могут вычисляться с учетом помех. Если сигнал  $P_{\Sigma S}(R)$  и помеха статистически независимы, а это наблюдается однозначно при горизонтально-разнесенном приеме, то функция автоковариации просветного сигнала на входе такого фильтра имеет вид

$$a_i = as_i + b_i, \quad (8.24)$$

где  $as_i$  и  $b_i$  – функции автоковариации просветного сигнала и помех.

При помехе типа белого шума функция автоковариации помех представляет собой весовую дельта-функцию в точке 0:

$$b_i = c^2 \delta_i, \quad (8.25)$$

где  $c^2$  – дисперсия помех.

С учетом этого фактора расчет оптимальных инверсных фильтров может проводиться по выше приведенным формулам (8.24, 8.25) с изменением значения коэффициента  $a_0$ :

$$a_0 = a_0 + c^2.$$

На рис. 8.2, а приведены примеры операторов оптимальных инверсных фильтров, вычисленные по прямому оператору.

Значения коэффициента  $c^2$  заданы в долях дисперсии прямого оператора. Ввод коэффициента  $c^2$  в функцию автоковариации резко уменьшает значения коэффициентов инверсного оператора и, соответственно, уменьшает коэффициент усиления дисперсии помех. Для приведенного примера при исходном значении коэффициента усиления дисперсии шумов порядка 12 для  $c^2 = 0$  его значение уменьшается до 1,8 при  $c^2 = 0.1\sigma^2$  и становится меньше 1 при  $c^2 > 0,3\sigma^2$ .

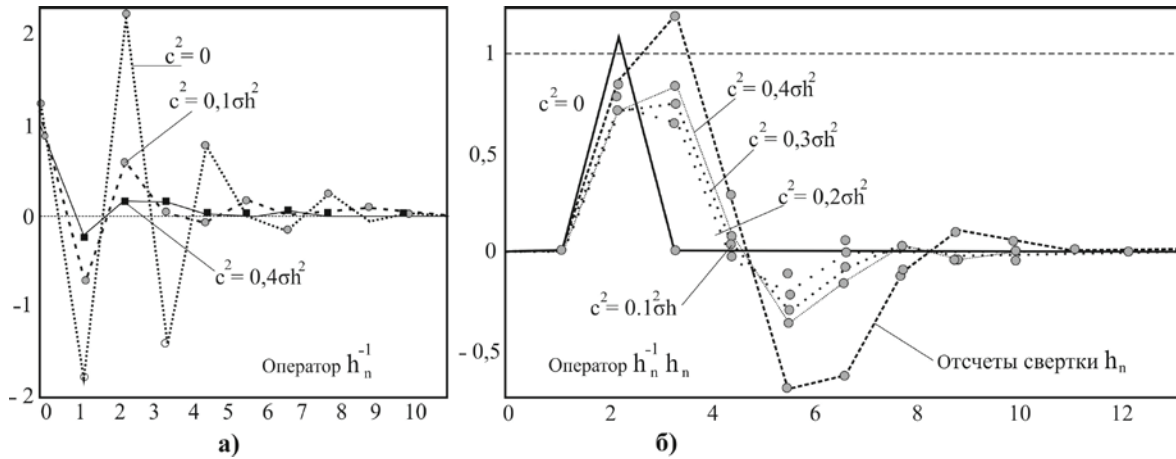


Рис. 8.2. Примеры расчета операторов оптимальных инверсных фильтров

Естественно, что общая погрешность приближения деконволюции при этом также существенно изменяется (см. рис. 8.2, б), но амплитуда значения просветного сигнала на месте импульса Кронекера (там, где он должен быть) изменяется много меньше, чем коэффициент усиления дисперсии шумов, а следовательно, отношение сигнал/шум при введении коэффициента  $c^2$  существенно увеличивается; так в итоге и решается задача достаточно устойчивого выделения просветного сигнала на фоне различного по составу источников шума [3-7].

### 8.6.3. Разделение пространственно-частотных спектров возмущений морской среды путем расчета их энергетических спектров

Процесс распределения энергии сигнала по спектральным компонентам называется энергетическим спектром. Понятия мощности и энергии в теории сигналов не относятся к характеристикам каких-либо физических величин сигналов, а являются их количественными характеристиками, отражающими определенные свойства сигналов и динамику изменения их значений во времени, в пространстве или по любым другим аргументам.

Для произвольного, в общем случае комплексного, сигнала мгновенная мощность по определению равна квадрату функции его модуля, для вещественных сигналов – квадрату функции амплитуд. Энергия сигнала равна интегралу от мощности по всему интервалу существования или задания сигнала. Энергия сигналов может быть конечной или бесконечной. Конечную энергию имеют финитные сигналы и сигналы, затухающие по своим значениям в пределах конечной длительности, которые не содержат дельта-функций и особых точек (разрывов второго рода и ветвей, уходящих в бесконечность). В противном случае их энергия равна бесконечности. Бесконечна также энергия периодических сигналов.

Частотное представление применяется не только для спектрального анализа сигналов, но и для упрощения вычислений энергии сигналов и их корреляционных характеристик.

Для произвольного сигнала  $s(t) = a(t) + jb(t)$ , где  $a(t)$  и  $b(t)$  – вещественные функции, мгновенная мощность сигнала (плотность распределения энергии) определяется выражением [3-7]

$$w(t) = s(t)s^*(t) = a^2(t) + b^2(t) = |s(t)|^2,$$

где \* – знак комплексно сопряженной величины

Энергия сигнала равна интегралу от мощности по всему интервалу существования сигнала, в пределе

$$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} w(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt.$$

По существу мгновенная мощность является плотностью мощности сигнала, так как измерения мощности возможны только через энергию, выделяемую на определенных интервалах ненулевой длины:

$$w(\tau) = (1/\Delta t) \int_{\tau - \Delta t/2}^{\tau + \Delta t/2} |s(t)|^2 dt.$$

Сигнал  $s(t)$  изучается, как правило, на определенном интервале  $T$  (для периодических сигналов – в пределах одного периода  $T$ ), при этом средняя мощность сигнала равна

$$W_T(\tau) = (1/T) \int_{\tau}^{\tau+T} w(t) dt = (1/T) \int_{\tau}^{\tau+T} |s(t)|^2 dt.$$

Понятие средней мощности может быть распространено и на незатухающие сигналы, энергия которых бесконечно велика. В случае неограниченного интервала  $T$  строго корректное определение средней мощности сигнала производится по формуле

$$W_s = \lim_{T \Rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt.$$

Энергия и норма сигналов связаны соотношениями

$$E_s = \|s(t)\|^2, \|s\| = \sqrt{E_s}.$$

Энергия суммы двух произвольных сигналов  $u(t)$  и  $v(t)$  определяется выражением

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} [u(t)+v(t)]^2 dt = E_u + E_v + 2 \int_{-\infty}^{\infty} u(t)v(t) dt.$$

Как следует из этого выражения, энергии сигналов, в отличие от самих сигналов, в общем случае не обладают свойством аддитивности. Энергия суммарного сигнала  $u(t) + v(t)$ , кроме суммы энергий составляющих сигналов, содержит в себе и так называемую энергию взаимодействия сигналов или взаимную энергию:

$$E_{uv} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} u(t)v(t) dt. \tag{8.26}$$

Интеграл выражения (8.26) для двух вещественных сигналов является фундаментальной характеристикой, пропорциональной взаимной энергии сигналов. Его называют скалярным произведением сигналов:

$$\Pi_{uv} = (u(t), v(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)v(t) dt = \|u\| \|v\| \cos \varphi,$$

Линейное пространство сигналов с таким скалярным произведением называется гильбертовым пространством  $H$ . В гильбертовом пространстве справедливо неравенство Коши – Буняковского:

$$|\Pi_{uv}| \leq \|u\| \|v\|.$$

Для комплексного гильбертова пространства скалярное произведение также представляет собой вещественное число и вычисляется по формуле

$$\Pi_{uv} = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)v^*(t) dt \equiv \int_{-\infty}^{\infty} u^*(t)v(t) dt. \quad (8.27)$$

Из выражения (8.27) следует, что косинус угла между сигналами равен

$$\cos \varphi = \Pi_{uv}/(\|u\| \|v\|).$$

При полной тождественности сигналов (равенстве амплитуд и временных координат) скалярное произведение становится равным энергии сигналов:

$$\Pi_{uv} = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)^2 dt \equiv \int_{-\infty}^{\infty} v(t)^2 dt \equiv \|u\|^2 \equiv \|v\|^2.$$

Дискретные сигналы обычно рассматриваются в пространстве Евклида (обозначение пространства –  $R_2$ ). Скалярное произведение двух сигналов в пространстве Евклида имеет вид

$$\Pi_{uv} = (u_k, v_k) = \sum_{k=1}^n u_k v_k,$$

где  $n$  – размерность пространства.

Из очевидной однозначности энергии взаимодействия сигналов независимо от формы их математического представления (в динамической и частотной модели) следует выражение для скалярного произведения произвольных вещественных сигналов  $u(t)$  и  $v(t)$  через спектральные плотности сигналов  $U(\omega)$  и  $V(\omega)$  в комплексном гильбертовом пространстве:

$$\Pi_{uv} = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} U(\omega)V^*(\omega) d\omega \equiv (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} U^*(\omega)V(\omega) d\omega. \quad (8.28)$$

Функции  $W_{uv}(\omega) = U(\omega)V^*(\omega)$ ,  $W_{vu}(\omega) = U^*(\omega)V(\omega)$ ,  $W_{uv}(\omega) = W_{vu}^*(\omega)$ , для которых справедливо выражение (8.28), называются взаимными энергетическими спектрами вещественных сигналов и являются функциями распределения плотности энергии взаимодействия сигналов (мощности взаимодействия) по частоте. В общем случае, за исключением спектров четных функций, взаимные энергетические спектры также являются комплексными функциями:

$$U(\omega) = A_u(\omega) + j B_u(\omega), \quad V(\omega) = A_v(\omega) + j B_v(\omega).$$

$$W_{uv} = A_u A_v + B_u B_v + j (B_u A_v - A_u B_v) = \text{Re } W_{uv}(\omega) + j \text{Im } W_{uv}(\omega). \quad (8.29)$$

С учетом четности реальной части и нечетности мнимой части энергетических спектров интеграл мнимой части выражения (8.29) равен нулю, а следовательно, скалярное произведение сигналов всегда является вещественным и неотрицательным, как и энергия сигналов:

$$\Pi_{uv} = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} W_{uv}(\omega) d\omega \equiv (1/\pi) \int_0^{\infty} \text{Re } W_{uv}(\omega) d\omega. \quad (8.30)$$

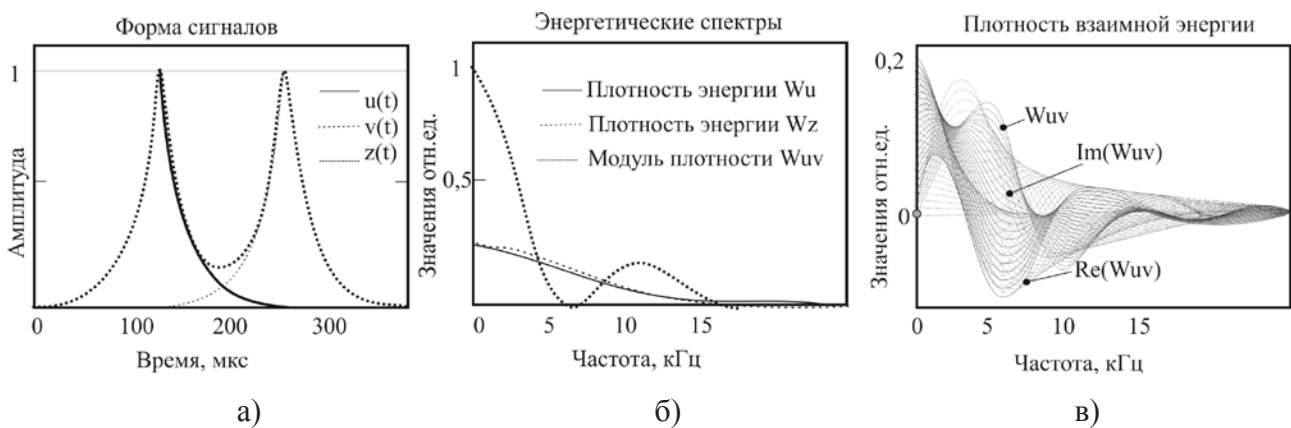


Рис. 8.3. Форма (а) энергетические спектры сигналов (б) и плотность взаимной энергии (в)

На рис. 8.3 приведена форма двух одинаковых сдвинутых во времени и частично перекрывающихся лапласовских импульсов  $u(t)$  и  $v(t)$ , а также суммарный импульс  $z(t) = u(t) + v(t)$ . Плотности энергии сигналов  $W(f)$  приведены в относительных единицах плотности энергии суммарного сигнала  $W_z(f)$  на нулевой частоте. Как видно из графиков, плотности энергии сигналов являются вещественными неотрицательными функциями и содержат только реальные части. В отличие от них плотность взаимной энергии сигналов является комплексной функцией, при этом модуль плотности по своим значениям на шкале частот соизмерим со средними значениями плотности энергии сигналов на этих частотах и не зависит от их взаимного расположения на временной оси [1-7].

Для сигналов, одинаковых по форме, модуль взаимной плотности равен значениям плотности энергии сигналов [3-7].

На рис. 8.4 приведены плотности взаимной энергии тех же сигналов при разной величине временного сдвига  $\Delta t$  между сигналами. Для постоянного значения модуля вза-

имной энергии сигналов действительная и мнимая функции спектра мощности существенно изменяются при изменении сдвига между сигналами. При незначительной величине временного перекрытия сигналов частота осцилляций реальной и мнимой части плотности взаимной энергии достаточно велика, а относительный коэффициент затухания колебаний достаточно мал. Соответственно при вычислении скалярного произведения по формуле (8.30) положительные амплитудные значения осцилляций  $\text{Re}(W_{uv})$  практически полностью компенсируются отрицательными значениями и результирующий интеграл, а равно и энергия взаимодействия сигналов (удвоенное значение скалярного произведения), стремится к нулю по мере увеличения сдвига между сигналами.

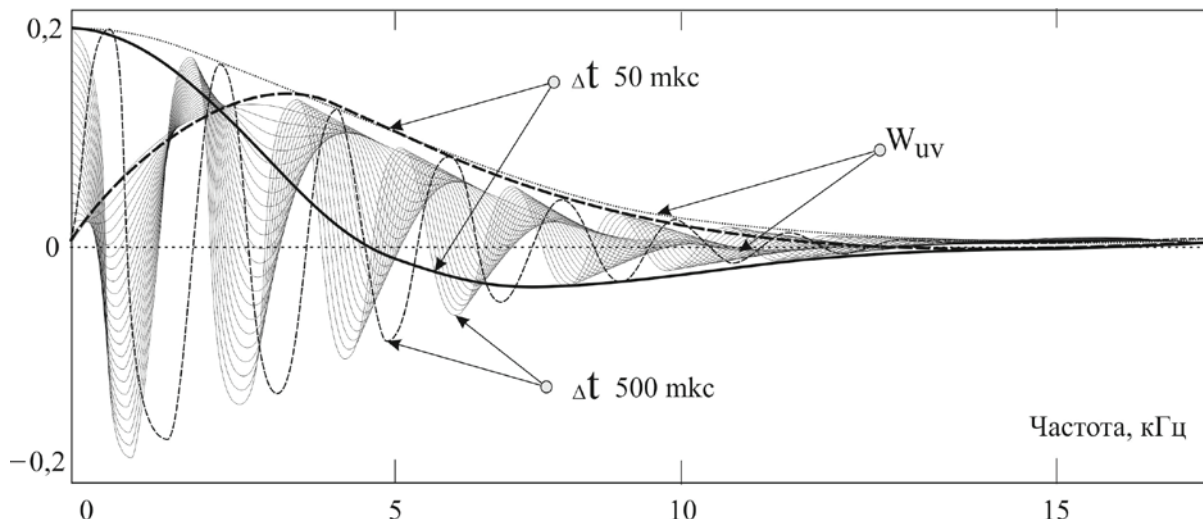


Рис. 8.4. Взаимные энергетические спектры сигналов

При увеличении степени взаимного перекрытия сигналов частота осцилляций плотности взаимной энергии уменьшается ( $\Delta t = 50$  мкс на рис. 8.4) и основным по энергии реальной части спектра становится центральный низкочастотный пик, площадь которого не компенсируется площадью последующей отрицательной полуволны осцилляции. Соответственно возрастает и энергия взаимодействия сигналов. При полном перекрытии сигналов (при нулевом фазовом угле между сигналами) осцилляции исчезают, и энергия взаимодействия сигналов максимальна. Если функция  $s(t)$  имеет Фурье-образ  $S(\omega)$ , то плотность мощности сигнала (спектральная плотность энергии сигнала) определяется выражением

$$w(t) = s(t)s^*(t) = |s(t)|^2 \Leftrightarrow |S(\omega)|^2 = S(\omega)S^*(\omega) = W(\omega).$$

Спектр мощности  $W(\omega)$  – вещественная неотрицательная четная функция, которую обычно называют энергетическим спектром. Спектр мощности как квадрат модуля спектральной плотности сигнала не содержит фазовой информации о его частотных составляющих, а следовательно, восстановление сигнала по спектру мощности невозможно. Это означает также, что сигналы с различными фазовыми характеристиками могут иметь одинаковые спектры мощности. В частности, сдвиг сигнала не отражается на его спектре мощности. Последнее позволяет получить выражение для энергетического спектра непосредственно из выражений (8.30). В пределе, для одинаковых сигналов  $u(t)$  и  $v(t)$  при сдвиге  $\Delta t \Rightarrow 0$ , мнимая часть спектра  $W_{uv}(\omega)$  стремится к нулевым значениям, а реальная часть – к значениям модуля спектра. При полном временном совмещении сигналов имеем

$$W_{uv}(\omega) = U(\omega)V^*(\omega) = U(\omega)U^*(\omega) = |U(\omega)|^2 = W_u(\omega).$$

Соответственно полная энергия сигнала примет вид

$$E_u = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)^2 dt = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} W_u(t) dt = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} |U(\omega)|^2 d\omega,$$

то есть энергия сигнала равна интегралу квадрата модуля его частотного спектра – сумме энергии его частотных составляющих – и всегда является вещественной величиной. Для произвольного сигнала  $s(t)$  равенство  $\int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df$  обычно называют равенством Парсеваля (в математике – теоремой Планшереля, в физике – формулой Рэлея). Равенство очевидно, так как координатное и частотное представления по существу только разные математические отображения одного и того же сигнала. Аналогично для энергии взаимодействия двух сигналов имеем

$$\int_{-\infty}^{\infty} u(t) v^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} U(f) V^*(f) df.$$

Из равенства Парсеваля следует инвариантность скалярного произведения сигналов и нормы относительно преобразования Фурье:

$$(u(t), v(t)) = (U(f), V(f)), \quad \|s(t)\|^2 = \|S(f)\|^2.$$

В целом ряде чисто практических задач регистрации и передачи сигналов энергетический спектр сигнала имеет весьма существенное значение. Периодические сигналы переводятся в спектральную область в виде рядов Фурье. Запишем периодический сигнал с периодом  $T$  в виде ряда Фурье в комплексной форме:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S_k \exp(j2\pi kt/T).$$

Вычислим среднюю мощность сигнала за один период:

$$W_T = (1/T) \int_0^T s^2(t) dt = (1/T) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_k S_m \int_0^T \exp(j2\pi(k+m)t/T) dt.$$

Интервал  $0-T$  содержит целое число периодов всех подынтегральных экспонент, и равен нулю, за исключением экспоненты при  $k = -m$ , для которой интеграл равен  $T$ . Средняя мощность периодического сигнала, соответственно, будет равна сумме квадратов модулей коэффициентов ряда Фурье:

$$W_T = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |S_k|^2.$$



Как правило, спектры сигналов с крутыми фронтами (например, М- сигналов при передаче цифровых данных) являются многолепестковыми с постепенным затуханием энергии в последовательных лепестках. Пример нормированного энергетического спектра прямоугольного импульса длительностью  $\tau_n$  приведен на рис. 8.5. Спектры выполнены в линейном (сплошная линия) и логарифмическом (пунктир) масштабе по оси значений. Для четкого разделения лепестков функции спектров приведены по безразмерной частотной переменной  $f\tau_n$ . Интегрированием энергетического спектра по интервалам лепестков спектра нетрудно вычислить, что в пределах первого лепестка сосредоточено 40.2 % энергии всего сигнала, в пределах второго – 4,8 %, в пределах третьего – 1,7 %, и т.д.

Если форма сигналов в пункте их приема (детектирования) существенного значения не имеет, а регистрация сигналов идет на уровне статистических шумов, равномерно распределенных по всему частотному диапазону, то такие сигналы целесообразно пропускать через фильтр нижних частот с выделением только первого энергетического лепестка сигнала.

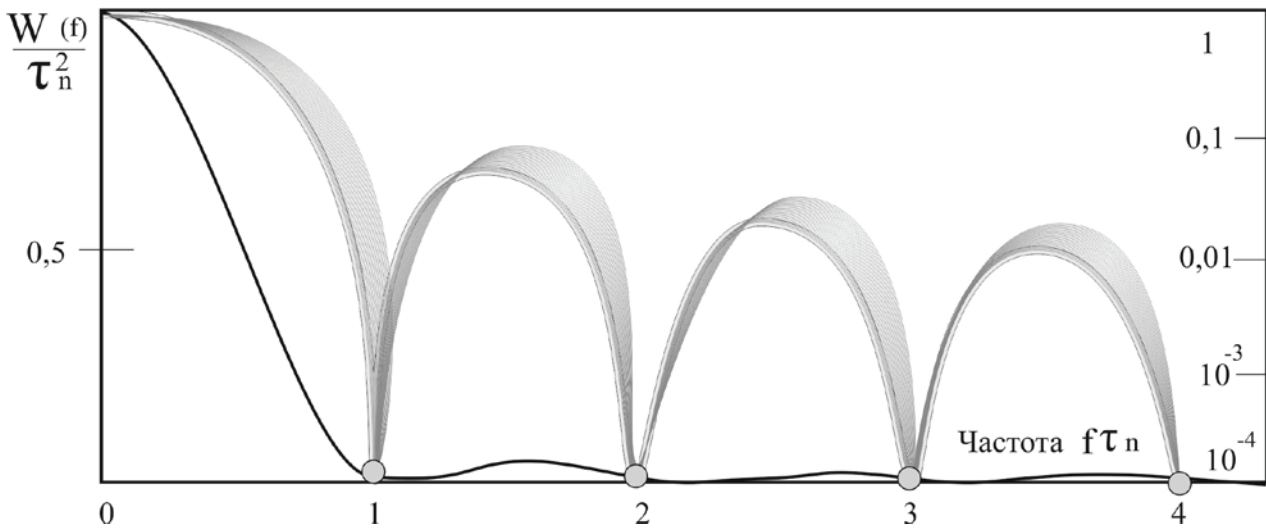


Рис. 8.5. Энергетический спектр прямоугольного импульса

Естественно, что при этом фронты регистрируемого сигнала будут сглажены. Но при расширении полосы пропускания фильтра на два или три лепестка энергия принимаемого сигнала будет увеличена соответственно на 9,8 или 6,5 %, в то время как энергия шумов в 2 или 3 раза [3, 4, 230].

В процессе расчета энергетического спектра имеется еще одна особенность, вносящая существенную ошибку в его определение. Для вычисления спектра мощности (так как именно он используется в большинстве случаев) с использованием преобразования Фурье приходится переводить действительную функцию в комплексную область, а затем вновь в действительную, на что используется дополнительное машинное время и память. Использование преобразования Хартли позволяет избежать этих переходов, так как оно определено в действительной области.

*Основные достоинства преобразования Хартли.* Преобразование симметрично (т.е. прямое и обратное преобразования находятся одинаково). Преобразование действительно (т.е. экономим память и время на преобразование). Существуют быстрые алгоритмы вычисления преобразования.

Основные соотношения, определяющие прямое и обратное преобразования Хартли:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} V(t) \text{cas} 2\pi f t dt \text{ – прямое преобразование Хартли;}$$

$$V(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t) \text{cas} 2\pi f t dt \text{ – обратное преобразование Хартли;}$$

$$\text{cas}(\alpha) = \stackrel{\text{def}}{=} \cos(\alpha) + \sin(\alpha) \text{ – определение функции cas.}$$

Под функцией cas по сути понимается тот же синус, сдвинутый на  $\pi/8$ . Результатом такого преобразования будет одно число для каждой частоты, что не позволяет иметь всю информацию о преобразуемой функции. В частности, преобразование Хартли совершенно «не замечает» функции  $\sin(\pi/8 + \pi t/2)$ .

Данный подход уже на стадии определения энергетического спектра позволяет избавиться от ненужных (помеховых) спектральных компонент.

В ходе наблюдения за характеристиками качества процесса следует различать два типа изменчивости. Изменчивость, вызванная общими причинами, соответствует случайной динамике, свойственной этому процессу и свойственной всем наблюдаемым значениям. Если процесс находится в допустимых пределах, должна присутствовать только обычная изменчивость. При контроле качества эта изменчивость изображается в виде случайных колебаний точек, соответствующих отдельным выборкам, вокруг центральной линии. Все выборки находятся между верхней и нижней контрольными линиями, и в них отсутствуют любые неслучайные конфигурации наблюдений из соседних выборок.

Изменчивость, вызванная специальными или объясняемыми причинами, может быть объяснена наличием особых обстоятельств. Обычно на карте контроля качества это проявляется в виде сильно уклоняющихся выборок (т.е. превышающих нижний или верхний контрольный пределы) или в виде систематической конфигурации (серии) из соседних выборок. Эта изменчивость также влияет на вычисление некоторых характеристик энергетического спектра (центральной линии и контрольных пределов).

Для более точного проведения спектрального анализа на основе энергетического спектра необходимо его осуществлять с использованием различных типов окон (Ханна, Хемминга, треугольных). Краткая характеристика данных окон такова [3-7]:

1. Весовое окно Ханна – это колоколообразная весовая функция вида  $\sin(x)^2$ .

2. Весовое окно Хемминга означает сглаживание значений периодограммы взвешенным скользящим средним. В окне Хемминга или Тьюки – Хемминга для каждой частоты, веса, взвешенного скользящего среднего значения периодограммы вычисляются как

$$\omega_j = 0,54 + 0,46^* \cos(\pi^* j / p) \quad (\text{для } j \text{ от } 0 \text{ до } p) \quad \omega_{-j} = \omega_j \quad (\text{для } j \neq 0),$$

где  $p = (m - 1)/2$ .

Эта весовая функция приписывает больший вес сглаживаемому наблюдению, находящемуся в центре окна, и меньшие веса значениям по мере удаления от центра. Модуль «Временные ряды» нормирует все веса так, что их сумма равна 1.

3. Окно Бартлетта. В анализе временных рядов окно Бартлетта означает сглаживание значений периодограммы взвешенным скользящим средним. В окне Бартлетта веса вычисляются как

$$\omega_j = 1 - (j/p) \text{ (для } j \text{ от } 0 \text{ до } p), \omega_{-j} = \omega_j \text{ (для } j \neq 0),$$

где  $p = (m - 1)/2$ .

Эта весовая функция приписывает больший вес сглаживаемому наблюдению, находящемуся в центре окна и меньшие веса значениям по мере удаления от центра. Всего было произведено 12 экспериментов с варьированием 4 типов весовых окон: Ханна, Хэмминга, Наттолла, прямоугольное и усреднения 2, 4, 8 спектров.

Применение весовых окон Ханна и Хэмминга позволяет подавить добавочные максимумы. В результате дискретные составляющие слабого уровня, не обнаруженные при использовании прямоугольного окна, наблюдаются при использовании других вышеуказанных окон. Применение окна Наттолла дает аналогичный эффект, но при этом степень подавления добавочных максимумов еще выше. Однако использование окон Ханна, Хэмминга, Наттолла уменьшает выигрыш в превышении ярко выраженных дискретных составляющих среднего уровня спектра на 1–2 дБ – в случае использования окон Ханна и Хэмминга, на 3 дБ – при использовании окна Наттолла.

Таким образом, использование весовых окон при обработке ведет к выявлению слабых дискретных составляющих спектра и одновременно к незначительному подавлению (на 5–10 %) ярко выраженных дискретных составляющих.

Кроме того, применение специальных весовых окон ведет к расширению главного лепестка на уровне 0,5 (по мощности энергетического спектра). При использовании окна Ханна расширение составляет до 20 %, при использовании окна Хэмминга – до 35%, при использовании окна Наттолла – до 50%. Применение усреднения при одновременном использовании различных типов весовых окон ведет к значительному расширению главного максимума на уровне 0,5 (до 100 % и более). Все вышеперечисленные явления характерны как для обычного процесса, так и для процесса после адаптации. Применение специальных весовых окон (Ханна, Хэмминга, Наттолла) позволяет обнаруживать дискретные составляющие малой мощности в шумах; применение адаптации дает более значительный эффект. Таким образом, комплексное применение адаптации и специальных весовых окон в ряде случаев дает возможность выявить весь ряд спектральных компонент, подавить наиболее мощные и малоинформативные для реконструкции дискретные составляющие и разделить их по причинам возникновения.

Применение усреднения различного количества спектров (от 2 до 8) показало следующие результаты. При усреднении по сравнению с мгновенным спектром происходит резкое уменьшение среднеквадратичной ошибки помехи, что позволяет обнаруживать дискретные составляющие более низкого уровня, при этом выигрыша в превышении дискретных составляющих среднего уровня помехи не наблюдается. В процессе испытаний установлено, что использование усреднения более 4 спектров малоэффективно. Усреднение процесса после адаптации приводит к уменьшению на 5–10 % превышения дискретных составляющих среднего уровня помехи. Поэтому применение процедуры усреднения процесса после адаптации нецелесообразно.

Все это позволяет оптимизировать энергетический спектр совокупности низкочастотных просветных сигналов, принятых на горизонтально-разнесенные приемники, выявить только те спектральные компоненты, которые принадлежат процессу взаимодействия просветного сигнала с возмущенной областью, созданной движущимся подводным объектом, и отстро-

иться от спектральных компонент, принадлежащих шумам и естественным явлениям морской среды. Энергетический и частотный спектры, участвующие в определении фазового спектра и разности фаз спектральных компонент делятся на три устойчивых участка:

– первый (центральный по оси частот относительно несущей низкочастотного сигнала) с малой интенсивностью спектральных компонент принадлежит исходному низкочастотному просветному сигналу;

– второй (левый по оси частот относительно несущей низкочастотного просветного сигнала) с достаточно интенсивными спектральными компонентами принадлежит процессу первичного взаимодействия низкочастотного просветного сигнала в объеме возмущенной области, созданной движущимся подводным объектом;

– третий (правый по оси частот относительно несущей низкочастотного просветного сигнала) с достаточно интенсивными спектральными компонентами принадлежит процессу дальнейшего взаимодействия низкочастотного просветного сигнала с возмущенной областью, созданной движущимся подводным объектом, при их широкомасштабном пространственном распространении в водной среде.

Появление третьего участка объясняется тем, что суммарная внутренняя волна от возмущенной области в процессе своего распространения превращается в ударную (бурюобразную) волну с острым гребнем, обогащается высокочастотными гармониками и изменяет спектр низкочастотного просветного сигнала.

#### **8.6.4. Измерение и реализация фазового спектра сигналов в просветных томографических системах**

Кроме обычного амплитудного спектра определяющим спектральную плотность исследуемого источника является «фазовый спектр», выделяющий фазы всех спектральных компонент исследуемой оптимизированной совокупности низкочастотного просветного сигнала. Совокупность гармонических составляющих, образующих сигнал несинусоидальной формы, называется спектром этого негармонического сигнала. Из этого набора гармоник выделяют и различают амплитудный и фазовый спектр [4, 7, 227]. Амплитудным спектром называют набор амплитуд всех гармоник, который обычно представляют диаграммой в виде набора вертикальных линий, длины которых пропорциональны (в выбранном масштабе) амплитудным значениям гармонических составляющих, а место на горизонтальной оси определяется частотой (номером гармоники) данной составляющей. Аналогично рассматривают фазовые спектры как совокупность начальных фаз всех гармоник; их также изображают в масштабе в виде набора вертикальных линий. Следует заметить, что начальные фазы в акустике принято измерять в пределах от  $-\pi$  до  $+\pi$ .

Спектры, состоящие из отдельных линий, называют линейчатыми или дискретными. Спектральные линии находятся на расстоянии  $f$  друг от друга, где  $f$  – частотный интервал, равный частоте первой гармоники  $f$ . Таким образом, дискретные спектры периодических сигналов имеют спектральные составляющие с кратными частотами –  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$  и т.д.

Получение фазы сигнала является одной из наиболее часто встречающихся на практике задач обработки сигналов в гидроакустике, поскольку мгновенная фаза несет в себе значительную информацию о просветном сигнале. На практике наиболее часто используются методы цифровой обработки сигнала, использующие дискретное преобразование Фурье (ДПФ):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-2\pi jnk/N).$$

Фазовый спектр сигнала может быть вычислен следующим образом:

$$\varphi(k) = \arctg(\text{Im}[X(k)] / \text{Re}[X(k)]).$$

Поскольку функция арктангенс имеет областью значения интервал  $-\pi/2; \pi/2$ , то для получения реальной фазы сигнала в диапазоне  $-\pi; \pi$  необходимо учитывать также знаки действительной и мнимой части ДПФ сигнала. При аппаратной реализации данного метода требуются значительные затраты на деление и определение знаков действительной и мнимой части. Это приводит к использованию большого количества логических элементов и увеличению времени латентности делителя пропорционально разрядности операндов. К тому же возникают значительные затраты памяти для хранения таблицы значений функции арктангенс.

Альтернативой может служить реализация, использующая алгоритмы CORDIC («цифра за цифрой»). CORDIC – это совокупность эффективных методов поворота вектора  $(x, y) = x + jy$  с помощью операций сложения и сдвига. Для вектора, повернутого на угол  $\Theta = \pm \arctg[\beta/\alpha]$ , они описываются выражением

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \alpha x_k \pm \beta y_k; \\ y_{k+1} &= \alpha y_k \pm \beta x_k. \end{aligned}$$

Это итерационный процесс с  $\alpha = 1; \beta = 2^{-k}$  (все умножения на степень 2 реализуются сдвигами); поворот на заданный угол с точностью до  $n$ -го разряда требует  $n$  итераций. Тогда выражения (8.30) для арктангенса можно переписать как

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k - \delta_k y_k 2^{-k}; y_{k+1} = y_k + \delta_k x_k 2^{-k}; \\ z_{k+1} &= z_k - \delta_k \varepsilon_k; \\ \delta_k &= -\text{sgn } y_k; \varepsilon_k = \arctg(2^{-k}); z_0 = 0; \\ z_{n+1} &\approx \arctg(y_0/x_0). \end{aligned}$$

Аппаратная реализация процесса определения фазы может выглядеть следующим образом: для представления фазы в диапазоне от  $-\pi$  до  $\pi$  достаточно 4 разрядов и, значит, 4 итераций. Это позволяет обеспечивать фиксированное время латентности, независимо от разрядности входных данных, и достаточно устойчиво рассчитывать фазовый спектр оптимизированной совокупности низкочастотного просветного сигнала на двух горизонтально-разнесенных приемных элементах томографической системы. Как было отмечено выше, в спектре оптимизированной совокупности низкочастотного просветного сигнала должны остаться только элементы исходного сигнала и результаты процесса его взаимодействия с возмущенной областью, созданной движущимся подводным объектом.

Основываясь на этом, главной задачей в дальнейшем процессе реализации алгоритма реконструкции возмущений остается момент учета среды распространения на просветный сигнал. Данная задача решается путем расчета разности фаз спектральных компонент совокупности сигналов, принятых на горизонтально-разнесенные приемные элементы.

### 8.6.5. Оценка погрешности определения фазового спектра

Одним из основных объектов исследования в томографических системах является просветный сигнал, несущий в себе информационную составляющую и помеху. Важнейшим свойством информационной составляющей является отражение инерционных свойств физического объекта измерения. Знание порядка системы, описывающей физический объект, и наличие гладких производных, причем с конечным их числом, в информационной составляющей значительно упрощает выбор аппарата анализа и моделирования подобных сигналов с использованием современных технических и программных средств [1, 2, 7].

Для получения интерполяционных формул с гладкими производными на конечном интервале аргумента исследуемой функции, представленной выборками (сигнал с выхода аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), регистрация фазы по моментам пересечения сигнала через ноль и тому подобное), используются интерполяционные многочлены Ньютона, Эверетта, Стеффенсена, Гаусса, Бесселя, Стирлинга. Все возрастающее значение получает сплайн-интерполяция. Причем зачастую достаточно для требуемой точности аппроксимации переносчиков существующих информационных составляющих применить так называемую кубическую сплайн-интерполяцию.

Наличие в интерполяционной формуле конечного числа слагаемых с аргументом в различной (притом невысокой) степени наводит на мысль о необходимости поиска решения спектральной функции именно для такого вида временной функции. Подобное выражение спектральной характеристики было представлено для временных функций, удовлетворяющих условиям разложения в ряд Тейлора. Эта спектральная характеристика в виде функции плотности была выведена для сигнала  $e(t)$ , который полностью определен на интервале  $[t_1, t_2]$ , при этом  $t_1 = -\tau/2$ ,  $t_2 = \tau/2$ , при условии, что для абсолютных значений всех его производных  $e^{(i)}(t)$  можно указать некоторое ограничивающее их число. Спектр временной функции, удовлетворяющей перечисленным условиям, имеет вид

$$S(\omega) = \frac{2}{\omega} \left\{ \left[ A(\omega) \sin \frac{\omega\tau}{2} + B(\omega) \cos \frac{\omega\tau}{2} \right] + j \left[ C(\omega) \sin \frac{\omega\tau}{2} + D(\omega) \cos \frac{\omega\tau}{2} \right] \right\}, \quad (8.31)$$

где

$$A(\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{(2i)}(0) \sum_{k=0}^i \frac{(\tau/2)^{2(i-k)}}{[2(i-k)]! \omega^{2k}},$$

$$B(\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{(2i)}(0) \sum_{k=0}^i \frac{(\tau/2)^{2(i-k)}}{[2(i-k)]! \omega^{2k}},$$

$$C(\omega) = - \sum_{i=0}^{\infty} e^{(2i+1)}(0) \sum_{k=0}^i \frac{(\tau/2)^{2(i-k)}}{[2(i-k)]! \omega^{2k}},$$

$$D(\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{(2i+1)}(0) \sum_{k=0}^i \frac{(\tau/2)^{2(i-k)}}{[2(i-k)]! \omega^{2k}}.$$

Выражение (8.31) получено в работе [227] для степенного многочлена. Поэтому оно может быть использовано и для перечисленных выше интерполяций, которые по существу являются степенными многочленами. В случае несоответствия расположения сигнала на оси  $t$  оговоренным выше условиям можно сместить его на нужную величину смещения  $t_{\text{см}}$  (выровнять), чтобы эти условия выполнялись; при этом в спектральной характеристике появится фазовый множитель  $-j\Omega t_{\text{см}}$ .

Некоторые группы измерительных сигналов в фазовых информационно-измерительных системах (ИИС), в силу приобретенных свойств мультипликативного колебательного характера, обусловленного полосовыми и параметрическими свойствами передаточных функций элементов этих систем, эффективнее аппроксимировать сплайн-интерполяционными многочленами. Как показала практика, достаточно ограничиться третьей степенью, чтобы погрешность определения фазового спектра измерительного сигнала при его анализе в ограниченном диапазоне частот была существенно меньше общей погрешности системы. Основным достоинством для данного случая выступает обеспечение интерполяционным многочленом на границах его определения гладких производных.

Обозначим анализируемый интервал  $i$ -го сечения:  $\tau_i = T_i - T_{i-1}$ . Сместим по временной оси выборки сигнала  $e(t)$  на величину  $t_{\text{см}}$  до симметричного расположения выборок  $e_{i-1}$  и  $e_i$  относительно  $t = 0$  (выравнивание) таким образом, чтобы имели место следующие равенства:

$$t_{\text{см}} = (T_{i-1} + T_i) / 2; \quad (8.32)$$

$$t_i = T_i - t_{\text{см}}.$$

Для определения кубической сплайн-функции  $s_i(t)$  на интервале  $[t_{i-1}, t_i]$  будем использовать так называемый глобальный [4, 7] способ:

$$s_i(t) = -p_{i-1} \frac{(t-t_i)^3}{6\tau_i} + p_i \frac{(t-t_{i-1})^3}{6\tau_i} + \left( \frac{e_i}{\tau_i} - \frac{p_i \tau_i}{6} \right) (t-t_{i-1}) - \left( \frac{e_{i-1}}{\tau_i} - \frac{p_{i-1} \tau_i}{6} \right) (t-t_i), \quad (8.33)$$

где  $p_i$  – вторая производная сплайн-функции в одной из точек  $t_i$ .

Сплайн-функция позволяет аппроксимировать в границах  $i$ -го сечения функцию сигнала тем точнее, чем больше слева и справа от сечения используется число выборок сигнала  $e(t)$  для определения значений  $p_i$ . При малых значениях  $t_i$  ( $t_i \ll t_B = 1/\omega_B$ , где  $\omega_B$  – верхняя граничная частота полосы пропускания ИИС) иногда достаточно ограничиться двумя соседними выборками с номерами  $i-2$  и  $i+1$ . Для обеспечения неискаженного перехода к сплайн-функциям следующих интервалов зададимся краевыми условиями, заключенными в гладкости первых производных:

$$\frac{ds_{i-2}}{dt} = \frac{de_{i-2}}{dt}, \quad \frac{ds_{i+1}}{dt} = \frac{de_{i+1}}{dt}. \quad (8.34)$$

С учетом выбранных условий интерполяции для нахождения необходимых значений  $p_i$  можно составить следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau_{i-1}}{6} p_{i-2} + \frac{\tau_{i-1} + \tau_i}{3} p_{i-2} + \frac{\tau_i}{6} p_i + 0 = \frac{e_i - e_{i-1}}{\tau_i} - \frac{e_{i-1} - e_{i-2}}{\tau_{i-1}}, \\ 0 + \frac{\tau_i}{6} p_{i-1} + \frac{\tau_i + \tau_{i+1}}{3} p_i + \frac{\tau_{i+1}}{6} p_{i+1} + 0 = \frac{e_{i+1} - e_i}{\tau_{i+1}} - \frac{e_i - e_{i-1}}{\tau_i}, \\ \frac{\tau_{i-1}}{3} p_{i-2} + \frac{\tau_{i-1}}{6} p_{i-1} + 0 + 0 = \frac{e_{i-1} - e_{i-2}}{\tau_{i-1}} - \frac{de_{i-2}}{dt}, \\ 0 + 0 + \frac{\tau_{i+1}}{6} p_i + \frac{\tau_{i-1}}{6} p_{i+1} = \frac{e_{i+1} - e_i}{\tau_{i+1}} + \frac{de_{i+1}}{dt}. \end{array} \right. \quad (8.35)$$

Подставляя значения  $p_{i-1}$ ,  $p_i$  из решения системы (8.35) в выражение (8.33), найдем интерполяционное выражение  $s_i(t)$ . Спектральную плотность сигнала, аппроксимированного кубическим сплайном  $s_i(t)$ , можно определить по формуле (8.31), если выражение (8.33) привести к виду

$$s_i(t) = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0,$$

где

$$a_3 = \frac{p_i - p_{i-1}}{6\tau_i},$$

$$a_2 = \frac{p_{i-1}t_i - p_i t_{i-1}}{2\tau_i},$$

$$a_1 = \frac{3(p_i t_{i-1}^2 - p_{i-1} t_i^2) + 6(e_i - e_{i-1}) + \tau_i^2 (p_{i-1} - p_i)}{2\tau_i},$$

$$a_0 = \frac{(p_{i-1} t_i^3 - p_i t_{i-1}^3) + 6(e_{i-1} t_i - e_i t_{i-1}) + \tau_i^2 (p_{i-1} t_{i-1} - p_i t_i)}{2\tau_i}. \quad (8.36)$$

Наибольший интерес с точки зрения практики представляет случай равномерной по времени (с интервалом  $t$ ) выборки значений измерительного сигнала. В этом случае моменты выборки значений выровненного сигнала  $s_i(t)$  будут следующими:

$$t_{i-2} = -3\frac{\tau}{2}, \quad t_{i-1} = -\frac{\tau}{2}, \quad t_i = \frac{\tau}{2}, \quad t_{i+2} = 3\frac{\tau}{2}. \quad (8.37)$$



Кроме этого для вычисления первых производных в выражении (8.34) можно воспользоваться интерполяционным многочленом Лагранжа [175]:

$$\frac{de_{i-2}}{t} = \frac{-11e_{i-2} + 18e_{i-1} - 9e_i + 2e_{i+1}}{6\tau},$$

$$\frac{de_{i+1}}{t} = \frac{-2e_{i-2} + 9e_{i-1} - 18e_i + 11e_{i+1}}{6\tau}.$$

При этом ошибка аппроксимации будет сказываться на функциях, содержащих полиномы выше третьей степени, что вполне согласуется с ошибкой аппроксимации в целом функции сигнала кубическим полиномом. После подстановки выражений (8.37) и (8.34) в формулу (8.35), получим

$$\begin{aligned} p_{i-2} + 4p_{i-1} + p_i + 0 &= \frac{6(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})}{\tau^2}, \\ 0 + p_{i-1} + 4p_i + p_{i+1} &= \frac{6(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})}{\tau^2}, \\ 2p_{i-2} + p_{i-1} + 0 + 0 &= \frac{5(e_{i-2} - 12e_{i-1} + 9e_i - 2e_{i+1})}{\tau^2}, \\ 0 + 0 + p_i + p_{i+1} &= \frac{-2e_{i-2} + 9e_{i-1} - 12e_i + 5e_{i+1}}{\tau^2}. \end{aligned} \quad (8.38)$$

Решение системы уравнений (8.38) относительно вторых производных  $p_i$ ,  $p_{i+1}$  сплайн-функции  $s_i(t)$  будет следующим:

$$\begin{aligned} p_{i-1} &= \frac{e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2}}{\tau^2}, \\ p_i &= \frac{e_{i+1} - 2e_i + e_{i-1}}{\tau^2}. \end{aligned} \quad (8.39)$$

Подставляя выражения (8.37) и (8.39) в формулу (8.36), получим выражения  $a_i$ :

$$a_3 = \frac{b_3}{\tau^3}, b_3 = \frac{e_{i+1} - 3e_i + 3e_{i-1} - e_{i-2}}{6},$$

$$a_2 = \frac{b_2}{\tau^2}, b_2 = \frac{e_{i+1} - e_i - e_{i-1} + e_{i-2}}{4},$$

$$a_1 = \frac{b_1}{\tau}, b_1 = \frac{-e_{i+1} + 27e_i - 27e_{i-1} + e_{i-2}}{24}, \quad (8.40)$$

$$a_0 = \frac{b_0}{\tau}, b_0 = \frac{-e_{i+1} + 9e_i + 9e_{i-1} - e_{i-2}}{16}.$$

Устанавливаем соответствие функций:

$$a_0 = E, a_1 = E/t_1, a_2 = 4E/t_2, a_3 = 8E/t_3. \quad (8.41)$$

Подставляя значения выражения (8.41) с учетом формулы (8.40) в соответствующие табличные выражения  $A(\omega)$ ,  $B(\omega)$ ,  $C(\omega)$ ,  $D(\omega)$  и учитывая линейный характер Фурье-преобразования, составляем на основе (8.31) выражение спектральной плотности  $S_{B_i}(\omega)$  для выровненного сигнала  $s_i(t)$ :

$$S_{B_i}(\omega) = \frac{2}{\omega} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \left( b_0 + b_2 \left( \frac{1}{4} - \frac{2}{\omega^2 \tau^2} \right) \right) \sin \frac{\omega \tau}{2} + \frac{b_2}{\omega \tau} \cos \frac{\omega \tau}{2} \right] + \\ & + j \left[ \left( \frac{-b_i}{\omega \tau} - b_3 \left( \frac{3}{4\omega \tau} - \frac{6}{\omega^3 \tau^3} \right) \right) \sin \frac{\omega \tau}{2} + \right. \\ & \left. + \left( \frac{b_i}{2} + b_3 \left( \frac{1}{8} - \frac{3}{\omega^2 \tau^2} \right) \right) \cos \frac{\omega \tau}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (8.42)$$

Определяем спектральную плотность  $i$ -го сечения сигнала  $e(t)$ :

$$S_i(\omega) = S_{B_i}(\omega) \exp(-j\omega t_{cm}),$$

где  $t_{cm}$  определяется в соответствии с выражением (8.32).

У сплайн-интерполяции гораздо больше возможностей по согласованию стыков аппроксимаций соседних отрезков сигнала  $e(t)$  (заданное выравнивание на краях, цикличность, равенство вторых производных и так далее). Выбранный здесь вариант является достаточно минимизированным и в то же время достаточно эффективным для исследований и измерений параметров динамических систем спектральным методом.

Определение спектральной характеристики сигнала непосредственно по производным (прямой метод): если по-прежнему при интерполяции по выборкам сигнала  $e(t)$  не выходить за полином третьего порядка, то, очевидно, что в соответствии с формулой (8.31) выражения  $A(\omega)$ ,  $B(\omega)$ ,  $C(\omega)$ ,  $D(\omega)$  выровненного  $i$ -го сечения можно представить через производные сигнала в момент  $t = 0$ . В этом случае

$$A_i(\omega) = e_i^{(0)} + e_i^{(2)} \left( \frac{(\tau/2)^2}{2} - \frac{1}{\omega^2} \right) \quad (8.43)$$

$$B_i(\omega) = e_i^{(2)} \frac{\tau}{2\omega}, \quad (8.44)$$

$$C_i(\omega) = -e_i^{(1)} \frac{\tau}{2} - e_i^{(3)} \left( \frac{(\tau/2)^2}{2\omega} - \frac{1}{\omega^3} \right), \quad (8.45)$$

$$D_i(\omega) = e_i^{(1)} \frac{\tau}{2} + e_i^{(3)} \left( \frac{(\tau/2)^3}{6} - \frac{\tau}{2\omega^2} \right)$$

Поскольку все производные определяются в момент времени  $t = 0$ , значит, одна из выборок для точности вычислений [4, 7] должна быть представлена по этому моменту. По условиям применения интерполяционного многочлена Лагранжа для вычисления производных, число выборок в данном случае должно быть больше или равно четырем, тогда минимальное число выборок для вычисления следует брать равным пяти. Обозначим интервал  $i$ -го сечения:  $t_i = T_{i-1} - T_i$ . Чтобы воспользоваться выражениями (8.43), (8.44), (8.45), (8.42), сместим по временной оси выборки сигнала  $e(t)$  на величину  $t_{см}$  до симметричного расположения выборок  $e_{i-1}$  и  $e_{i+1}$  относительно  $t = 0$  (выравнивание) таким образом, чтобы имело место следующее равенство:

$$t_{см} = (T_{i-1} + T_{i+1})/2. \quad (8.46)$$

Производные для всех сечений, за исключением двух крайних ( $\tau = T_2 - T_0, \tau = T_k - T_{k-2}$ ), вычисляем по следующим формулам, полученным с помощью интерполяционного многочлена Лагранжа:

$$e_i^{(0)} = e_i,$$

$$e_i^{(1)} = \frac{-e_{i+2} + 8e_{i+1} - 8e_{i-1} + e_{i-1}}{6\tau},$$

$$e_i^{(2)} = \frac{-e_{i+2} + 16e_{i+1} - 30e_{i-1} + 16e_{i-1} - e_{i-2}}{3\tau^2},$$

$$e_i^{(3)} = \frac{4(e_{i+2} - 2e_{i+1} + 2e_{i-1} + 16e_{i-1} - e_{i-2})}{\tau^3}.$$

Производные для сечения  $\tau = T_2 - T_0$  вычисляем по формулам:

$$e_i^{(0)} = e_i,$$

$$e_i^{(1)} = \frac{e_4 - 6e_3 + 18e_2 - 10e_1 - 3e_0}{6\tau},$$

$$e_i^{(2)} = \frac{-e_4 + 4e_3 + 6e_2 - 20e_1 + 11e_0}{3\tau^2},$$

$$e_i^{(3)} = \frac{4(-e_4 + 6e_3 - 12e_2 + 10e_1 - 3e_0)}{\tau^3}.$$

Производные для сечения  $\tau = T_k - T_{k-2}$  вычисляем по формулам [235–237]:

$$e_i^{(0)} = e_i,$$

$$e_i^{(1)} = \frac{-e_{k-4} + 6e_{k-3} - 18e_{k-2} + 10e_{k-1} + 3e_k}{6\tau},$$

$$e_i^{(2)} = \frac{e_{k-4} - 4e_{k-3} - 6e_{k-2} + 20e_{k-1} + 11e_k}{3\tau^2},$$

$$e_i^{(3)} = \frac{4(e_{k-4} - 6e_{k-3} + 12e_{k-2} - 10e_{k-1} + 3e_k)}{\tau^3}.$$

Спектральную плотность  $S_{Bi}(\omega)$  выровненного сечения сигнала вычисляем в соответствии с выражениями (8.43), (8.44), (8.45), (8.42) и (8.31). Определяем спектральную плотность  $i$ -го сечения сигнала  $e(t)$ :

$$S_i(\omega) = S_{Bi}(\omega) \exp(-j\omega t_{cm}),$$

где  $t_{cm}$  определяется в соответствии с формулой (8.46).

Аппроксимация фрагментов измерительных сигналов вносит погрешность в определение амплитудного и фазового спектров, так как функция измерительного сигнала, сгенерированного практически любой динамической системой, содержит неопределенное число высших производных. Вопрос оценки погрешности определения фазового спектра в таких случаях оказывается достаточно неоднозначным. Оценки погрешностей рассмотренных выше типов интерполяций и им аналогичных при аппроксимации ими табулированных функций известны, но на практике оценить остаточный член интерполяции, не входящий в интерполяционный многочлен, весьма затруднительно. Кроме этого требуется установить функциональную связь между погрешностями аппроксимации и погрешностями определения функции фазового спектра измерительного сигнала. Разработанный метод оценки указанной погрешности базируется на предположении, что сигнал  $e(t)$ , содержащий измерительную информацию в фазовом спектре, имеет спектр, ограниченный справа некоторой частотой  $\omega_B = \omega_0$ .

В этом случае для оценки погрешности определения фазового спектра сигнала  $e(t)$  в качестве эталона берется фаза  $j_0$  гармонического колебания  $U_m \cos(\omega_0 t + j_0)$  и находится ее отображение  $j_z$  в частотной области от выровненного отрезка длиной  $t$  функции  $U_m \cos(\omega_0 t + j_0)$ . Делается это следующим образом. Преобразуем носитель эталона:

$$U_m \cos(\omega_0 t + j_0) = U_m \cos(\omega_0 t) \cos(\varphi_0) - U_m \sin(\omega_0 t) \sin(\varphi_0).$$

По условию эта функция существует только на интервале  $|t| \leq \tau/2$ . Тогда, учитывая линейный характер преобразования Фурье, для определения фазового спектра указанного отрезка воспользуемся значениями  $A(\omega)$ ,  $B(\omega)$ ,  $C(\omega)$ ,  $D(\omega)$ , полученными с помощью выражения (8.31) для аппликат соответственно  $U_m \cos(\omega_0 t) \cos(\varphi_0)$ ,  $U_m \sin(\omega_0 t) \sin(\varphi_0)$ .

Поскольку для первой аппликаты спектр  $S_1(\omega)$  содержит только  $\text{Re}S_1(\omega)$ , а для второй аппликаты спектр  $S_2(\omega)$  – только  $\text{Im}S_1(\omega)$ , то функция фазового спектра определяется как аргумент комплексной функции, составленной из спектров  $\cos(\varphi_0) \text{Re}S_1(\omega)$  и  $j \sin(\varphi_0) \text{Im}S_1(\omega)$  [4, 7]:

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \left[ \frac{\sin(\varphi_0) \text{Im}S_2(\omega)}{\cos(\varphi_0) \text{Re}S_1(\omega)} \right] =$$

$$= \text{arctg} \left\{ \frac{\left[ \frac{-U_m}{\omega - \omega_0} \cos \frac{\omega_0 \tau}{2} \sin \frac{\omega \tau}{2} + \frac{U_m}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \sin \frac{\omega_0 \tau}{2} \cos \frac{\omega \tau}{2} \right] \sin \varphi_0}{\left[ \frac{U_m}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \cos \frac{\omega_0 \tau}{2} \sin \frac{\omega \tau}{2} + \frac{-U_m}{\omega - \omega_0} \sin \frac{\omega_0 \tau}{2} \cos \frac{\omega \tau}{2} \right] \cos \varphi_0} \right\}.$$

Далее определяем фазу  $\varphi_z$  спектральной составляющей с частотой  $\omega_0$ . После несложного преобразования этого выражения с нахождением предела  $0/0$  при  $\omega \rightarrow \omega_0$  получим

$$\varphi_z = \varphi(\omega_0) = \text{arctg} \left\{ \frac{\omega_0 \tau - \sin(\omega_0 \tau)}{\omega_0 \tau + \sin(\omega_0 \tau)} \text{tg}(\varphi_0) \right\}. \quad (8.47)$$

Очевидными являются следующие особенности поведения  $\varphi_z(\tau)$ :

а) при  $\tau = \tau_k = k\pi / \omega_0$   $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\varphi_z(\tau_k) = \varphi_0$ ;

б) при  $\tau \gg 1/\omega_0$   $\varphi_z(\tau) \approx \varphi_0$ ;

в) при  $\tau < \pi/\omega_0$   $\varphi_z(\tau) < \varphi_0$ .

В соответствии с теорией о достоверном содержании информации в дискретизированном сигнале сечения  $\tau_i$  аналогового сигнала  $e(t)$  должны удовлетворять условию  $\tau_i < T_B/2$ , где  $T_B = 2\pi\omega_B$ . В нашем случае  $\tau_i = \tau$ ,  $\omega_B = \omega_0$ ,  $T_0 = 2\pi\omega_0$ . Отсюда  $\tau < T_0/2 = \frac{\pi}{\omega_0}$ .

Следовательно, для оценки погрешности при определении фазы спектральной составляющей с частотой  $\omega = \omega_0$  аппроксимированного на интервале  $\tau$  по табулированным значениям сигнала  $U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  может быть только случай в. Оценку указанной погрешности определяем по следующей формуле [235–237]:

$$\Delta\varphi = |\varphi_0 - \varphi_z|,$$

где  $\varphi_0$  – фаза спектральной составляющей с частотой  $\omega = \omega_0$  аппроксимированного на интервале  $\tau$  по табуляграмме сигнала  $U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ .

Предварительный анализ значений погрешности показал, что  $\Delta\varphi$  зависит от  $\varphi_0$  и имеет экстремумы в окрестности  $\varphi_0 = \pi/4 \pm k(\pi/2)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . При  $\varphi_0 = \pi/2 \pm k(\pi/2)$  зависимость (8.47) преобразуется:

$$\varphi_z = \varphi(\omega_0) = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\omega_0 \tau - \sin(\omega_0 \tau)}{\omega_0 \tau + \sin(\omega_0 \tau)} \right\}.$$

Все проведенные расчеты и их анализ показали, что для практического использования рассмотренной оценки погрешности в области измерений параметров фазового спектра при различной аппроксимации сигнала на интервале  $\tau$  достаточно ограничиться полиномами третьей степени.

### **8.6.6. Совокупность информационных признаков построения томографических образов с использованием рассеянного просветного акустического поля**

В том случае, когда в спектре хаотического сигнала имеется одна ярко выраженная частота, фаза  $\varphi(t)$  хаотического сигнала фактически является фазой, ассоциированной с этой основной частотой, при этом основная частота и частота хаотического сигнала в формуле (8.48) должны совпадать.

В случае, когда в спектре нет доминирующей частотной компоненты, фаза хаотического сигнала  $\varphi(t)$  не может адекватно описывать динамику системы. Для подобных ситуаций было предложено использовать семейство фаз  $\varphi_s(t)$ , вводимое с помощью непрерывного вейвлетного преобразования, при этом каждая из фаз  $\varphi_s(t)$  ассоциирована со своим временным масштабом. Явление фазовой синхронизации проявляется как синхронное поведение фаз связанных хаотических осцилляторов на определенных временных масштабах  $s$ , которые являются синхронизованными:

$$|\varphi_{s1}(t) - \varphi_{s2}(t)| < \text{const.} \quad (8.48)$$

В работах [4-7] показано, что по мере увеличения параметра связи между системами увеличивается диапазон синхронизованных масштабов до тех пор, пока все временные масштабы не будут синхронизованы. Это соответствует установлению режима лаг-синхронизации, когда состояния взаимодействующих осцилляторов оказываются сдвинутыми во времени относительно друг друга  $x_1(t - \tau) \approx x_1(t)$ . Дальнейшее увеличение параметра связи ведет к уменьшению временного запаздывания  $\tau$ . Осцилляторы стремятся к режиму полной синхронизации  $x_1(t) \approx x_1(t)$ , вследствие чего разность фаз  $|\varphi_{s1}(t) - \varphi_{s2}(t)|$  стремится к нулю для всех временных масштабов.

Введенное с помощью вейвлетного преобразования семейство фаз хаотического сигнала позволяет эффективно выявлять режим фазовой синхронизации связанных осцилляторов. Непрерывное вейвлетное преобразование обладает более слабым разрешением в частотном диапазоне, чем преобразование Фурье. Вейвлетное преобразование «сглаживает» Фурье-спектр. Динамику временного масштаба  $s$  определяет не только спектральная составляющая Фурье-спектра, но и соседние частотные компоненты, при этом степень их влияния определяется как расположением этих компонент в Фурье-спектре, так и их интенсивностью. Таким образом, связанные хаотические осцилляторы синхронизованы на временном масштабе  $s$  вейвлетного спектра; из этого факта еще не следует, что соответствующие частотные компоненты Фурье-спектра рассматриваемых систем также синхронизованы.

Пусть  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  – временные реализации, порождаемые первым и вторым связанными хаотическими осцилляторами. Фурье-спектры соответствующих колебаний будут определяться соотношением

$$S_{1,2}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_{1,2}(t) e^{-i2\pi ft} dt. \quad (8.49)$$

Соответственно для каждой спектральной компоненты  $f$  Фурье-спектра  $S(f)$  может быть введена в рассмотрение мгновенная фаза  $\varphi_f(t) = \varphi_{f0} + 2\pi ft$ . В силу того, что фаза  $\varphi_f(t)$ , соответствующая частоте  $f$  Фурье-спектра  $S(f)$ , линейно растет с течением времени, разность фаз взаимодействующих осцилляторов для этой частоты  $\varphi_{f1}(t) - \varphi_{f2}(t) = \varphi_{f01} - \varphi_{f02}$  оказывается всегда ограниченной, следовательно, условие захвата фаз представляемое, как

$$|\varphi_1(t) - \varphi_2(t)| < \text{const},$$

для определения режима фазовой синхронизации, в данном случае оказывается бесполезным. Очевидно, что критерий синхронизации связанных осцилляторов на частотной составляющей  $f$  должен быть иным.

Поскольку в режиме лаг-синхронизации поведение взаимодействующих осцилляторов оказывается синхронизованным на всех временных масштабах  $s$  вейвлетного преобразования, следует ожидать, что и все частотные компоненты Фурье-спектров рассматриваемых систем тоже должны быть синхронизованными. В этом случае  $x_1(t - \tau) \approx x_1(t)$ , и, следовательно, с учетом выражения (8.49) должно выполняться соотношение  $S_2(f) \approx S_1(f)e^{i2\pi\tau f}$ . Поэтому в том случае, когда два связанных хаотических осциллятора находятся в режиме лаг-синхронизации, их мгновенные фазы, соответствующие спектральной компоненте  $f$  Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$ , будут связаны между собой как  $\varphi_{f2}(t) \approx \varphi_{f1}(t) + 2\pi\tau f$ , а следовательно, разность фаз  $|\varphi_1(t) - \varphi_2(t)|$  должна подчиняться соотношению

$$\Delta\varphi_f = |\varphi_1(t) - \varphi_2(t)| = 2\pi\tau f.$$

Таким образом, на вертикальной плоскости сечения возмущенной области  $(\Delta\varphi_f, f)$  точки, отвечающие разности фаз спектральных компонент хаотических осцилляторов, находящихся в режиме лаг-синхронизации, должны располагаться вдоль прямой, имеющей угловой коэффициент  $k = 2\pi\tau$ .

Известно, что при разрушении режима лаг-синхронизации (например, с уменьшением параметра связи между осцилляторами) и переходе систем в режим фазовой синхронизации часть временных масштабов  $s$  вейвлетных спектров выходит из синхронизма [4-7]. Соответственно можно ожидать, что и часть спектральных компонент Фурье-спектров в режиме фазовой синхронизации также будет рассинхронизирована, что будет проявляться в отклонении точек на плоскости  $(\Delta\varphi_f, f)$  от прямой линии. При этом разумно полагать, что в первую очередь будут выходить из синхронизма те спектральные компоненты, на долю которых приходится малая доля энергии, тогда как спектральные компоненты в Фурье-спектрах, характеризующиеся большей долей энергии, будут оставаться синхронизованными и соответствующие им точки на плоскости  $(\Delta\varphi_f, f)$  будут по-прежнему располагаться вдоль прямой линии. По мере дальнейшего уменьшения параметра связи все большая часть спектральных компонент будет выходить из состояния синхронизма, но до тех пор, пока наиболее «энергетические» компоненты будут синхронизованы. Связанные системы будут демонстрировать режим фазовой синхронизации. Введем в рассмотрение количественную характеристику, определяющую число спектральных компонент Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$ , находящихся в режиме синхронизма [4-227]:

$$\sigma_L = \frac{\int_0^{-\infty} H(S_1(f) - L)H(S_2(f) - L)(\Delta\varphi_{f_i} - 2\pi\tau f_i)^2 df}{\int_0^{-\infty} H(S_1(f) - L)H(S_2(f) - L)df}, \quad (8.50)$$



где  $H$  – функция Хевисайда;  $L$  – пороговый уровень мощности (измеряемый в децибелах), начиная с которого учитываются спектральные компоненты;  $\tau$  определяется временным сдвигом частотной компоненты  $f_m$  спектров  $S_{1,2}(f)$ , характеризующейся наибольшим значением энергии;  $\tau = (\varphi_{f_m 2} - \varphi_{f_m 1}) / (2\pi f_m)$ ;  $\sigma_L$  является мерой степени фазовой синхронизации. Величина  $\sigma_L$  стремится к нулю в режимах полной и лаг-синхронизации. В режиме фазовой синхронизации величина  $\sigma_L$  увеличивается по мере того, как выходят из синхронизма спектральные компоненты Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  взаимодействующих осцилляторов.

При обработке реальных данных приходится иметь дело с дискретными временными рядами конечной длины, поэтому вместо непрерывного Фурье-преобразования (8.49) необходимо использовать его дискретный аналог, а вместо интеграла (8.50) использовать сумму

$$\sigma_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\varphi_{f_i} - 2\pi\tau f_i)^2, \quad (8.51)$$

где суммирование ведется по всем спектральным компонентам Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$ , уровень мощности которых превышает  $L$ .

При вычислении  $\sigma_L$  целесообразно провести усреднение по набору временных реализаций. Проводя такие вычисления над дискретно измеренными оптимизированными совокупностями просветных сигналов, принятых на горизонтально-разнесенные приемники, можно получить объемные фигуры реконструированных возмущений морской среды по результатам воздействия на нее движущегося подводного объекта. Для иллюстрации данного вывода, по результатам экспериментальных исследований и численного моделирования, на рис. 8.6 и рис. 8.7 приведены объемные фигуры возмущенной области в мелком море.

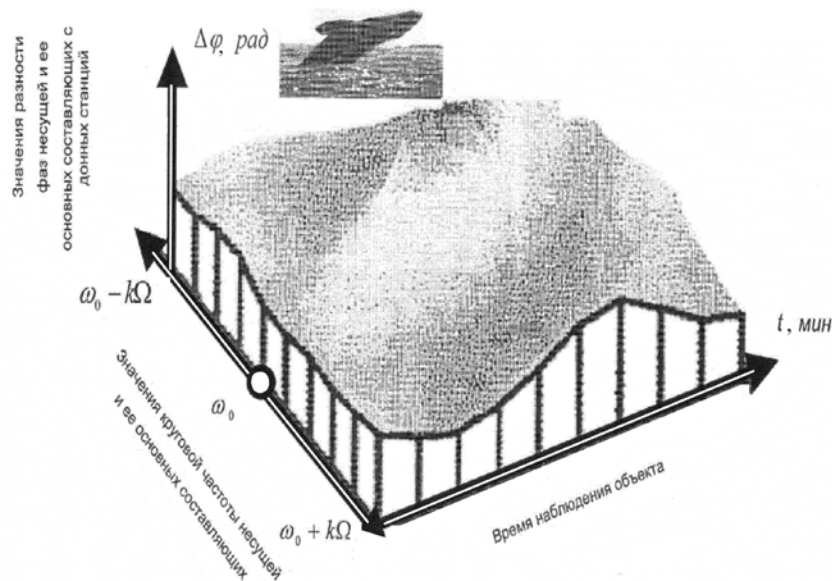


Рис. 8.6. Результаты пространственной реконструкции возмущений водной среды акустико-механическими воздействиями на нее биологических объектов

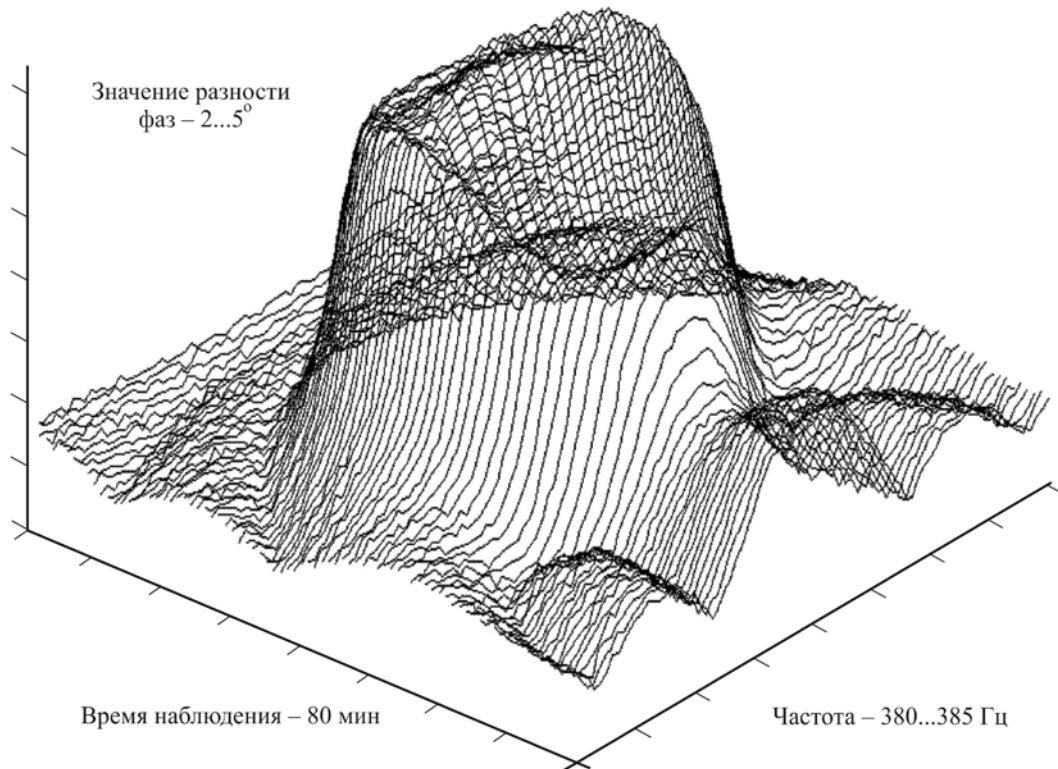


Рис. 8.7. Результаты численного моделирования процесса реконструкции возмущений водной среды от движущегося подводного объекта

Проиллюстрируем все вышесказанное на примере двух связанных систем Ресслера, находящихся в режиме винтового хаоса:

$$\dot{x}_{1,2} = -\omega_{1,2}y_{1,2} - z_{1,2} + \varepsilon(x_{2,1} - x_{1,2}),$$

$$\dot{y}_{1,2} = \omega_{1,2}x_{1,2} + a_{1,2} + \varepsilon(y_{2,1} - y_{1,2}),$$

$$\dot{z}_{1,2} = p + z_{1,2}(x_{1,2} - c),$$

где  $\varepsilon$  – параметр связи;  $\omega_1 = 0,48$ ,  $\omega_2 = 1,03$ .

Значения управляющих параметров были выбраны следующими:  $a = 0,22$ ,  $p = 0,1$ ,  $c = 8,5$ . При величине параметра связи  $\varepsilon = 0,05$  две связанные системы Ресслера находятся в режиме фазовой синхронизации. При величине значения параметра связи  $\varepsilon = 0,15$  рассматриваемые системы демонстрируют режим лаг-синхронизации [4-7].

На рис. 8.8, а показана зависимость величины  $\sigma_L$  от значения параметра связи  $\varepsilon$ . Видно, что с увеличением связи  $\sigma_L$  стремится к нулю, что свидетельствует об установлении в рассматриваемой системе режима лаг-синхронизации. Рис. 8.8, б соответствует случаю слабой фазовой синхронизации, когда этот режим только возник ( $\varepsilon = 0,05$ ). Рис. 8.8, в, г иллюстрирует достаточно сильную фазовую синхронизацию ( $\varepsilon = 0,08$  и  $\varepsilon = 0,1$  соответственно), а рис. 8.8, д – режим лаг-синхронизации, когда все спектральные компоненты синхронизированы ( $\varepsilon = 0,15$ ).

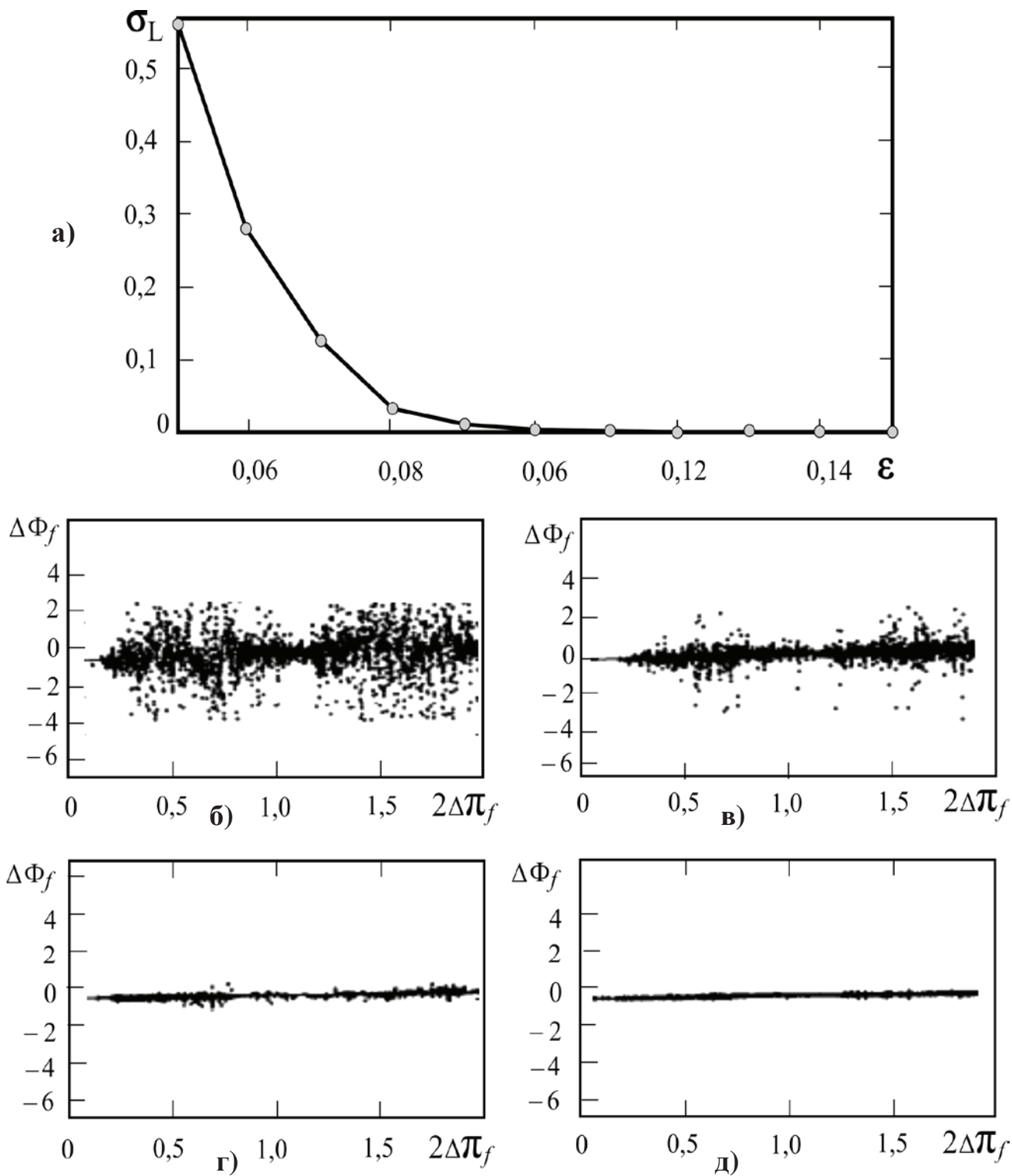


Рис. 8.8. Зависимость величины  $\sigma_L$  от значения параметра связи  $\epsilon$  и разность фаз  $\Delta\Phi_i$  для различных частотных компонент Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  связанных систем Ресслера (длина временной реализации  $x(t)$  составляла 2000 единиц безразмерного времени, шаг дискретизации  $h = 0,2$ . Усреднение проводилось по 150 временным реализациям. Уровень мощности  $L = -40$  dB)

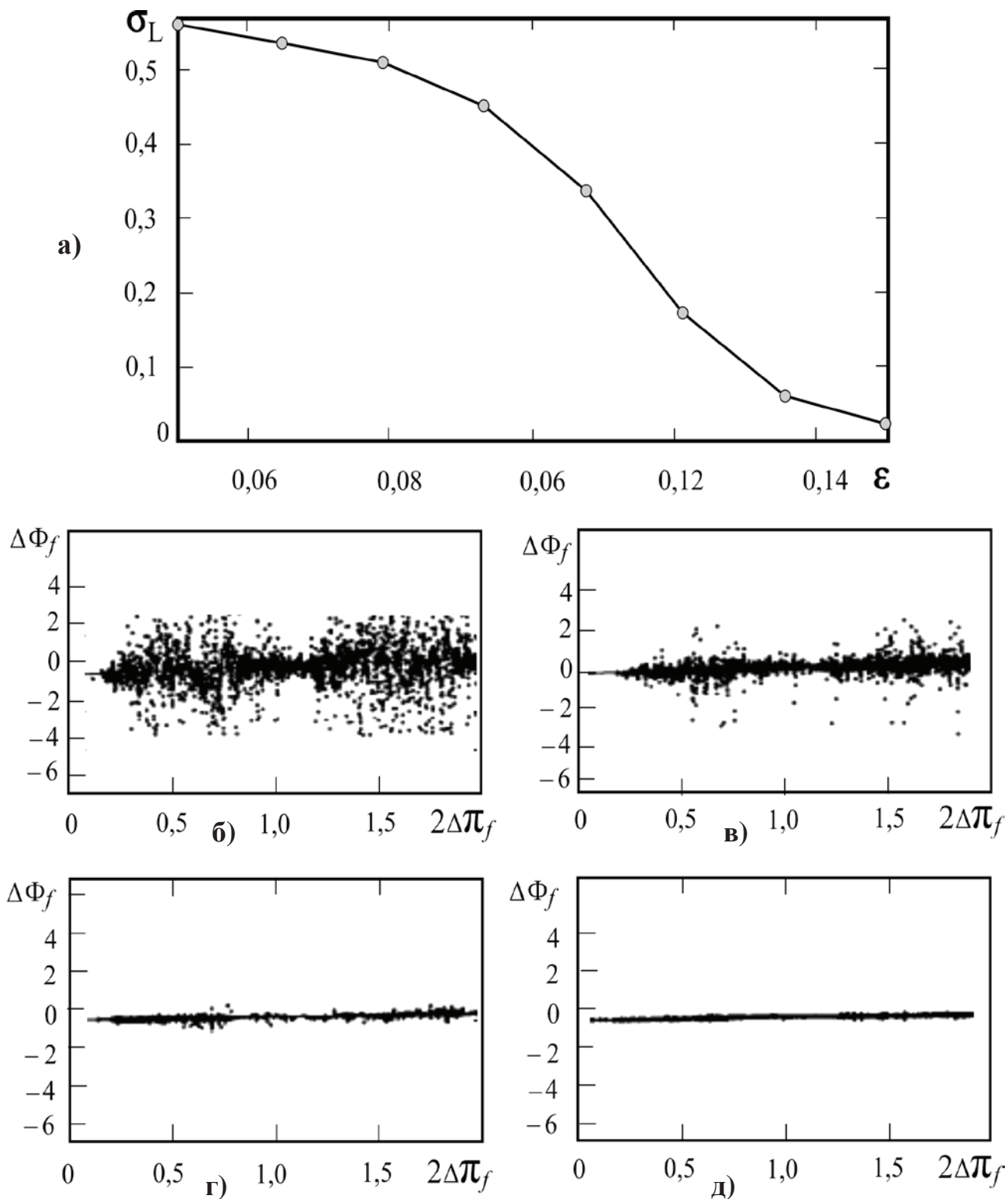


Рис. 8.9. Зависимость величины  $\sigma_L$  от величины уровня мощности  $L$ , начиная с которого учитываются спектральные компоненты при определении  $\sigma_L$ , и разность фаз  $\Delta\Phi_i$  для различных частотных компонент  $f$  Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  связанных систем Ресслера

Рис. 8.8 б–д иллюстрирует возрастание числа синхронизованных спектральных компонент Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  с увеличением параметра связи.

Важным представляется также вопрос о том, какие спектральные компоненты Фурье-спектров взаимодействующих хаотических осцилляторов синхронизируются первыми, а какие – в последнюю очередь. На рис. 8.9, а для значения управляющего параметра  $\varepsilon = 0,05$ , когда в системе реализуется режим фазовой синхронизации, приведена зависимость величины  $\sigma_L$  от уровня мощности  $L$ , начиная с которого учитываются спектральные компоненты  $f_i$  Фурье-спектров  $S_{1,2}(f)$  в соотношении (8.51). Видно, что по мере «отсечения» частотных компонент, обладающих малой долей энергии, величина  $\sigma_L$  уменьшается. Рис. 8.9, б–д иллюстрирует распределение разности фаз  $\Delta\varphi_f$  спектральных компонент  $f$ , мощность которых превышает заданный уровень  $L$ :  $L = 40$  dB (см. рис. 8.9, б);  $L = 30$  dB (см. рис. 8.9, в);  $L = 20$  dB (см. рис. 8.9, г);  $L = 10$  dB (см. рис. 8.9, д). Рис. 8.9 свидетельствует о том, что наиболее интенсивные спектральные компоненты при проявлении режима фазовой синхронизации восстанавливаются в первую очередь, и наоборот, при разрушении режима лаг-синхронизации первыми выходят из синхронизма спектральные компоненты, на которые приходится малая доля энергии колебаний.

### **8.7. Просветный метод гидролокации в решении задач томографического контроля характеристик полей морской среды**

Практическая возможность томографического наблюдения пространственно-временных характеристик гидрофизических полей морской среды в условиях протяженного гидроакустического канала распространения волн широко исследовалась и представлена в работах [3-7].

Ввиду нетрадиционности построения системы контроля среды нетрадиционно измеряются и представляются пространственные (томографические) образы регистрируемых объектов, а именно измеряются спектральные (или статистические) характеристики флуктуаций амплитуды и фазы просветных сигналов, обусловленные модуляцией, а также параметрическим преобразованием сигналов, движущимся объектом и его полями (акустическими, электромагнитными и гидродинамическими).

Известные методы акустической томографии являются высокочастотными и многопозиционными. Их использование для мониторинга морской среды сдерживается практическими трудностями измерения большого количества проекций и получения набора данных, необходимых для их обращения, при ограниченном количестве используемых датчиков. Просветный метод гидролокации основан на использовании закономерностей рассеяния и параметрического преобразования низкочастотных просветных сигналов пространственно-развитыми нелинейными областями неоднородностей среды технического и естественного происхождения. Применение в методе пространственно-частотной обработки просветных сигналов близко по идее к методу визуализации, используемому в рентгеновской томографии, что делает его эффективным акустическим инструментом мониторинга структуры и характеристик морской среды, но это предполагает необходимость разработки новых решений [ 1, 2, 30, 31].

Противоречие между потенциальными возможностями акустического мониторинга и уровнем их реализации в существующих системах исследования морской среды устраняется за счет использования пространственного распределения возмущений морской среды объектами при минимальном количестве датчиков (преобразователей).

Реализация предлагаемого метода основана на пространственно-временной обработке просветных сигналов и выделении признаков их преобразования динамическими неоднородностями среды с последующим восстановлением измеряемых возмущений [3, 4, 7].

Для решения этой задачи обосновываются:

– модель просветного сигнала, учитывающая временную изменчивость неоднородностей среды, на основе которой решается обратная задача восстановления пространственного распределения возмущений; уточняется область ее применимости;

– двусторонний просветный метод реконструкции пространственного распределения динамических возмущений среды, позволяющий также определять место объекта на акватории.

Известно, что решение прямой задачи теории рассеяния изменяющихся во времени и пространстве неоднородностей в первом приближении аналогично методу малых возмущений. Однако в данной модели рассеиваемое неоднородностями акустическое поле выражается через поле первичной волны. Это приближение аналогично условию однократного рассеяния. Границы его применимости определяются интенсивностью флуктуаций и размерами рассеивающих областей:

$$L_{\max} \ll (\rho, \sigma)^{-1},$$

где  $\rho$  – плотность рассеивателей в используемом объекте;  $\sigma$  – полный поперечник рассеяния неоднородностей.

Данное условие ограничивает пространственный диапазон применимости приближения Броуна. Более предпочтительным для построения модели сигнала является метод плавных возмущений (приближение Рытова), который учитывает многократное рассеяние (вперед) и поэтому не ограничен размерами исследуемой области. Адекватность применения приближения Рытова для гидроакустики, а также атмосферной акустики и его преимущества перед известным рассеянием по модели Борна подтверждены многочисленными экспериментальными исследованиями. Значительные пространственные размеры возмущений (например, кильватерных следов или биологических скоплений) позволяют обеспечить выполнение основного условия применимости метода Рытова, заключающегося в том, что размеры неоднородностей велики по сравнению с длиной волны. Следствием этого условия является то, что рассеянные волны распространяются в основном вперед, и волна, отраженная от неоднородностей среды, значительно слабее по сравнению с падающей волной. При этом модели сигналов, построенные методом плавных возмущений, предполагают, что рассеивающие неоднородности не изменяются во времени и пространстве. Показано, что медленно изменяющаяся комплексная амплитуда рассеянного поля  $U_1$  связана с волновым полем  $\psi$  следующей зависимостью:

$$\psi(x_n, q, t) = A \exp[-j\omega_0(t - t_n / C_0)] \exp[U_1(x_n, q, t)].$$

Для динамического диапазона она имеет вид

$$U_1(x, q, t) = \frac{k_0^2}{4\pi} \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varepsilon(x_1, q_1, t - (x - x_1)/C_0) \exp\left(\frac{jk_0(q - q_1)^2}{2(x - x_1)}\right) dq_1 dx_1, \quad (8.52)$$

где  $q = (y, z)$ ;  $\varepsilon(r, t) = (C_0/C(r, t))^2 - 1$  – функция флуктуации квадрата акустического показателя преломления в рассеивающем объеме ( $r = (x, y, z)$ ).

Выражение (8.52) получено для первичной монохроматической плоской волны, распространяющейся вдоль оси  $X$  в предположении выполнения следующих условий:

$$\frac{1}{k_0} |\Delta U_1| \ll 1; \quad (8.53)$$

$$\frac{1}{w_0} \left| \frac{\partial U_1}{\partial t} \right| \ll 1; \quad (8.54)$$

$$\frac{1}{w_0^2} \left| \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} \right| \ll 1. \quad (8.55)$$

Эти условия означают, что изменение фазы и относительное изменение амплитуды результирующей волны, вызванные динамическими неоднородностями, должны быть малы на расстояниях, соответствующих длине волны  $\lambda_0 = 2\pi/k_0$  и времени порядка ее периода  $T_0 = 2\pi/w_0$ . На полное изменение фазы и амплитуды (на величину  $U_1$ ) соотношения (8.53 – 8.55) ограничения не накладывают. Это означает, что на больших расстояниях от границы неоднородной среды могут накопиться и значительные изменения  $U_1$ , но для этого требуется достаточная плавность таких изменений – их малость по крайней мере на протяжении длины волны, как в пространстве, так и во времени (за период). Данные условия выполняются при ограниченности пространственно-временного спектра  $T(k, w)$  возмущений  $\varepsilon(r, t)$ :

$$T(r, t) = 0 \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} |k| > k_{\max} \ll k_0 \\ |w| > w_{\max} < C_0 k_{\max} \ll w_0 \end{array} \right\}.$$

Соотношение (8.52) является основополагающим в теоретическом обосновании двустороннего просветного метода реконструкции пространственного распределения динамических неоднородностей. Метод основан на использовании информации о пространственно-временной изменчивости неоднородностей, содержащихся в рассеянных компонентах двух одновременно распространяющихся навстречу друг другу просветных сигналов. Суть варианта двустороннего просветного метода состоит в создании в исследуемой области двух монохроматических волн, распространяющихся навстречу друг другу, и последующем измерении взаимокорреляционной функции комплексных огибающих

сигналов, принятых с противоположных сторон относительно центра области. Геометрия измерения для двухстороннего просветного метода показана на рис. 8.10. Когда точки приема размещены в зоне фраунгоферовой дифракции относительно исследуемой неоднородности, взаимокорреляционная функция комплексных огибающих рассеянных сигналов с точностью до констант равна преобразованию Радона, по прямой линии  $r = c\tau/2$ , т.е. она соответствует проекции среднего квадрата флуктуаций акустического показателя преломления  $\langle \varepsilon^2(r) \rangle$  на направление от источника к приемнику:

$$R(\tau) = B + C \int_M \langle \varepsilon^2(r_1) \rangle \delta(x_1 - c\tau/2) dr_1, \text{ где } B, C - \text{const.}$$

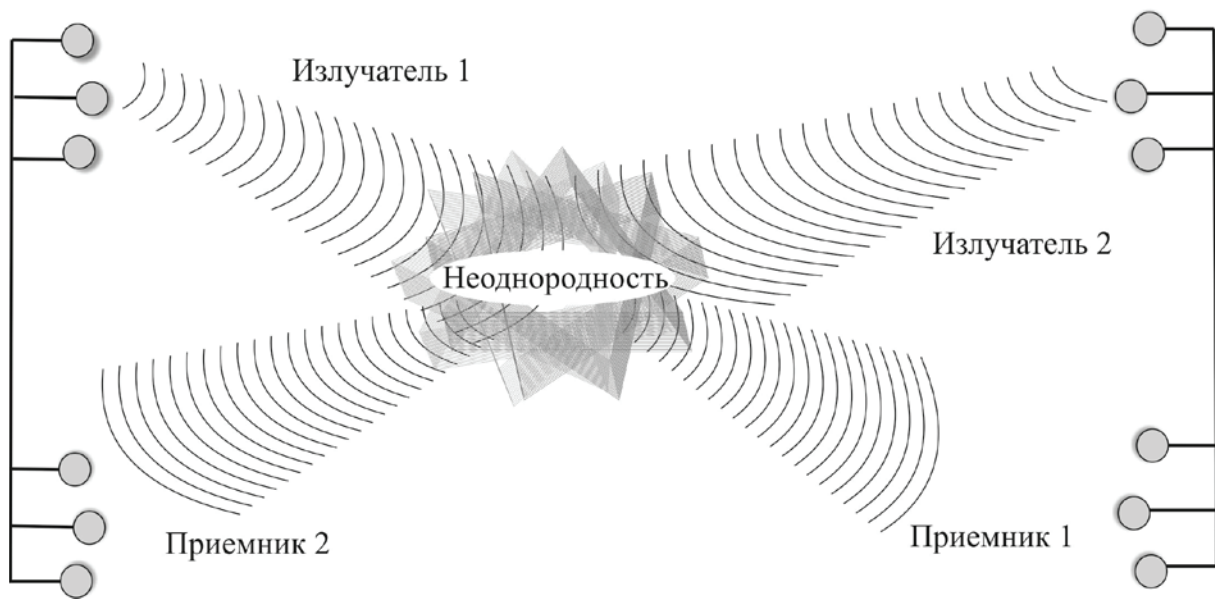


Рис. 8.10. Схема измерений в двухстороннем просветном методе гидролокации

Порядок работы двусторонней просветной томографической системы заключается в следующем. Измерительная система, состоящая из двух и более излучателей монохроматического сигнала и соответственно двух и более приемников, позволяет без изменения частоты зондирующего сигнала измерять множество точек, расположенных на прямой линии в пространстве проекций. Количество независимых отсчетов определяется отношением размера исследуемой области к интервалу корреляции возмущений. Набор проекционных данных, достаточный для реконструкции функции  $\langle \varepsilon^2(r) \rangle$ , предполагает их измерение с помощью излучателей и приемников, расположенных по периметру освещаемого района или исследуемого объекта. Рассеянные сигналы, а также сигналы шумоизлучения объектов, накладываясь на проходящие просветные, модулируют их и впоследствии выделяются в приемных трактах системы контроля [3, 4].

Рассматриваемый метод обнаружения отличается от известных тем, что операции измерений параметров объекта проводят по линиям, проходящим через геометрический центр объекта и соответствующим равным проекционным углам. При наличии таких разрезов акустическое изображение среды может быть реконструировано стандартными алгоритмами восстановления, используемыми в известных решениях томографии. Пренебрегая поперечными размерами рассматриваемой области по сравнению с длиной



акустической трассы, интегрирование в выражении (8.52) может быть проведено по прямой линии, соединяющей источник и приемник. Соответственно, взаимокорреляционная функция комплексных огибающих рассеянных сигналов, принятых на противоположных границах акустической трассы, будет с точностью до константы соответствовать пространственному разрезу весовой функции неоднородностей по прямой линии, соединяющей точки излучения-приема сигналов:

$$R(\tau) = B + C \langle \varepsilon^2(c\tau/2) \rangle.$$

Создавая в исследуемой области две монохроматические волны, распространяющиеся навстречу друг другу, и вычисляя взаимокорреляционную функцию комплексных огибающих сигналов, принятых с противоположных сторон акустической трассы, получим пространственное распределение дисперсии акустического показателя вдоль трассы. Так решается задача способа измерения проекций акустических картин среды, существенно повышающего объем выборки проекционных данных при ограниченном количестве датчиков, и соответственно метода восстановления пространственного распределения неоднородностей, изменяющихся во времени и пространстве.

Реконструкция пространственного распределения неоднородностей вдоль акустической трассы двусторонним просветным методом предполагает вычисление взаимокорреляционных функций преобразованных сигналов. Математическая задача сводится к выбору частотной характеристики предкорреляционного фильтра. Теоретически доказано, что передаточная характеристика предкорреляционного фильтра вида  $h(f)$  совпадает с передаточной характеристикой фильтра Эккарта:

$$|h(f)|^2 = \frac{S(f)}{N^2(f)},$$

где  $N(f)$  и  $S(f)$  – энергетические спектры помехи и сигнала.

Исходя из этого оптимальная структура приемных трактов двусторонней просветной системы должна включать два фильтра Эккарта, выходы которых соединены со входом коррелятора. При реализации алгоритма восстановления томографической информации за один цикл обработки с временем интегрирования  $T$  получается один кадр сцены. За время наблюдения  $t$  будем иметь  $K = t/T$  кадров. Если кадры энергетически накапливать, то увеличивается помехоустойчивость системы обработки, что можно количественно учесть введением множителя  $K$  для обобщенного отношения сигнал/помеха. Поскольку сигналы, рассеянные возмущениями морской среды, являются достаточно узкополосными, то можно заменить частотно-зависимые величины  $S(f)$  и  $N(f)$  их средними значениями в полосе принимаемого сигнала  $\Delta f$ . При этом обобщенное отношение сигнал/помеха для оптимальной статистики может быть представлено в виде

$$d^2 = \frac{T \Delta f K S^2}{2 N^2}.$$

Проведенным анализом показано следующее. Двусторонний подход реконструкции пространственного распределения динамических неоднородностей среды позволяет измерять характеристики неоднородностей просветными акустическими линиями при ог-

раниченном количестве преобразователей. Обязательными блоками приемных трактов просветных систем при измерении корреляционных функций являются фильтры Эккарта, с выходов которых сигналы подаются на вход коррелятора.

К настоящему времени проведены морские испытания низкочастотного просветного метода на акустических трассах различной протяженности (десятки-сотни километров). Неоднородности среды и подводные возмущения (кильватерные следы судов, косяки рыб) эффективно регистрируются, как по признакам рассеяния просветных сигналов, так и по закономерностям их параметрического преобразования полями объектов различной физической природы. Для реализации двустороннего варианта просветных систем мониторинга среды на данном этапе исследований проведено только его теоретическое обоснование и отработка алгоритмов восстановления пространственных характеристик полей.

*В восьмой главе:*

– проведен анализ известных акустических методов построения томографических образов объектов;

– для просветных гидроакустических систем мониторинга гидрофизических полей представлен метод формирования информационных признаков и построения образов объектов на основе пространственно-временных характеристик фазовых спектров измеряемых полей и алгоритма синхронизации спектральных компонент сигналов.

Первым анализируется энергетический спектр сигнала, принятого на ближний от излучателя приемник. На основании этого спектра вырабатываются показатели для каждой спектральной компоненты по пределам изменения мгновенной фазы и частотного интервала, в котором она может находиться. Далее путем подбора вырабатывается семейство фаз ветвленного динамического распределения, при этом каждая из фаз ассоциирована со своим фазовым и частотным масштабом. Вся эта динамика затем сравнивается с фазовым спектром дальней (ведомой) системы. Из всего многообразия спектральных компонент фазового спектра данной системы берутся только те, которые попадают в свой фазовый и частотный масштаб. Полученные фазовые спектры сравниваются, и определяется разность фаз. Исходя из результатов выполненных исследований, можно сформулировать следующее.

Реализация принципов акустической томографии гидрофизических полей объектов и среды в протяженных просветных системах мониторинга может быть выполнена с использованием сложных просветных сигналов, представляющих собой посылки с бинарной M-последовательностью, а так же алгоритма синхронизации их спектральных компонент.

Рассмотренная обработка сигналов является достаточно информационно емкой и помехоустойчивой, но ее реализация в излучающих и приемных трактах протяженных систем мониторинга связана с известными техническими трудностями. В этой связи следует отметить, что в условиях интенсивных помех среды и нестабильности характеристик океанического канала распространения волн в просветных системах мониторинга достаточно эффективным и реализуемым путем может быть томографическое наблюдение пространственно-временных характеристик и динамики спектров информационных полей, измеряемых параметрическим просветным методом гидролокации, что подтверждено экспериментально в морских условиях и представлено в настоящей монографии [3-7].

## **9. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПУТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

### **9.1. Историческая справка о сейсмических исследованиях на акваториях Дальневосточных морей**

В разделе проводится обобщение и анализ многолетних сейсмоакустических исследований в районе Охотского моря, а также в северо-западной части Тихого океана на акваториях, прилегающих к восточному побережью Камчатки и островов Курильской островной гряды. В него вошли материалы многолетних измерений сейсмических, гидроакустических и электромагнитных полей предвестников землетрясений. На основании результатов наблюдений разработаны методические предложения по измерению гидрофизических полей предвестников и прогнозированию землетрясений. Проведено обоснование практических путей построения комплексной системы измерения и предупреждения о вступлении сильных землетрясений. Комплексная система должна войти, как составная часть, в обобщенную радиогидроакустическую систему мониторинга гидрофизических и геофизических полей источников и явлений, а также освещения морской обстановки на акваториях Дальневосточного Региона.

В результате многолетних сейсмических наблюдений замечено, что основное количество землетрясений, как и общая интенсивность сейсмической активности земной коры, в основном, происходит в условно разделяемых переходных зонах, в которых отмечается достаточно резкое изменение толщины земной коры. При этом к зонам перехода первого типа принято относить переходы в системе "атмосфера-океан-континент". Зонами перехода второго типа принято считать переходы в системе "атмосфера-континент - горы". Таким образом, получается, что атмосфера в процессе взаимодействия рассматриваемых систем играет, как бы, второстепенную роль. Однако детальный анализ поведения этих систем позволяет судить о том, что именно атмосфера в силу своей определяющей энергоемкости играет в них основную роль. Т.е. она непосредственно формирует энергию источников сейсмических процессов. Такой вывод подтверждается результатами исследований ученых Дальнего Востока (ТОИ ДВО РАН), а также ИРЭ РАН и ИФЗ РАН. Исследования последних десятилетий проводились с использованием лазерных деформографов. Исследованиями было показано, что в переходных зонах морского дна существует постоянный фон собственных колебаний земли (в виде тонов и обертонов), а также СНЧ колебания, расположенные между собственными колебаниями Земли и приливными гармоническими волнами [246,247, 251]. В этой связи, не следует забывать о таком эффективном проявлении более интенсивных сейсмических процессов Земли, которые сопровождаются формированием низкочастотных электромагнитных волн аналогичной частоты [235,236,238]. Такие волны достаточно интенсивно проявляются не только в прилегающем магнитном поле Земли, но также и в ионосфере. Совокупность проявления этих волн является предметом исследований и анализа настоящей работы с точки зрения прогнозирования момента и координат вступления сильных землетрясений [244-249]. В частности, в работе подробно рассматриваются эксперименты по формированию:

– внутренних волн, как предвестников сильных землетрясений за время прохождения полного синоптического цикла в переходной зоне Охотского и Японского морей [243, 244];

– низкочастотных акустических Т-волн, порождаемых землетрясениями, с их последующей регистрацией гидроакустическими системами после разворота на акваториях шельфовых зон [239];

– низкочастотных электромагнитных волн, возбуждаемых земной поверхностью и фокусируемых в определенной точке атмосферы, что позволяет определять момент и место возбужденного участка земной поверхности, проводить оповещение населения и прибрежных объектов с упреждением и повышенной вероятностью [235, 242, 250, 251].

В работе рассматривается также возможность комплексной регистрации признаков этих колебаний, обосновываются принципы создания региональной системы сейсмического наблюдения и оповещения. Принципы создания такой системы сформулированы на основании результатов теоретических исследований и экспериментальных наблюдений поведения сейсмической активности земной коры при воздействии на нее распределенной атмосферной нагрузкой продолжительной длительности. Дальневосточными учеными было получено решение бигармонического уравнения, представляющего процесс механического изгиба неограниченной по площади земной плиты, сделана попытка оценки толщины ее слоя, вовлекаемой в колебание изгиба земной коры. Решение уравнения изгибных колебаний неограниченной земной коры получено в работе Г.Н. Батюшкина [251]. Это уравнение вычислено в цилиндрических координатах применительно к смещению пластины  $W(r,t)$  в течение длительного (относительно формируемых волн) времени  $t = T$ .

$$\frac{\mu}{D} \frac{\partial^2 W(r,t)}{\partial t^2} + \nabla^2 W(r,t) = \frac{q(r)}{D} H(t), \quad (9.1)$$

где  $\mu$  - масса плиты, отнесенная к единице площади;  $H(t) = \eta(t) - \eta(t - T)$  - временная зависимость действия нагрузки;  $\eta(t) = +1$  (при  $t > 0$ ) и  $\eta(t) = 0$  (при  $t < 0$ );  $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$  -

жесткость на изгиб;  $E, \nu$  - модуль Юнга и коэффициент Пуассона;

$$h_0 = \left[ \frac{0,75(1 - \nu^2)}{\pi^2} \right]^{1/4} \cdot \frac{P^{1/2} T^{1/2}}{E^{1/4} \rho^{1/4} W^{1/2}} \quad (9.2)$$

где  $P$  - сила (Н);  $\rho$  - плотность плиты ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $h$  - толщина плиты.

В работе [252] были сделаны вычисления для относительной погрешности  $h_0$ , согласно которым установлено следующее. Для нахождения определения силы давления  $P$ , обеспечивающего заданный изгиб земной плиты в точке расположения деформографа, как измерителя, необходима организация измерений давления во многих точках дуги в круге с центром в месте его расположения. Особенностью таких оценок является то, что из длительных (не менее одних суток) наблюдений, можно выделить характерные измерения и определить их обобщенную длительность  $T$ . Исходя из этого условия, было сделано заключение о том, что толщина рассматриваемого изгибного слоя пластины  $h_0$  может быть определена с погрешностью до 30 % и составлять десятки метров [235, 242, 250, 251].

## 9.2. Широкомасштабные наблюдения синоптических и сейсмических процессов морской среды на просветном поле

В связи с наблюдаемыми проявлениями глобальной динамики климатических процессов в масштабе всей планеты, рассматриваемые исследования гидрофизических полей и возмущений морской среды, порождаемых синоптическими атмосферными явлениями, в настоящее время являются все более актуальными и доступными для широкой реализации. Они проводились на экспериментальной морской базе СКБ САМИ в зимний период времени. Так называемый, широкомасштабный акустический эксперимент готовился и проводился на всероссийском научном уровне, а поэтому достаточно детально обсуждался, тщательно планировался и был проведен с использованием технического и корабельного обеспечения ТОФ. Разработка и оборудование просветной гидроакустической трассы о. Итуруп - мыс Левенорна (о. Сахалин), как измерительного инструмента для исследования гидроакустических и гидрофизических полей, создаваемых атмосферными явлениями, проводились в СКБ САМИ ДВО РАН [1, 2, 78, 80].

Излучающая донная база просветной трассы была установлена на шельфе о. Итуруп. Две горизонтально разнесенные на пять километров приемные донные базы, были установлены на свале глубин мыса Левенорна. Протяженность просветной трассы составляла около 345 км. При проведении эксперимента непрерывно излучались просветные сигналы стабильной частоты 400 Гц, которые принимались приемными базами и регистрировались на береговом посту.

Обработка и анализ материалов исследований закономерностей зарождения и прохождения синоптических и сейсмических процессов с использованием статистической обработки принимаемых просветных сигналов и узкополосного спектрального анализа [1, 2, 251-253, 283-288].

На измерительном полигоне были зарегистрированы синоптические возмущения морской среды при прохождении циклона, которое продолжалось около 12-и часов. Спектральный анализ и статистическая обработка полученных материалов проводились в лабораторных условиях. Непрерывная регистрация просветных сигналов для рассматриваемых исследований проводилась в течение 14 часов. Время наблюдения и контроля гидрофизических возмущений морской среды соответствовало времени синоптического атмосферного циклона от момента его зарождения, усиления до полной штормовой погоды и последующего полного спадания. Скорость ветра в момент шторма достигала 25-30 м/с, волнение моря по данным наблюдений составляло 8-9 баллов. Динамика синоптической (атмосферной) и морской (поверхностной) обстановки с некоторой задержкой порождала гидродинамические возмущения морской среды, которые, в свою очередь, воздействовали на условия распространения просветных акустических сигналов и проявлялись в их амплитудно-фазовой модуляции. Наряду с двухканальной записью гидроакустических сигналов, регистрировался также опорный сигнал аналогичной стабильной частоты.

Исходя из решения задач широкомасштабного синоптического наблюдения, а также современного представления просветного метода гидролокации, как активно-пассивного и параметрического, была проведена специальная обработка экспериментальных материалов.

При обработке записей акустических просветных сигналов измерялись следующие характеристики:

- дисперсии флюктуаций амплитуды и фазы;

- спектры и спектрограммы флуктуаций амплитуды и фазы;
- спектры сигналов нелинейно преобразованных акустическими и гидродинамическими полями объектов и среды.

Результаты эксперимента были обработаны и представлены на рисунках. Спектрограмма гидродинамических возмущений морской среды за весь период наблюдения синоптического процесса представлена на рис. 9.1.

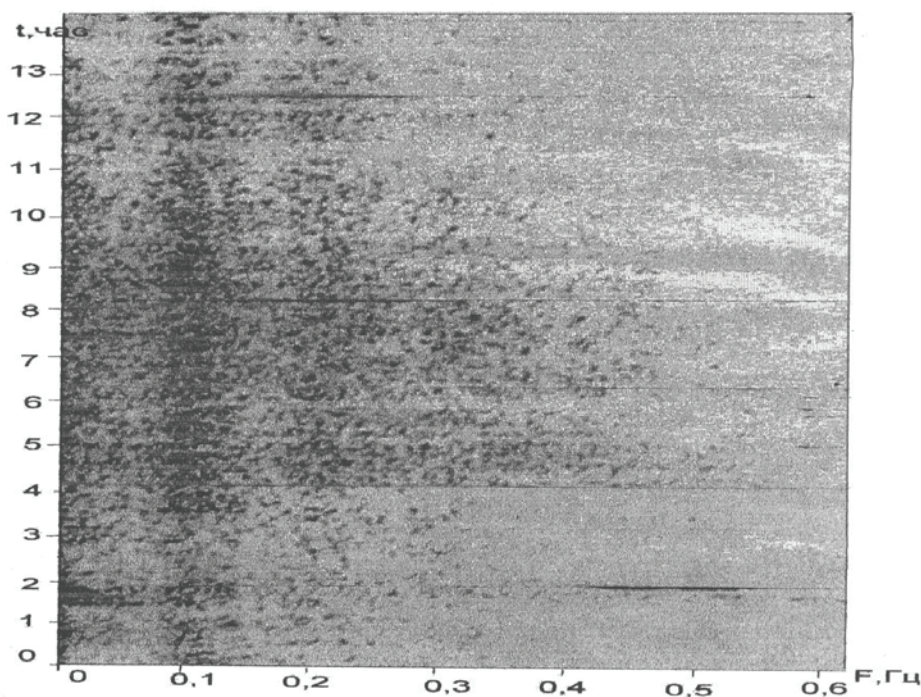


Рис. 9.1. Спектрограмма возмущений морской среды при прохождении циклона

В качестве примера наблюдения динамики гидрофизических полей морской среды, обусловленных синоптическими явлениями, приведен отдельный момент записи дисперсий флуктуаций амплитуды просветных сигналов (рис. 9.2).

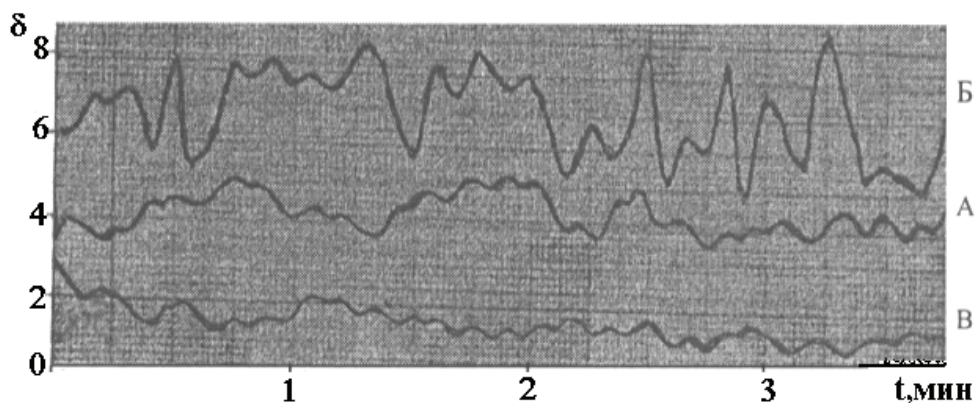


Рис. 9.2. Дисперсия флуктуаций уровня просветного сигнала за время прохождения циклона (А – время нарастания, Б – время максимального проявления, В – штиль)

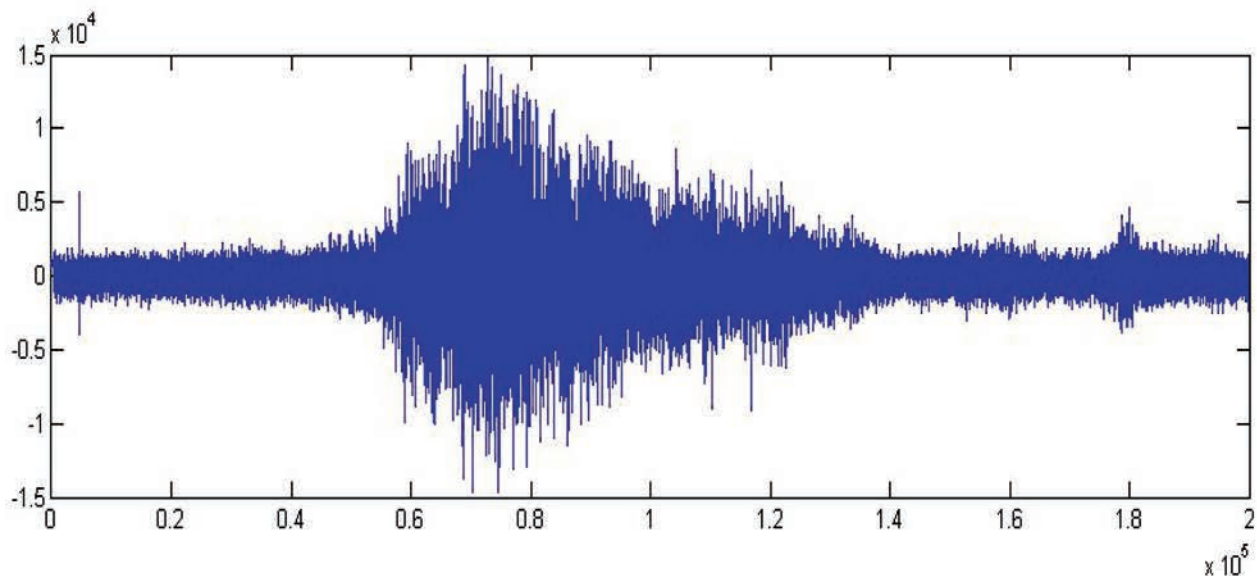


Рис. 9.3. Гидроакустический сигнал землетрясения

Измерение спектров и спектрограмм в инфра низкочастотном диапазоне (0 – 1.0 Гц) выполнялось в реальном масштабе времени. Измерение спектров в этом диапазоне частот производилось путем транспонирования записей сигналов в высокочастотную область с коэффициентом, равным 10. Рассматриваемая просветная линия при дополнении ее другими средствами морского приборостроения СКБ САМИ (ГДАС, модулями космической и гидроакустической связи) в последствие эффективно использовалась при проведении комплексных исследований на акватории, разделяющей Охотское и Японское моря: сейсмического наблюдения; наблюдения температурных и гидродинамических полей; измерение и представление их характеристик. На рисунке 9.3 приведена запись сигнала землетрясения [254, 255, 287, 288].

### 9.3. Исследования закономерностей зарождения и прохождения землетрясений с использованием гидроакустических средств

В 1986 г. проводились работы по измерению инфразвуковых шумов океана в диапазоне частот от 2 до 500 Гц [1,2]. Наблюдения осуществлялись при помощи одиночных ненаправленных гидрофонов, расположенных на грунте в зоне берегового шельфа на глубине 250 м и в 20 км от береговой черты. Регистрация сигналов осуществлялась на береговом грунте в режиме прямой записи на магнитофон. За время выбранных для анализа записей непрерывных измерений в течение шести суток было зарегистрировано три сейсмических события. В таблице 9.1. приведены параметры этих землетрясений по данным института вулканологии ДВО РАН (ИВ ДВО РАН).

Средние значения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн ( P и S - фазы) в данном районе для слабых землетрясений составляют соответственно 5,2 и 3,0 км/с. Среднюю скорость гидроакустической волны (Т-фазу) можно считать приближенно равной 1,5 км/с. Расчетные времена прихода P, S, T волн, в зависимости от расстояния до эпицентра землетрясения, а также истинный пеленг на источник сигнала приведены в таблице 9.2.

**Параметры землетрясений, зарегистрированных  
в период проведения эксперимента**

№ сейсмических событий	Дата	Время, час, мин, сек.	Координаты, град.		Глубина очага землетрясения, км	Энергетический класс землетрясения
			широта	долгота		
1.	23.05.86.	3.10.14,0	52,78	160,28	29	11,5
2.	25.05.86.	1.36.53,8	54,16	161,43	33	9,2
3.	26.05.86.	1.19.34,6	54,63	161,56	37	9,1

Таблица 9.2.

**Расчетные параметры сейсмических событий,  
произошедших в период проведения эксперимента**

№ сейсмических событий	Дата	Эпицентральное расстояние	Время прихода составляющих сейсмических волн, сек.			Пеленг приемной системы на эпицентр землетрясения, град
			P	S	T	
1	23.05.86	118	23	40	80	62
2	25.05.86	293	56	98	195	45
3	26.05.86	320	62	107	213	37

На рис. 9.4. представлены записи уровня собственных шумов океана с одиночного ненаправленного гидрофона в полосе частот 2÷200 Гц. Стрелками обозначены моменты землетрясений. Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью стандартной аналоговой аппаратуры (самописца, электронного осциллографа, анализатора спектра). Определялось наличие сейсмоакустического сигнала в известный момент времени, оценивались его амплитуда и длительность, распределение энергии в спектре шумов.

Время прихода импульсов от землетрясений №1 и №2 (рис. 9.4. а, б) совпадает с расчетными временами прихода P - волн от эпицентров (см. табл. 9.2). Вторые импульсы, наблюдаемые на ленте СПУ, соответствуют приходу T-волн землетрясений. Причем для землетрясения №1 разность времени прихода T- волн и P - волн ( $\Delta\tau_{T-P}$ ) составляет около одной минуты, что соответствует расчетному времени распространения T- волны от эпицентра землетрясения. Для землетрясения №2  $\Delta\tau_{T-P}$  равно  $\sim 40$ с при расчетной разности в 140 с. Такое существенное расхождение говорит о том, что генерация T-фазы происходит не в эпицентре сейсмического толчка, а гораздо ближе.



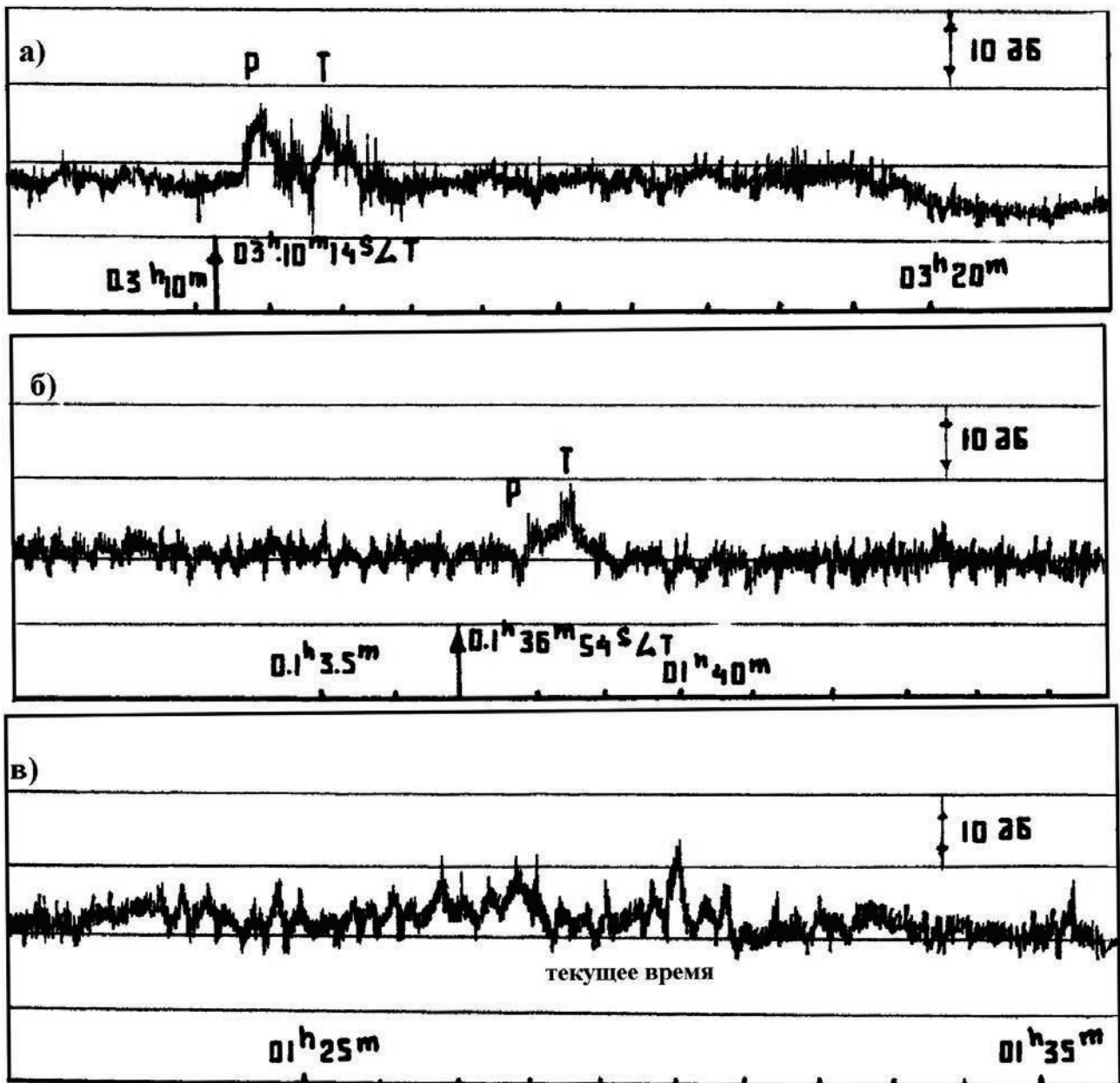


Рис. 9.4. Интегральные уровни собственных шумов океана с одиночного ненаправленного гидрофона

Расчеты показывают, что область генерации гидроакустического сигнала расположена на западном склоне подводного продолжения полуострова Шипунский, на расстоянии 90-100 км от приемного гидрофона. Этот факт подтверждается также экспериментами в районе Курильских островов. Землетрясение №3 (рис 9.4 в) маскируется проходом судна, что делает невозможным выделение сигналов сейсмических и акустических волн на фоне интенсивных шумов ближнего судоходства.

На рис 9.5-9.7 приведены энергетические спектры собственных шумов океана до проявления землетрясений и во время их наблюдения. Время усреднения – 64с (время длительности сигнала). Для условий землетрясений №1 и 2 наблюдается подъем спектра на частотах ниже 24-28 Гц с энергетическим максимумом в области 2-4 Гц. Спектр сигнала землетрясения №3 практически не отличается от спектрального уровня окружающего фона.

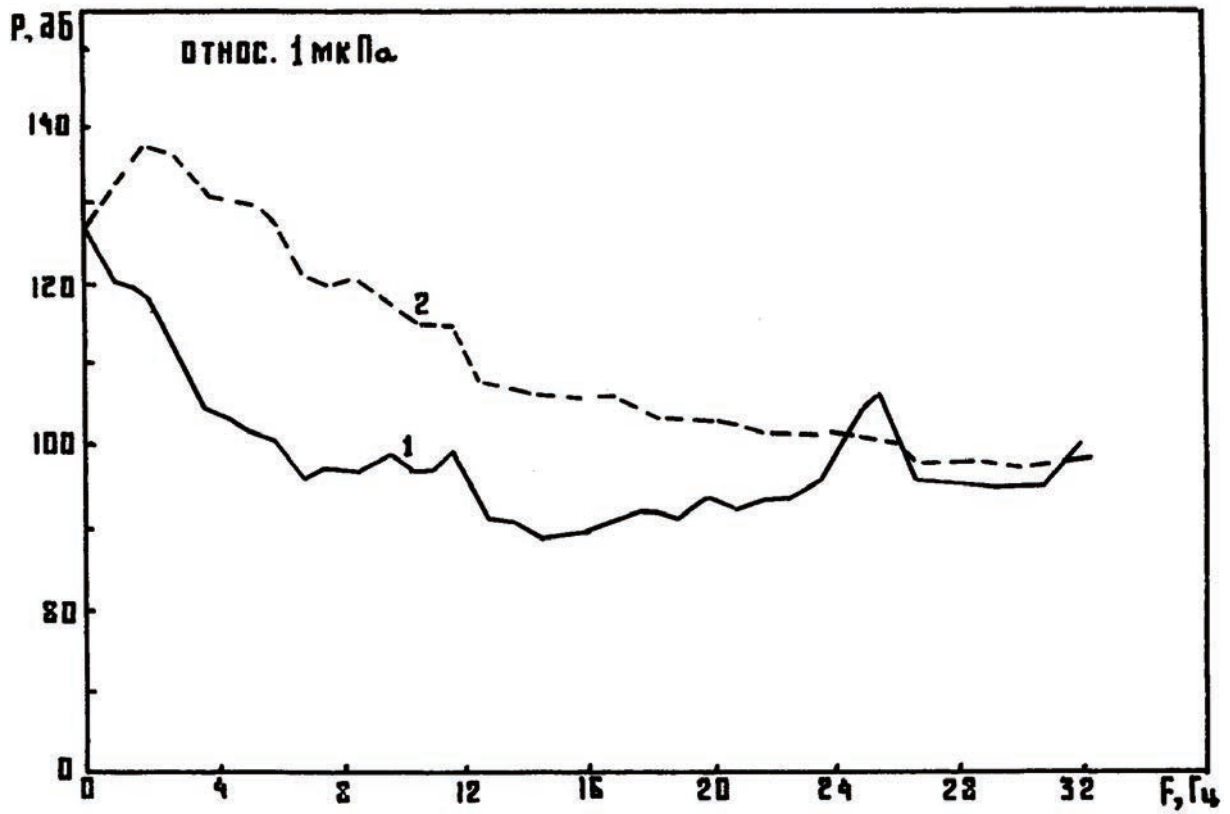


Рис. 9.5. Спектральный уровень шумов океана до вступления землетрясения (1) и во время землетрясения (2)

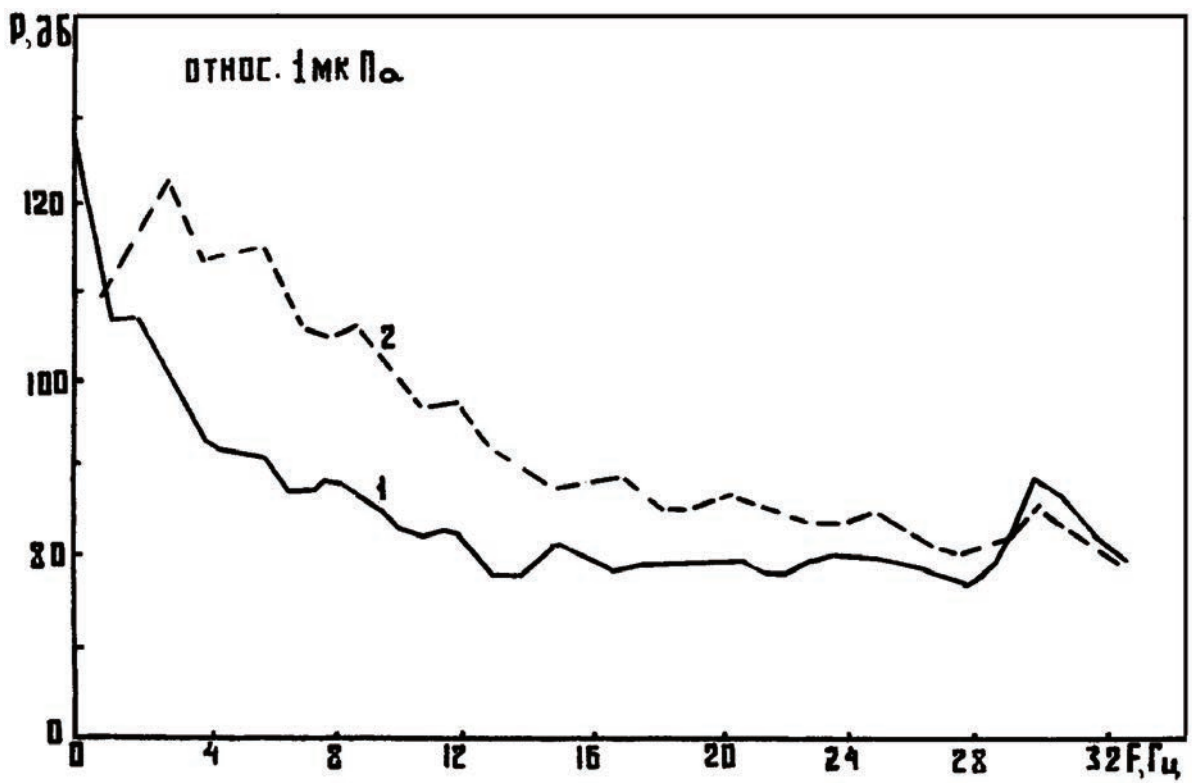


Рис. 9.6. Спектральный уровень шумов океана до землетрясения (1) и во время землетрясения (2)

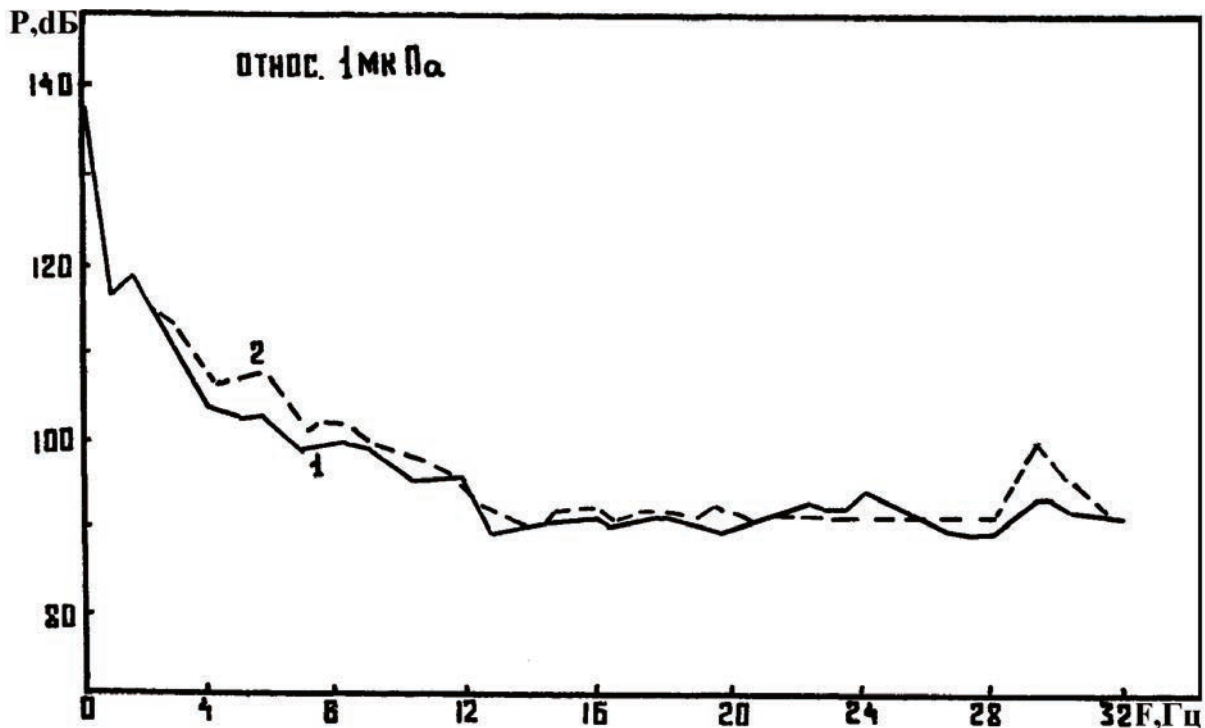


Рис. 9.7. Спектральный уровень шумов океана до землетрясения (1) и во время землетрясения (2)

В мае-июне 1991 г. была проведена регистрация сейсмоакустических сигналов с гидроакустической системы, установленной на расстоянии 5 км от берега, на глубине 50 м в диапазоне частот 0 – 50 Герц. Приемная акустическая система представляла собой шесть расположенных на равных дистанциях ненаправленных гидрофонов, данные от которых оцифровывались и передавались по кабелю на береговой пост. Структурная схема записи сигналов приведена на рис. 9.8.

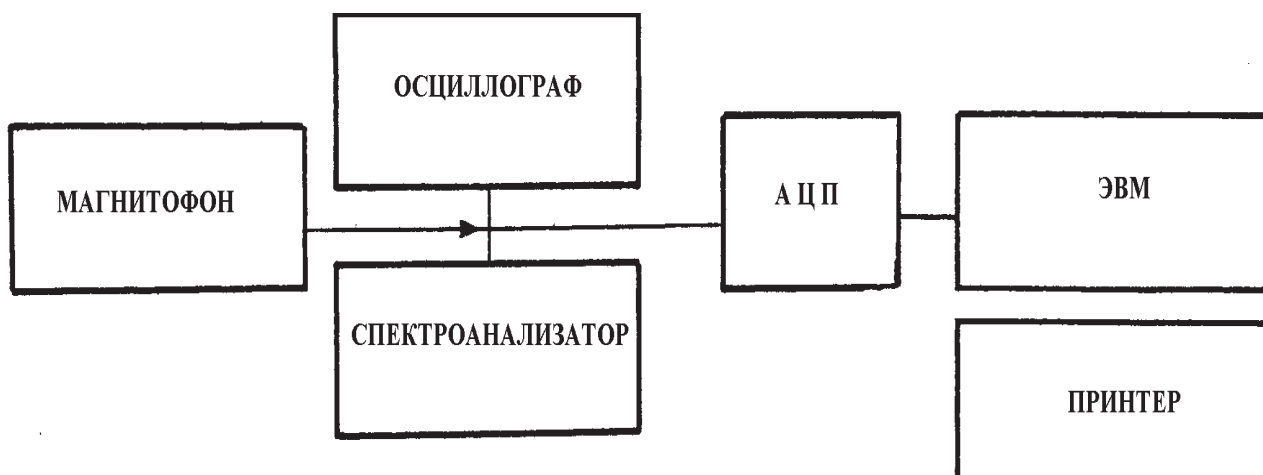


Рис. 9.8. Структурная схема тракта обработки информации

С цифрового преобразователя сигналы записывались на шесть каналов магнитофона в режиме ЧМ записи. Контроль сигналов помех осуществлялся с помощью осциллографа и анализатора спектров. Обработка информации проводилась на стенде, схема которого представлена на рис. 9.9.

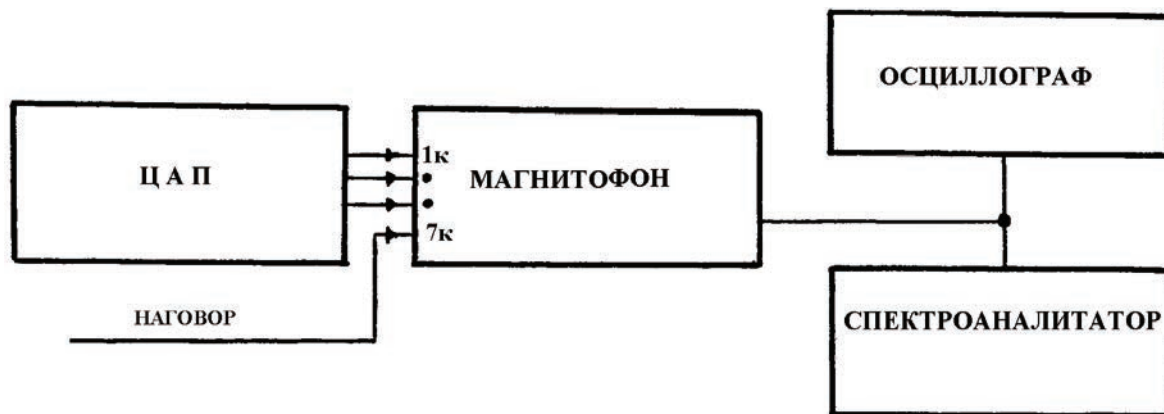


Рис. 9.9. Структурная схема тракта записи информации

На основании представленных ИВ ДВО РАН данных о сейсмических событиях, зарегистрированных наземными сейсмостанциями п. Камчатка и совпадающих с периодами записи гидроакустической информации определялись участки записей, подлежащие обработке (таблица 9.3).

Таблица 9.3

### Параметры землетрясений

№№ сейсмич. событий	Дата	Время. Час., мин., сек.	Координаты, град.		Глубина очага землетрясения, км	Энергетический класс землетрясения	Эпицентральное расстояние, км
			широта	долгота			
1	8.05.90	3.11.48,5	52,91	159,06	30	8	30
2	21.06.90	3.36.20,7	53,64	160,92	40	10	184
3	21.06.90	4.02.21,0	53,34	161,10	40	9	201

Результаты обработки показали, что амплитуда сигнала превышала динамический диапазон магнитофона, поэтому сигнал во всех трех случаях был ограничен по амплитуде. Превышение сигнала над уровнем шумов моря составляло 25 дБ и более. Продолжительность сигнала для каждого из трех событий, определенная как интервал времени, в течение которого амплитуда сигнала превышала уровень шумов, была равна 38, 70, 46 с, соответственно. Выделение фаз сейсмических событий затруднено из-за отсутствия точной временной привязки гидроакустического сигнала и сейсмического события. Трудности идентификации фаз в этом эксперименте связаны также с отсутствием данных о чувствительности датчиков к вибрационным воздействиям.

Анализ распределения энергии наблюдаемых сигналов в различных частотных полосах показал, что характер спектров сигналов приблизительно одинаков для всех трех событий. Энергетические спектры сигналов имели максимум на частотах 4-5 Гц и подъем на частотах 15-26 Гц.

В декабре 1990 г. проводились экспериментальные исследования с использованием кабельной донной базы с вертикальной антенной. Приемная антенна состояла из двадцати гидрофонов, расположенных в два ряда по десять приемников в каждом. Расстояние между гидрофонами – 75 см.

Измерения проводились непрерывно в течение четырех суток в диапазоне частот от 80 до 3000 Гц. За это время по данным ИВ ДВО РАН в регионе произошло восемь сейсмических событий энергетического класса  $K \geq 8$ . В качестве примера приведем результаты обработки шумов океана, обусловленных влиянием сейсмического события №7: 12.12.90г. в 21 час 07 мин 53,9 сек при  $K = 10,8$  с координатами  $53,7^{\circ}$  С.Ш. и  $160,75^{\circ}$  В.Д., с глубиной очага 40 км, эпицентральной расстоянием 330 км). Структурная схема записи сигналов приведена на рис 9.10.

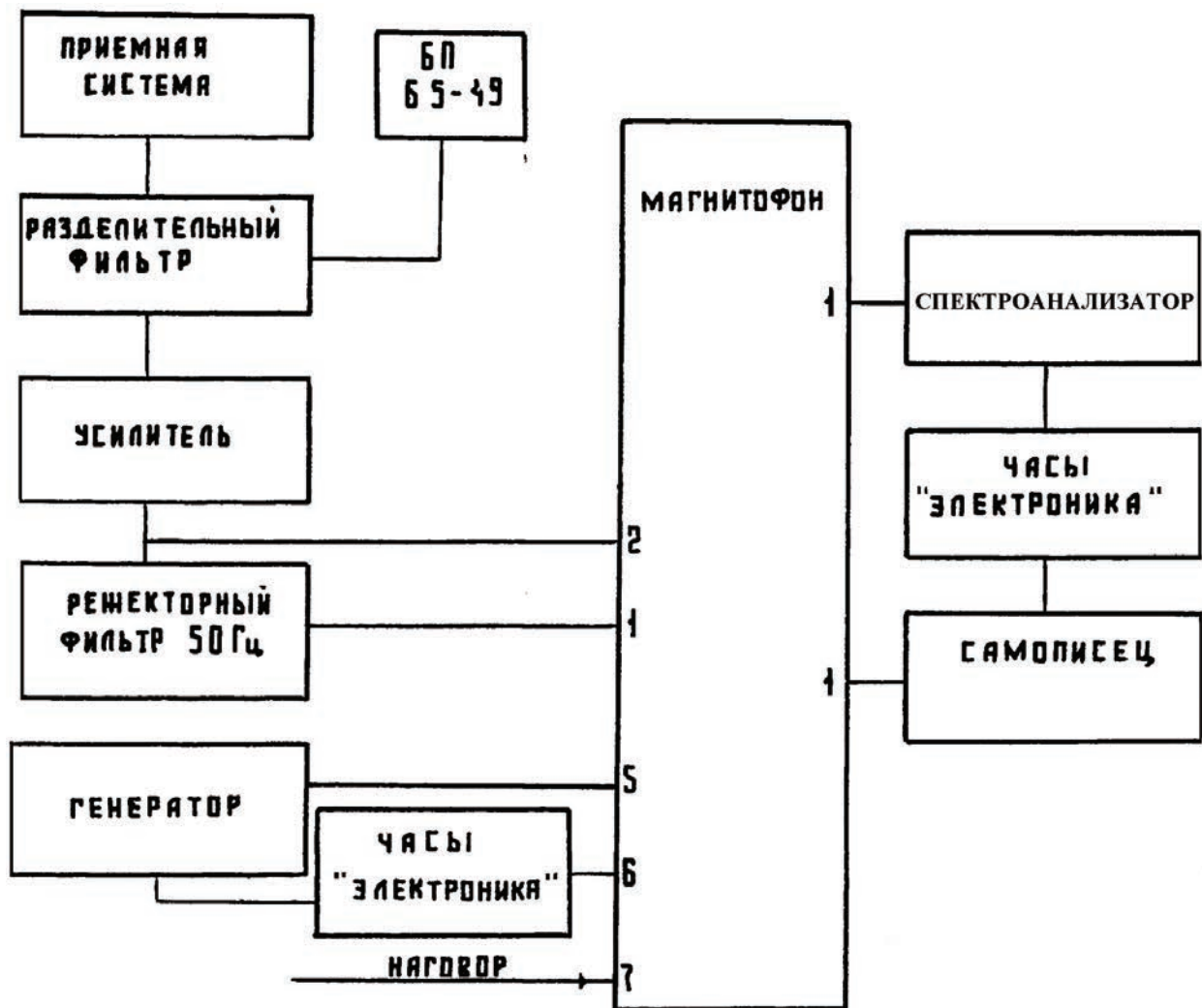


Рис. 9.10. Структурная схема стенда записи сигналов

Обработка экспериментальных данных поводилась с помощью стенда (рис 9.11.), представляющего собой единый программно-аппаратный комплекс, разработанный специалистами КГФИ.

Стенд использовался для поиска участков записи для последующей обработки вычисления и графического отображения спектрально-временных характеристик, временной изменчивости шумового поля и влияния на него сейсмической активности.

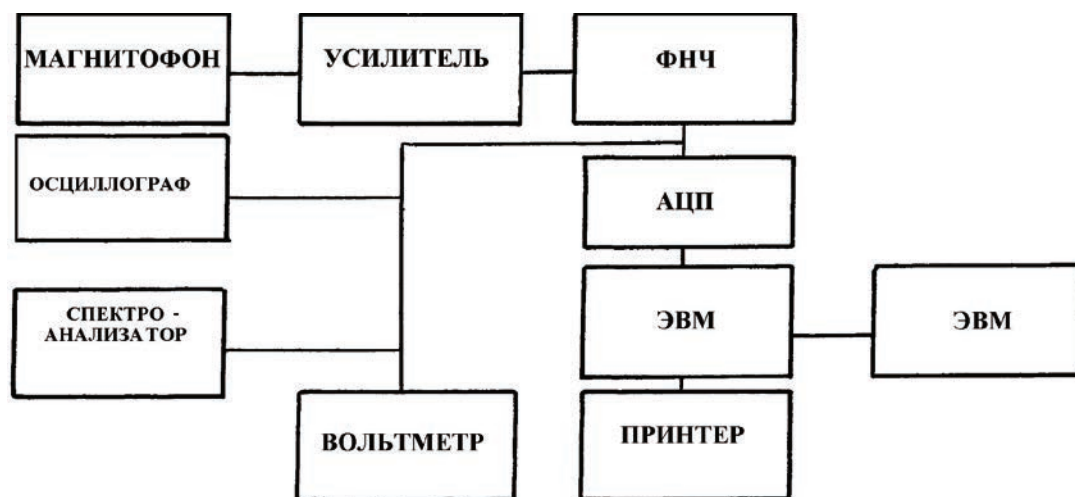


Рис. 9.11. Структурная схема стенда обработки по определению временной изменчивости шумового поля

На рис.9.12. а приведен график временных рядов величин превышений на величину порога  $P=2\text{дБ}$  и более квадратом амплитуды шумового сигнала среднего уровня (вычисленного на временном интервале  $\Delta T = 10\text{с}$ ), выраженных в дБ по отношению к среднему значению. На рис 9.12.б показан временной ряд средних значений квадрата шумового сигнала, выраженных в логарифмических единицах, наблюдается наличие спада среднего уровня квадрата шумового сигнала за 80 мин и последующего возвращения к прежнему уровню непосредственно перед сейсмическим событием.

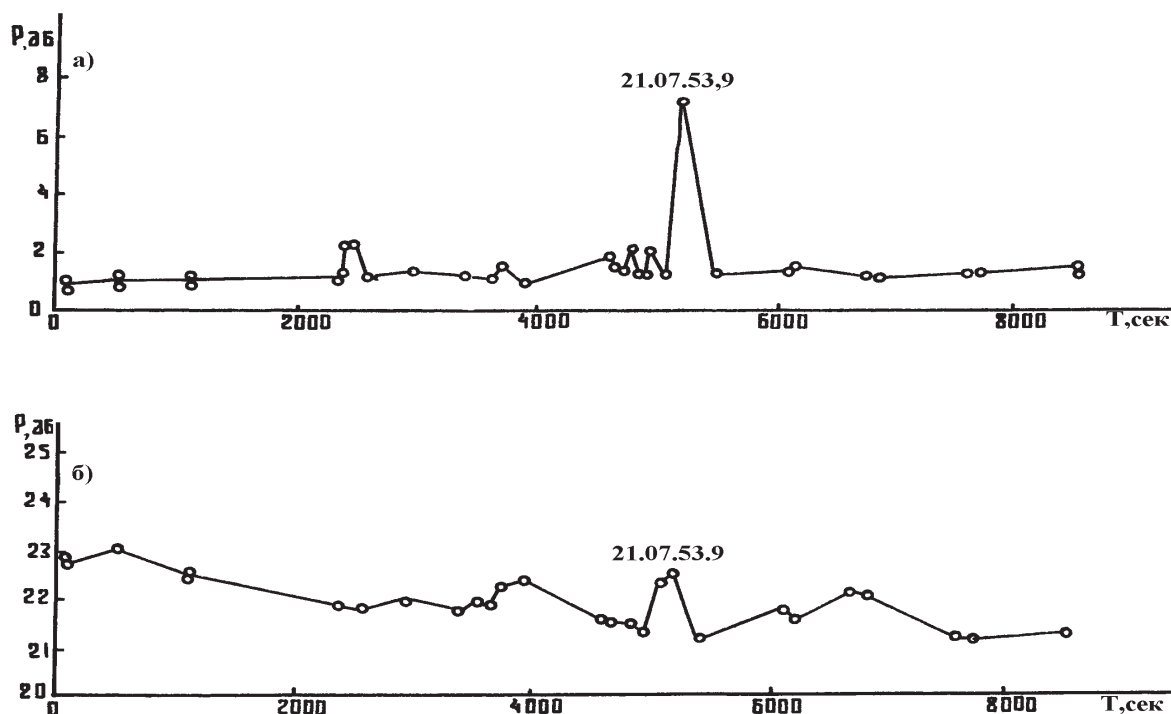


Рис. 9.12. Распределение по времени:  
а – превышений среднего уровня; б – среднего уровня квадрата сигнала шумового поля

Анализ результатов обработки сигналов от восьми зарегистрированных событий энергетических классов  $K \geq 8$  показал, что в периоды подготовки землетрясений максимальное количество превышений среднего уровня на интервале 300с для указанного порога возрастает в два раза и более по сравнению с предстоящими и последующими значениями этой величины. Аномальные значения суммарной длительности превышений достигают величины  $0,03 \div 0,15$ , что в  $4 \div 20$  раз больше последующих значений. В периоды, не сопровождавшиеся сейсмическими событиями, и достаточно далеко от них удаленные по времени (на  $2 \div 4$  часа), колебания среднего уровня квадрата амплитуды шумового сигнала кратковременны (единицы минут) и составляют величину 5-6%. Количество и суммарные длительности превышений в полтора и более раз меньше, чем в периоды возрастания активности, предшествующие землетрясениям. Аналогичные результаты получены также при обработке магнитных записей шумов океана, зарегистрированных в последние годы в периоды сейсмической активности приемными антеннами, установленными вблизи юго-восточного побережья Камчатки.

#### **9.4. Наблюдение сейсмических полей и прогнозирование землетрясений с использованием донных гидроакустических систем**

Особенность сейсмических процессов в Северо-западной части Тихого океана состоит в том, что эпицентры подавляющего большинства землетрясений располагаются в прибрежной зоне океана. В таких условиях становится очевидным, что контроль сейсмического режима в этом районе возможен с использованием гидроакустических донных систем [250-255]. В качестве основного приемного элемента используется гидрофон, представляющий собой пьезоэлектрический датчик давления.

Основным механизмом образования гидроакустических сигналов, обусловленных землетрясением, является то, что они проявляются в виде сейсмических волн, распространяющихся в твердой оболочке Земли. Для наземных сейсмических станций первым признаком землетрясений бывает появление продольных (P) волн, следом за которыми проходят поперечные (S) волны. Для Камчатского региона скорости распространения продольных волн составляют 5-6 км/с, поперечных – 3-4 км/с. При приеме сейсмических сигналов на дне океана или водной толще гидрофон регистрирует давление, пропорциональное вертикальной составляющей скорости смещения дна. Поэтому гидрофон эффективно воспринимает P-фазу сейсмического сигнала. Исходя из общих физических представлений, поперечная волна подходит ко дну практически под прямым углом и, очевидно, поэтому не происходит ее трансформации в волну сжатия в воде. В связи с этим на записях сейсмических сигналов, полученных с помощью гидрофона, S-фаза практически отсутствует. Но особенно эффективен гидрофон при регистрации T-фазы сейсмического сигнала, поскольку она представляет собой гидроакустическую волну давления, распространяющуюся в водном слое со скоростью звука  $\sim 1,5$  км/с.

В большинстве случаев регистрации T-фазы в условиях Курило-Камчатской островной дуги, область образования гидроакустической волны, способной распространяться на большие расстояния в водном слое, находилась на подводном континентальном склоне, обращенном в сторону открытого океана. При этом гидроакустическая волна из-за многократных отражений от водной поверхности и наклонного дна, при постепенном изменении углов падения от скользящих углов к «крутым», попадает в под-

водный или приповерхностный звуковой канал. В дальнейшем распространение происходит без касания дна, т.е. в условиях минимальных потерь энергии. Она может содержать значительную часть энергии сигнала, ее интенсивность и длительность нередко превышает аналогичные параметры Р - фазы. Большие потери энергии гидроакустической волны при ее трансформации в области перехода из воды в грунт, делают прием Т-фазы наземными сейсмостанциями неэффективным. Сведения о Т-фазе могут быть использованы для определения эпицентра сейсмических событий с малой глубиной очагов. Это связано с тем, что при распространении сейсмических сигналов в этой области обычно наблюдаются большие потери энергии Р - фазы из-за рефракционных эффектов в приповерхностном слое земной коры, чем объясняется низкая эффективность регистрации событий наземными сейсмостанциями. Кроме того, Т-фаза в ряде случаев оказывается единственным источником информации для определения цунами опасности землетрясений. Использование возможностей по расширению частотного диапазона излучаемых параметров близких землетрясений в область звуковых частот с одновременным повышением чувствительности приемных гидроакустических систем позволяют получить значительно больше информации о сейсмическом режиме исследуемого района, чем наблюдения только на сейсмической аппаратуре.

При проведении испытаний обосновывалась возможности использования характерных предпосылок для прогнозирования подводных землетрясений, т. е. поиск таких характеристик, которые были бы связаны с процессами подготовки землетрясения и принимали бы аномальные значения в периоды, предшествующие землетрясениям (наблюдения за гидроакустическими предвестниками). В этой связи в работе рассматриваются данные полученных результатов регистрации сигналов сейсмического происхождения с использованием гидроакустических станций. Регулярные измерения проводились в период с 1986 по 1991 г. В этой связи следует отметить, что имеются дополнительные материалы долговременных исследований по наблюдению сейсмоакустической обстановки сотрудниками СКБ САМИ ДВО РАН, выполненные донными гидроакустическими станциями, которые требуют специальной обработки.

## **9.5. Экспериментальные исследования в рамках задач Министерства по чрезвычайным ситуациям**

В 1995 году специалистами СКБ САМИ совместно с КГФИ, проводились по заданию МЧС России работы по выявлению предвестников землетрясений. В море были установлены две донные сейсмостанции (ДСС). Первая была установлена в районе приемной донной антенны приблизительно по направлению нормали на расстоянии около 500 м. Вторая ДСС располагалась в районе б. Жирова. Установка проводилась с борта гидрографического судна. В состав ДСС входил трех координатный сейсмический датчик, магнитофон, генератор импульсов, излучающий гидрофон и блок питания. Вся аппаратура размещалась в герметичном контейнере.

Принцип работы ДСС следующий. При нахождении на позиции в дежурном режиме и фиксации сейсмическим датчиком подземного толчка запускается генератор акустических импульсов мощностью  $110 \div 120$  мВт, с частотой заполнения 512 Гц. Длительность импульсов - 100 мс, период следования импульсов -  $4 \div 8$  с. Излученные ДСС импульсы по гидроакустическому каналу поступали на приемную антенну гидроакустической станции и через 1/3-октавный фильтр, и усилитель регистрировались в режиме ЧМ



на магнитофоне. Кроме того, была предусмотрена непрерывная запись шумового сигнала на СПУ с ненаправленного приемника и 75-го пространственного канала, что соответствовало нормали к плоскости гидроакустической приемной антенны. На береговом посту была установлена береговая сейсмостанция (БСС). Она находилась в дежурном режиме весь период экспериментальных работ и использовалась для контроля сейсмической обстановки в районе расположения берегового поста.

20 октября 1995г. БСС зафиксировала подземный толчок мощностью  $3\div 3,5$  балла по шкале Рихтера. Экспресс-анализ полученной информации показал, что не перед землетрясением, ни в его момент не были зафиксированы импульсы от ДСС. Основными причинами их несрабатывания явились:

- значительное удаление приемной антенны от берегового поста (40 км);
- недостаточный энергетический класс зафиксированного БСС землетрясения для создания порогового воздействия, необходимого для запуска генератора акустических импульсов ДСС.

Метод комплексного использования гидроакустических станций, ДСС и БСС для краткосрочного прогноза землетрясений, определенно имеет большие перспективы. Но для его внедрения необходимо провести ряд длительных экспериментальных исследований, чтобы зафиксировать и выявить предвестники землетрясений высокого энергетического класса ( $K\geq 8$ ).

Анализ материалов, полученных в ходе экспериментальных работ, позволил выявить следующее.

На временных диаграммах наблюдается несколько фаз прихода волн от землетрясений, для надежной интерпретации которых необходимо сопоставление их с сигналами, зарегистрированными сейсмоприемниками. На данном этапе интерпретация фаз сейсмических событий в сигналах, полученных с гидрофонов, осуществлялась путем расчета времени прихода фаз с учетом различных скоростей их распространения, и по координатам эпицентров, определенным наземной сейсмической службой.

С увеличением магнитуды землетрясений спектральные максимумы наблюдаются во все более высокочастотной части спектра ( $60\div 70$  дБ и более), при сохранении максимумов в интервале частот  $4\div 5$  Гц.

В качестве критериев изменчивости акустических шумов океана, отражающих влияние сейсмической активности, могут быть использованы:

- среднее значение квадрата шумового сигнала на коротких временных интервалах (единицы-десятки секунд);
- величина и длительность превышений квадратом шумового сигнала среднего значения;
- распределение количества превышений и их суммарной длительности на заданных временных интервалах.

В использованных для анализа долговременных записях шумов океана, включающих сигналы сейсмических событий, выявлено длительное понижение среднего уровня квадрата шумового сигнала за  $15\div 150$  мин перед землетрясениями  $8\div 11$  энергетических классов. Величина понижения составляет  $6\div 9\%$  и увеличивается, как и длительность понижения, с увеличением энергетического класса сейсмического события.

Количество превышений квадратом шумового сигнала среднего уровня и суммарная длительность превышений среднего уровня на интервале  $300$ с возрастают в несколько раз за указанный период перед сейсмическим событием, затем уменьшаются до прежнего уровня, и вновь возрастают в момент, непосредственно предшествующий или сов-

падающий с сейсмическим событием. Эти обстоятельства говорят о возможной связи указанных характеристик шума океана со стадией подготовки землетрясений в зоне очага готовящегося сейсмического события. Для обоснования возможности использования аномалии (снижений уровня) шумового поля океана перед землетрясением при анализе энергетических классов 8–11, как предвестника землетрясения, необходимы дополнительные, продолжительные исследования. Это особенно необходимо при наблюдении за временной изменчивостью шума перед сильными землетрясениями.

## **9.6. Методические предпосылки прогнозирования сильных землетрясений по измерениям их предвестников**

Последствия сильных землетрясений и, в частности, таких как землетрясения 1994 г. на Южных Курилах, а также на севере о. Сахалина 1995 г. обусловили необходимость разработки методов их прогнозирования по проявлению предвестников.

Измерение параметров предвестников сильных землетрясений предусматривает их всесторонний анализ, включающий: предварительный отбор сигналов, их алгоритмический синтез, теоретическое обоснование природы возникновения, оценка значимости, как предвестника, и, наконец, выдача прогнозной оценки.

Исходя из рассмотренных подходов, в настоящее время используется совокупность признаков прогнозирования землетрясений, основанных на процессах, сущность которых можно изложить следующими наблюдениями [244–250].

1. За несколько месяцев до землетрясения образуются кратковременные сейсмические аномалии, заключающиеся в том, что отношение скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических волн в очаговой зоне уменьшается, претерпевает минимум и восстанавливается перед главным толчком.

2. Вблизи очага землетрясения увеличивается концентрация газов (в частности радона) в грунтовых водах.

3. Резко уменьшается электрическое сопротивление в районе главного сейсмического толчка.

4. Обнаружено, что землетрясениям сопутствуют изменения величины электропроводности, электрического потенциала и магнитных полей, возникают электромагнитные бури.

5. Количество форшоков (сейсмических толчков, предваряющих главное сейсмическое событие) за несколько месяцев до главного сейсмического толчка заметно уменьшается (наблюдается затишье) и восстанавливается перед главным толчком.

6. Наблюдается подъем свободной поверхности земли и уровня моря в местах очага землетрясения.

7. Отмечено, что в период активизации сейсмической деятельности возникает аномальная группировка землетрясений в пространстве.

Из рассмотренных признаков прогнозирования только три признака (п.п. 1,5,7) позволяют проводить эти работы вдали от эпицентров землетрясений, в остальных необходим контроль параметров непосредственно на месте событий, что связано с большими практическими трудностями. Метод, основанный на контроле аномалии отношения скоростей сейсмических волн, требует излучения мощных сигналов (подрыва зарядов) для просвечивания предполагаемого очага землетрясения. Применение метода также ограничено требованиями экологической безопасности окружающей среды. Перспек-

тивным, с учетом вышеизложенного, а также стоимостной оценки исследований и получения данных по п. 2, 3, 4, является метод, в основу которого положен анализ максимального числа сейсмических толчков (предвестников).

В то время, как наземные сейсмостанции регистрируют только два вида сейсмических волн – продольные (Р-волна) и поперечные (S-волна), которые названы по последовательности вступления этих волн, сейсмогидроакустические приемные станции "Специального Конструкторского Бюро средств автоматизации морских исследований" (СКБ САМИ), установленные в районе южной части Охотского моря регистрируют еще и третью акустическую компоненту землетрясения (Т-волну) (рис.9.13). Акустическая компонента (Т-волна) генерируется подводными хребтами, горами при ударном воздействии на них сейсмическая волна от землетрясения, в частности, островами Курильской гряды. Скорость распространения Т-волн, как гидроакустических, заметно уступает скоростям сейсмических компонент и составляет примерно 1.5 км/с. Гидроакустические сигналы Т-волн слабо затухают и распространяются на большие расстояния.

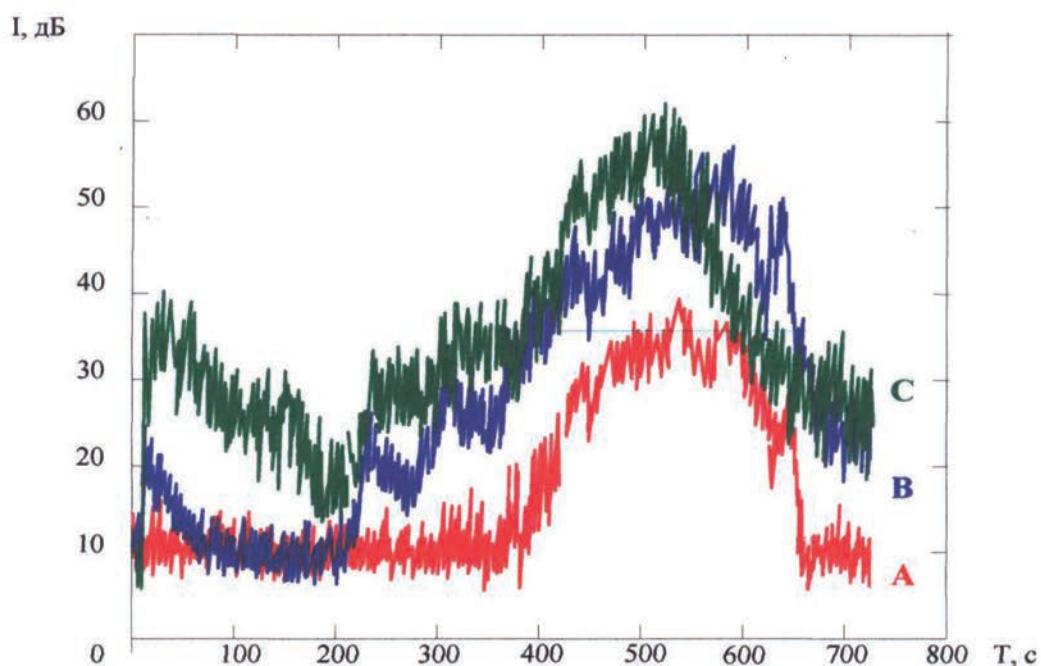


Рис. 9.13. Запись акустических колебаний предвестника землетрясений в случае многолучевого распространения Т- волн.

А 10-30Гц, В 3-10Гц, С 0.8-1.8Гц

Вследствие уникальности географического взаиморасположения островов, подводных гор, хребтов Курильской гряды и приемных баз СКБ САМИ существует возможность определения местонахождения эпицентра землетрясения по задержкам времен прихода Т-волн, генерируемых этими областями. Такие исследования были апробированы в рамках научно-исследовательской работы на базе стационара СКБ САМИ. Для решения этих закономерностей была проведена экспериментальная работа по длительному наблюдению и регистрации сигналов предвестников и землетрясений.

За период регистрации наиболее сильное землетрясение силой шесть баллов в районе о. Парамушир ( $\varphi = 51^{\circ}$ с.ш.,  $\lambda = 157.3^{\circ}$ в.д.), произошло 30 сентября 1995г. в  $10^{\text{ч}}50'30''45$  (время по Гринвичу). Акустические и сейсмические сигналы этого земле-

трясения и его предвестников были зарегистрированы и использованы при обосновании метода прогнозирования. В регистрируемых спектрограммах предвестников и землетрясения наблюдались четкие вступления сейсмических Р - волн, за которыми следуют протяженные максимумы акустических Т-волн. Вступление Р - волны превышает фоновый уровень (уровень подводного шума) на 30 дБ, а максимум Т-волны на 60 дБ. Известно, что шкала единиц землетрясений в единицах магнитуд  $M_s$  соответствует изменению энергии в 27 раз, т.е. в логарифмическом масштабе на рис. 9. 13 дБ. Таким образом, вступление Р - волн можно обнаружить от землетрясений с очагом в рассматриваемом районе при  $M_s \geq 4$ , а вступления акустической Т-волны при  $M_s \geq 2$ . Т.е. использование акустической компоненты сигнала землетрясения (Т-волны) позволяет зафиксировать факт сейсмического события силой на два балла ниже (на 30 дБ), чем по чисто сейсмическим волнам.

Расположение приемных гидроакустических баз СКБ САМИ в Охотском бассейне и островах Курильской гряды таково, что вступление Р - волны опережает максимум Т-волны на 3-4 минуты от южных Курильских островов и на 6-8 минут от северных Курильских островов. Таким образом, определив факт формирования сейсмического толчка по максимуму Т-волны, во временном отрезке опережающего на 3-8 минут данный максимум, необходимо произвести поиск времени вступления сейсмических волн. Так как в этом случае поиск сейсмических волн осуществляется при отношении сейсмический сигнал/фоновый шум, меньшим чем единица, то для проведения задачи обнаружения необходимо привлечь различные методы, включая использование расчетной передаточной функции среды, что и было использовано при обосновании предлагаемого метода прогнозирования.

На основании предложенного метода прогнозирования удалось выделить вступления волн слабых сейсмических толчков силой 2-3 балла и на значительном удалении от эпицентра. В этом случае следующий этап заключается в анализе потока сейсмических данных, включая изучения слабых сигналов. Формально используя различные статистические методы и методы распознавания, необходимо выделить из потока сейсмических данных сигналы форшоков, главных сейсмических толчков и сигналов афтершоков. Далее производятся наблюдения за повторяемостью и за миграцией форшоков, на основе которых создается модель ситуации перед главным сейсмическим толчком (сильным землетрясением) в выбранном секторе. И наконец, с учетом результатов анализа сейсмических, гидроакустических и электромагнитных измерений создается единая система обнаружения и предупреждения о сейсмической и цунами опасности.

## **9.7. Анализ материалов, экспериментальных исследований сейсмической обстановки в южной части Охотского моря**

Научные исследования и технические разработки в объеме проекта предусматривают решение задач обнаружения неоднородностей среды, прогнозирования и оповещения об опасных природных явлениях [242-250].

В объеме работы проводится также обоснование теоретических предпосылок для разработки алгоритмов и программ расчета пространственной амплитудно-фазовой структуры сейсмоакустического поля на протяженных трассах с переменными характеристиками среды и ее границ. Алгоритмы и программы реализуются применительно к обнаружению пространственно развитых неоднородностей в условиях распространения

сигналов придонных сейсмоакустических источников в Охотском море. Расчеты характеристик сейсмоакустических полей основываются на закономерностях, которые выявлены по результатам многолетних наблюдений максимального количества сейсмических возмущений морской среды. Сущность этих закономерностей заключается в следующем. Наземные сейсмостанции регистрируют только два вида сейсмических волн - продольные (Р - волна) и поперечные (S-волна), которые названы по последовательности их вступления. Сейсмогидроакустические приемные станции СКБ САМИ, установленные в районе южной части Охотского моря регистрируют еще и третью акустическую компоненту землетрясения (Т-волну), которая генерируется подводными хребтами при ударном воздействии на них сейсмических волн от землетрясения, и, в частности, островами Курильской гряды.

Скорость распространения в морской среде Т-волн, как гидроакустических, меньше скорости распространения сейсмических компонент сигнала землетрясения в грунте и составляет 1.5 км/с. Расположение островов Курильской гряды, подводных гор и хребтов, а так же специальное расположение относительно из донных приемных баз, обеспечивает возможность определения места эпицентра землетрясения. Это выполняется по задержкам времени приходов Т-волн, генерируемых перечисленными областями, а это, в свою очередь, обеспечивает возможность своевременного обнаружения предвестников и прогнозирования времени вступления опасных явлений.

Сейсмоакустические исследования и технические разработки СКБ САМИ в объеме проекта предусматривают решение взаимосвязанных задач:

- разработка методов гидроакустического и сейсмоакустического зондирования неоднородностей различных пространственно-временных масштабов на акваториях Охотского моря;
- обоснование метода прогнозирования сильных землетрясений по измерениям их предвестников;
- разработка метода и системы измерения электромагнитных волн предвестников;
- разработка единой системы измерения сейсмических, гидроакустических и электромагнитных волн предвестников и их мобильной передачи через спутниковые каналы связи в информационно-аналитический центр.

Для выполнения задачи сейсмоакустического зондирования неоднородностей различных пространственно-временных масштабов в Охотоморском регионе проведены теоретические расчеты характеристик гидроакустических полей, а также комплекс экспериментальных исследований на протяженном морском стационаре с использованием специальных судов обеспечения и взрывных источников звука, характеристики которых близки к природным сейсмическим источникам (возмущениям). Обоснование метода прогнозирования сильных землетрясений проведено на основании многолетних исследований, наблюдений, измерений характеристик гидрофизических полей морской среды и объектов [244-250, 251], признаков их предвестников, сущность которого заключается в следующем.

Из потока сигналов сейсмических данных выделяются характерные признаки форшоков, главных сейсмических толчков и сигналов афершоков. Далее анализируются наблюдения за повторяемостью и миграцией форшоков в пространстве, на основе их определяется сценарий развития ситуации перед главным сейсмическим толчком (сильным землетрясением) в выбранном секторе наблюдения (ожидания). И, наконец, формируется система предупреждения населения о сейсмической и цунами опасности. Выявленная и обоснованная последовательность проявления событий, измерений, обра-

ботки и анализа сигналов (признаков) сейсмической активности района представляет сущность метода прогнозирования сильных землетрясений.

**Достигнутый научный и аппаратурный задел.** Сотрудниками СКБ САМИ получен большой объем научной и экспериментальной информации за длительный период на стационарной морской трассе. Имеются результаты измерений сейсмоакустических сигналов с датчиков, соответствующих продольной и поперечной волнам и содержащих информацию о Т-фазе сейсмоакустических волн.

Разработаны и эффективно применяются современные наукоемкие программы расчета сейсмоакустических полей на трассах с переменными характеристиками среды и границ (как лучевым методом, так и волновым методами). Освоены также стандартные программы цифрового отображения сейсмоакустических сигналов, полученных с использованием, как одиночных приемников, так и многоэлементных гидроакустических антенн.

В плане аппаратурного обеспечения и готовности к проведению экспериментальных исследований по тематике работы, на настоящий момент в СКБ САМИ имеется также дополнительное оборудование:

- два автономных модуля длительного измерения и накопления сейсмоакустической информации с многоэлементными вертикально-разнесенными приемниками;
- судовой вариант измерителя скорости звука и давления (ИСЗД-2).

**Опыт работы в области фундаментальных исследований с использованием акустической томографии.** С 1975 г. проводятся экспериментальные исследования в области фундаментальной и прикладной гидрофизики и гидроакустики на базе специально оборудованных морских стационаров, а также аппаратуры, разработанной и изготовленной собственными силами, совокупность которых при их дальнейшей разработке обеспечивает возможность наблюдения пространственно-временных характеристик гидрофизических и геофизических полей Охотского моря методом просветной акустической томографии [3,4,7].

В обеспечение работ по рассматриваемому направлению на первом этапе исследований летом 1975 года была введена в эксплуатацию наземная часть гидрофизического стационара на юго-восточном побережье Охотского моря в районе мыса Левенорна. Береговой пост был оснащен приемно-излучающей аппаратурой, а также специальными линиями, проложенными в море и снабженными гидрофизическими и гидроакустическими датчиками. Были проложены также стационарные кабельные трассы приема и излучения акустических сигналов, распространяющихся в морской среде на дистанциях от 5 до 12 км. На этом этапе исследований разрабатывались также теоретические модели распространения акустических сигналов, уточнялись закономерности их преобразования неоднородностями среды различной физической природы в зависимости от сезонных и синоптических условий. Были разработаны и экспериментально апробированы теоретические переходные (импульсные) характеристики среды распространения.

Второй этап экспериментальных исследований (1986-1995гг.) ознаменовался введением в эксплуатацию широкомасштабного гидроакустического стационара, оснащенного излучающей аппаратурой на о. Итуруп. Исследования на стационаре перешли на качественно новую ступень. Географически протяженная стационарная трасса (345 км) позволила сопоставить закономерности в изменчивости сейсмоакустических сигналов с гидрометеорологической изменчивостью в прилегающем к стационарной трассе Охотском регионе. На этом этапе исследований выполнялись эксперименты с привлечением судов обеспечения, что позволило выполнить: гидрологические разрезы вдоль трассы;

исследования с использованием взрывных источников звука; ледовые измерения; прямые измерения спектров волнения, скорости течения и температуры морской воды на различных горизонтах.

Анализ результатов комплексных исследований акваторий Охотского региона позволил обосновать возможность применения метода дистанционного сейсмоакустического зондирования для исследования динамических процессов в морской среде и на её поверхности, включая наблюдение методом просветной акустической томографии. Обоснование метода прогнозирования сильных землетрясений проведено на основании многолетних наблюдений (измерений) характеристик предвестников.

**Необходимо отметить**, что экспериментальные исследования второго этапа, проводимые на измерительном поле, **выполнялись совместно с американской фирмой SAIC** (1994-1995 гг.). По результатам исследований представлены совместные научно-технические отчеты. В 1998 году СКБ САМИ ДВО РАН выполнило заказную исследовательскую работу для фирмы SAIC по обработке и интерпретации экспериментальных данных, полученных на просветной трассе в южной части Охотского моря.

## **9.8. Регистрация сигналов землетрясений донными станциями, оснащенными акустическими приемниками**

Катастрофические землетрясения на Южных Куриалах, Сахалине и Камчатке приводят исследователей к поиску краткосрочных наиболее эффективных методов их прогнозирования в районе Курило-Камчатского желоба, относящегося к зоне интенсивной сейсмичности.

В настоящее время известны несколько методов прогнозирования землетрясений, из которых выделим те, которые позволяют проводить наблюдение с использованием сейсмогидроакустических средств [250-255,283-285].

Обнаружено, что за несколько месяцев до происшествия сильного землетрясения образуются сейсмически скоростные аномалии, заключающиеся в том, что отношение скоростей распространения  $V_p/V_s$  продольных и поперечных сейсмических волн в очаговой зоне уменьшается, претерпевает минимум и восстанавливается перед главным сейсмическим толчком.

Количество форшоков (сейсмические толчки, предваряющие главное сейсмическое событие) за несколько месяцев перед главным сейсмическим толчком заметно уменьшается (затишье) и восстанавливается перед главным толчком.

Отмечено, что в период активизации сейсмической деятельности возникает аномальная группировка землетрясений в пространстве.

Эти три метода прогнозирования последующего главного сейсмического толчка позволяют проводить наблюдения телеметрические, вдали от эпицентров землетрясений с использованием сейсмогидроакустических средств наблюдения.

Рассмотрим подробно природу и поведение основных закономерностей зарождения и прохождения землетрясений.

Сигналы от землетрясений (сейсмограммы) имеют сложный вид. Первым признаком землетрясения является внезапное вступление продольных (P) волн, следом сдвиговых, поперечных (S) волн. Позднее приходят поверхностные волны Релея и Лява. На записях сигналов землетрясения различается много других вступлений или фаз. Особый вид проявления сигналов фазы наблюдается при регистрации сейсмических сигналов в вод-

ной среде. Она соответствует гидроакустической волне давления, или Т-волне (третьей волне), распространяющейся со скоростью распространения звука в морской воде примерно 1,5 км/с. Скорости распространения продольных волн составляют 8-10 км/с, поперечных волн составляют – 5-7 км/с, волн Релея Лява составляют – 4-4,5 км/с. Из-за сдвигового характера процесса в очаге амплитуда S-волн обычно больше, чем Р - волна. Так как расхождение фронта поверхностных волн более медленное, чем объемных, то волны Релея Лява на больших расстояниях имеют большую амплитуду, чем волны Р и S.

При регистрации сейсмических сигналов на дне океана наряду с сейсмоприемниками используют гидрофоны. Давление, регистрируемое гидрофоном, пропорционально вертикальной составляющей (z) скорости смещения дна. Исходя из этого, для водной толщи можно записать

$$P = p c z$$

где,  $p$  - плотность воды,  $c$  - скорость распространения звука в воде.

Гидрофон эффективно воспринимает Р - фазу в сейсмическом сигнале. Из общих физических представлений следует, что при пологом падении сейсмической волны на границу раздела часть энергии поперечной волны также должна проникнуть в воду в виде волн сжатия. Однако, на записях сейсмических сигналов, полученных с помощью гидрофонов, S-фаза очень слаба или вообще отсутствует. На рис. 9.14. представлены сигналограммы с выходов гидрофона сейсмоприемников донного сейсмографа (вертикальная и горизонтальная компоненты) заглубленного на дно Индийского океана (глубина-4000м, район характеризуется относительно ровным дном).

Опыт использования записей гидроакустических станций (донных и буйковых) в Тихоокеанском регионе показал, что привлечение Т-фазы целесообразно для получения информации о сейсмичности в исследуемых районах. В ряде случаев она оказывается единственным источником информации о регистрируемых событиях при затухании и не прохождении Р - и S-волн в место приема.

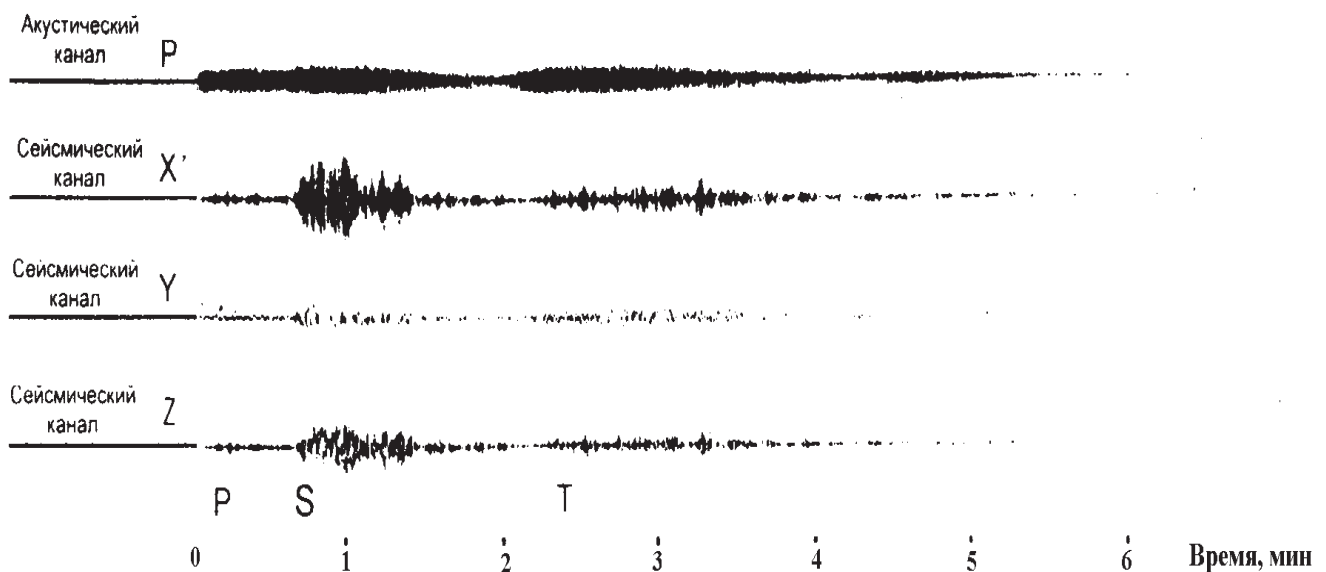


Рис. 9.14. Запись сигналов подводного землетрясения



Из анализа записей сейсмических сигналов гидроакустическими станциями Тихого океана следует, что с помощью Т-волны по совокупности времен ее прихода на станции можно проводить определение местоположения очагов землетрясения. Не привлекая данные по Р - фазе и S-фазе. За период с августа 1965г. по декабрь 1967г. таким способом были определены эпицентры 1350 землетрясений у западного побережья США. Это в 35 раз больше, чем их было определено в том же районе Геологической службой.

Таким образом, на современном этапе, когда сеть сейсмических станций, предназначенных для наблюдения за сейсмической обстановкой на Дальнем востоке, заметно уменьшилась, встает вопрос использования одиночных сейсмогидроакустических станций для этих целей.

В настоящее время можно выделить два механизма генерации Т-фазы: на ровном дне и на подводном склоне. Первый механизм характерен для глубоководного района с ровным дном. Мощная сейсмическая волна, вышедшая из дна, и отраженная от водной поверхности, вновь попадая на дно, рассеивается на его неоднородностях. Такое рассеяние приводит к появлению акустических волн, распространяющихся во всех направлениях, в том числе при малых углах наклона к горизонту, которые имеют малые потери. Данный механизм занимает обширный район, вследствие чего уровень Т-волны медленно возрастает, достигает максимума и также медленно убывает. В качестве примера на рис. 9.14. представлена Т-фаза с выхода акустического приемника, где сигнал Т-фазы действительно медленно нарастает, а затем также медленно убывает.

В большинстве случаев регистрации Т-фазы область образования гидроакустической волны, способной распространяться на большие расстояния в водном слое, находилась на подводном склоне, обращенным в сторону открытого моря [239,240,254,255].

Эффективность образования Т-фазы в этом случае объясняется тем, что, несмотря на крутизну начального участка траектории гидроакустической волны, она быстро становится пологой из-за многократных отражений от водной поверхности и наклонного дна. В результате сигнал попадает в подводный или приповерхностный звуковой канал. Предполагается, что дальнейшее расширение волны происходит без касания дна, т.е. в условиях минимальных потерь. Данный механизм генерации Т-фазы характерен для Охотского моря. Если областями генерации Т-фаз отдельного землетрясения являются острова Курильской гряды, то Т-фаза имеет сильно изрезанную форму с множеством локальных максимумов. Это связано с тем, что уровень Т-волны, сгенерированной на склоне, имеет крутой передний фронт, который затем медленно спадает. Если местом генерации Т-фазы являются склоны отдельных островов Курильской гряды, то первой вступает Т-волна, сформированная в области, где сейсмическая Р-волна прошла наибольший путь от эпицентра землетрясения, но при этом область располагается на наименьшем (акустическом) расстоянии от гидроакустического приемника. Далее вступают Т-волны, сформированные в областях по мере уменьшения их сейсмического пути до эпицентра при увеличении дальности до гидроакустических станций, которые соответственно растут и достигают максимума, соответствующего району (район  $T_{\max}$ ), где общие потери сигнала (сейсмического и акустического) минимальны. Для большинства случаев такие районы располагаются на минимальных расстояниях от эпицентра землетрясения. Далее вступают сигналы Т-волн с районов по мере их удаления от приемных станций и эпицентров землетрясения и соответственно уменьшающихся по уровню. На рис. 9.15. представлен интегральный уровень сигнала подводного землетрясения на северных Курилах, параметры которого по данным Южно-Сахалинской сейсмостанции следующие: дальность-6,  $\varphi = 157^{\circ}30'$  ВД,  $h=30$ км. Видно, что Т-фаза состоит из множе-

ства локальных максимумов. Из их числа можно выделить семь с временами запаздывания Т-фазы сигналов относительно моментов вступления продольной сейсмической волны:

$$t_{T_1} - t_p = 209c; t_{T_2} = 283c; t_{T_3} - t_p = 370c; t_{T_4} - t_p = 415c; t_{T_5} - t_p = 460c; \\ t_{T_{max}} - t_p = 519c; t_{T_6} - t_p = 541c.$$

Временные интервалы между наблюдаемыми локальными Т-максимумами и вступлением Р - волны рассчитаем по формуле [30,45]

$$t_T - t_p = \frac{\Delta p}{V} + \frac{\Delta_T}{c} - t_p,$$

где  $\Delta p$  и  $\Delta_T$  – расстояния от эпицентра до области генерации Т-фазы до места приема, соответственно;  $V$  и  $c$  – скорости продольной сейсмической волны и скорости звука в воде ( $V=8,0$  км/с;  $c=1,5$  км/с).

Расчеты показывают, что в формировании сигналов Т-фазы землетрясения принимают участие следующие острова Курильской гряды: о.Уруп ( $T_1$ ); о. Симушир ( $T_2$ ); о. Мотуа ( $T_3$ ); о.Шикотан ( $T_4$ ); о.Онекотон ( $T_5$ ); о.Парамушир ( $T_{max}$ ); о. Атласово ( $T_6$ ).

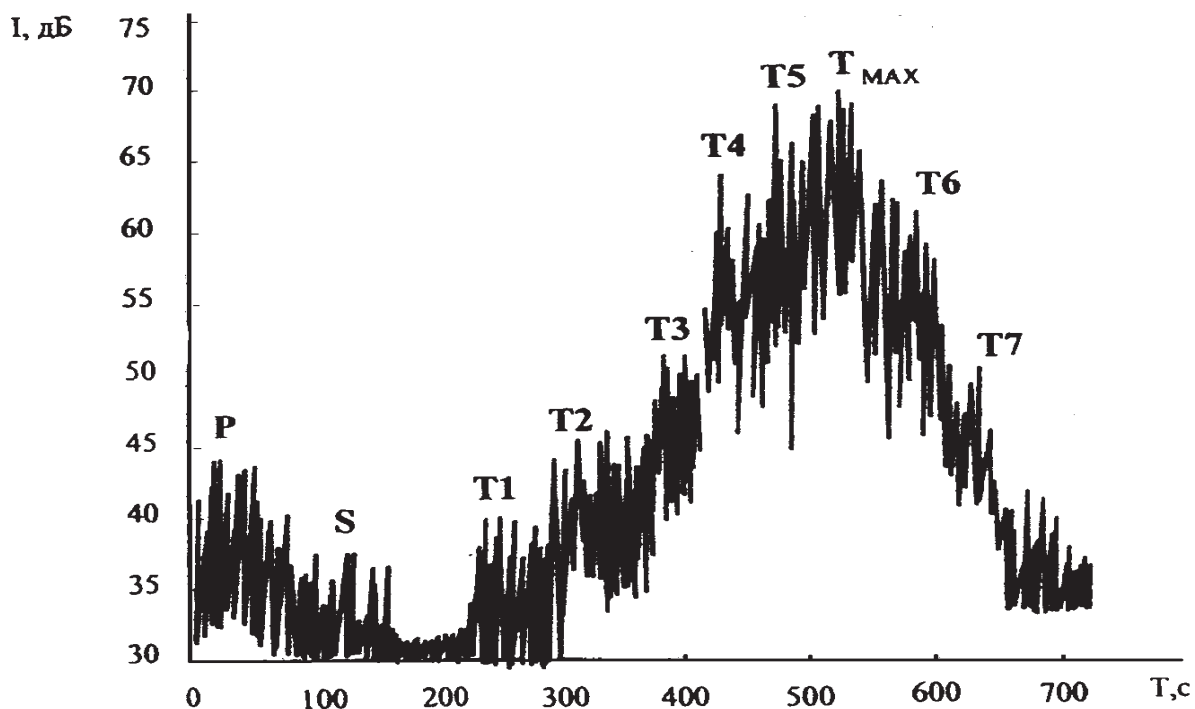


Рис. 9.15. Интегральный уровень сигнала землетрясения в полосе частот 0,5-60 Гц

Как видно из рисунка, в формировании акустической Т-фазы землетрясения участвуют острова, которые располагают крутыми склонами в направлении к приемной гидроакустической станции. Отмечено, что в формировании интегрального уровня сигнала (диапазон частот 5-60Гц) Т-волны высокочастотные компоненты оказывают небольшое влияние из-за низкого уровня. Сигнал с максимальным уровнем сигнала Т-фазы форми-

руется в районе о. Парамушир, который располагается ближе к эпицентру землетрясения. В этом случае  $\Delta p/V$  всегда почти на порядок меньше  $t_{T_{\max}} - t_p$ , поэтому неточности задания  $\Delta p$  и  $V$  не вносят заметных погрешностей при определении  $\Delta_{T_{\max}}$ . Опыт работы с различными фазами  $T_{\max}$  подтверждает данный вывод.

Большинство землетрясений в районе Курильской островной гряды происходит на океаническом склоне. Вследствие этого, форма принятых сигналов гидроакустическими станциями сильно зависит от их расположения. Если прием сейсмогидроакустических сигналов производится станциями, расположенными на юго-восточной части о. Сахалин (где были проведены множество записей сигналов Т-волн), то эти сигналы в большинстве случаев имеют определенную закономерность, которая заключается в следующем. Уровни Т-волн превышают уровни Р - волн с3-6 дБ для землетрясений с эпицентром в районе Южных Курил и до 20-30 дБ для землетрясений с эпицентром в районе северных Курил и Камчатки. Наглядным примером служат интегральные уровни землетрясений, приведенные в настоящей работе. Основной причиной данного факта является сильное затухание сейсмических волн на частотах выше единиц Гц, при относительно малых затуханиях акустических волн во время распространения сигналов. При регистрации Т - волн с помощью станций, расположенных на океаническом склоне, на близких расстояниях уровни Р - волны превышают уровни Т-волн. С ростом расстояния от эпицентра землетрясения до гидроакустических станций уровень Р - волн уменьшается, что может привести к повышению уровня Т-волн относительно Р - волн. Таким образом, если регистрацию Т-волн проводить с помощью сейсмогидроакустических станций, расположенных на о. Сахалин, то имеется возможность наблюдения за сейсмической обстановкой, включая слабые землетрясения, на всей Курильской островной гряде. Кроме этого, имеется возможность оперативно по данным сейсмогидроакустической станции локализовать эпицентр землетрясения. Кратко рассмотрим это. Сейсмическая активность, в основном, сосредоточена вдоль дуги Курильской гряды, которая представлена на рис. 9.16.

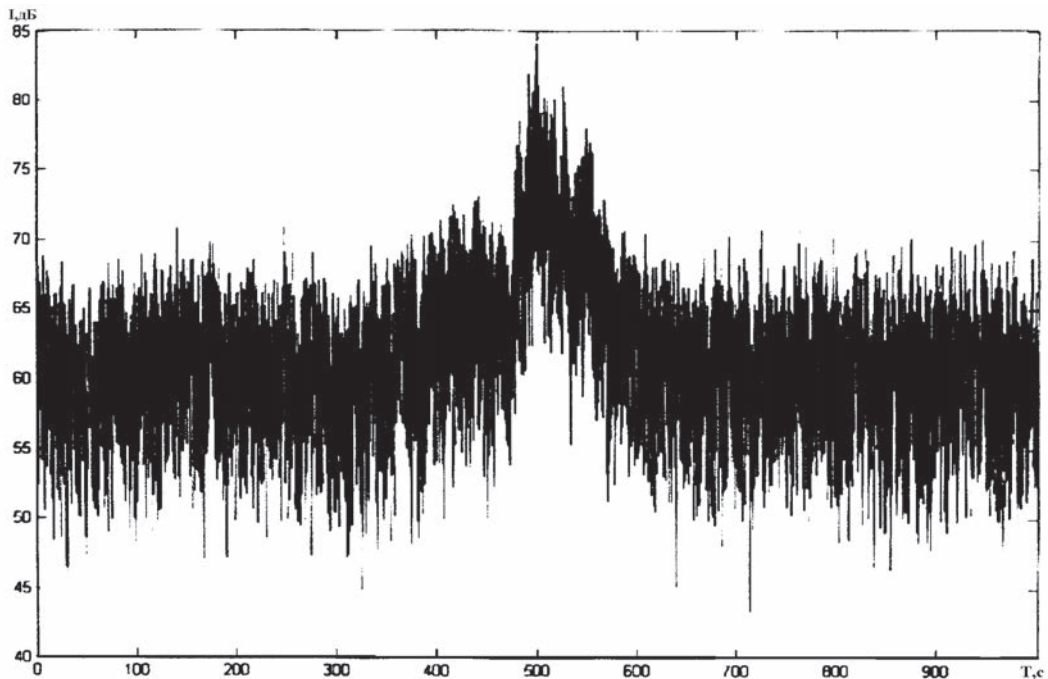


Рис. 9.16. Т-фаза сигнала слабого землетрясения

Рассчитаны ожидаемые разности времен вступления  $T_{\max}$ - и Р-волн ( $t_{T_{\max}}-t_p$ ) для станции, установленной в точке с координатами  $\varphi=46^{\circ}28,8'$ ,  $\lambda=143^{\circ}42,2'$  (юго-восточная часть о. Сахалин). На рис. 9.17 (а, б, в) представлены: запись амплитуды акустического сигнала относительно слабого подводного землетрясения, а так же его низкочастотный спектр и полиспектр [281,287,288]. Приведенные результаты свидетельствуют о возможности регистрации сигналов слабых землетрясений гидроакустическим просветным методом с использованием средств морского приборостроения.

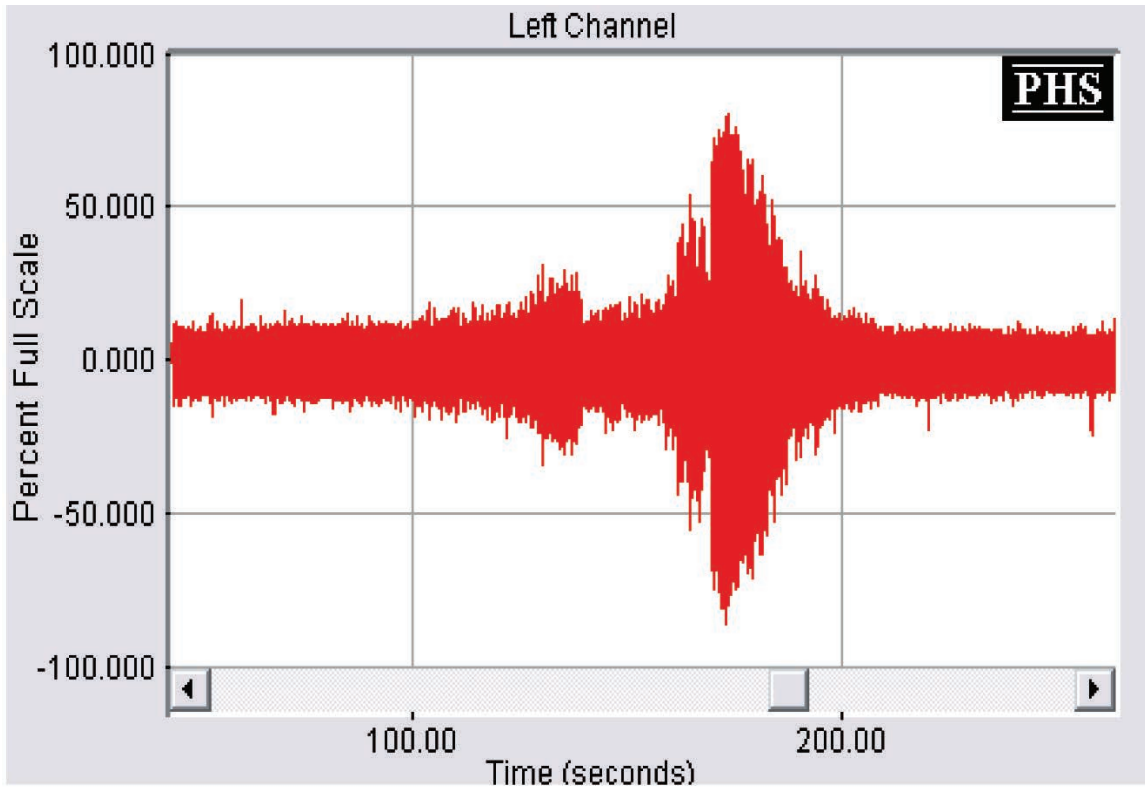


Рис. 9.17 а



Рис. 9.17 б



Рис. 9.17 в

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о необходимости проведения систематических сейсмоакустических исследований в диапазоне частот единицы – десятки Герц для выделения характерных признаков предвестников сильных землетрясений. В этой связи следует отметить – американскими вулканологами зафиксировано, что океанические разломы земной коры являются источниками низкочастотного излучения сейсмической энергии, опережающей на несколько минут сейсмическое событие.

Исследование необходимо вести по следующим направлениям:

- производить одновременный прием шумов океана на приемные антенны гидроакустических станций и сейсмические датчики в системе единого времени с целью обеспечения последующей корреляционной обработки, идентификации фаз сигналов от землетрясений;
- обеспечить синхронные долговременные непрерывные записи шумов океана сейсмического происхождения в двух и более пространственно-разнесенных точках океана;
- организовать быструю передачу многоканальной информации с береговых постов гидроакустической станции в региональный центр мониторинга сейсмической активности, например, по каналам космической радиосвязи;
- проработать организационно-технические вопросы в области конверсии по дополнительному оснащению вновь разрабатываемых гидроакустических станций аппаратурой донной сейсмической станции с передачей информации на береговой пост по подводной кабельной линии связи;
- разработать алгоритмы и программы расчетов сейсмической обстановки и прогнозирования о вступлении сильных землетрясений.

Программы будут проводить расчеты пространственно-временной структуры акустического поля морской среды и обеспечивать: выделение на их основе сигналов сейсмической природы на фоне шумов моря; совместную корреляционную обработку сигналов с сейсмических датчиков и акустических приемников; определение временной изменчивости шумов океана; расчет эпицентров сейсмических событий с привлечением данных о компоненте сейсмического сигнала (Т-фазе); анализ изменчивости передаточной функции гидроакустического канала в зоне вероятного сейсмического события. К настоящему времени, основная часть программ выполнена и эффективно используется в выполняемых работах [250-255,287,288].

Наблюдения за сейсмической активностью с помощью донных гидроакустических станций могут быть применимы для контроля напряженного состояния подводной час-

ти земной коры, обнаружения процесса аномального массового развития микротрещин, подготавливающего образование разломов и, следовательно, осуществления прогноза сейсмоопасного состояния региона. Развитая сеть непрерывного контроля подводных сейсмических явлений в акустическом диапазоне, многоканальная регистрация и комплексная интерпретация информации помогут более точно оценивать вероятные координаты предстоящего подземного землетрясения и его магнитуду.

### **9.9. Прогнозирование времени вступления опасных явлений по измерениям электромагнитных волн, формируемых в очаге землетрясения**

В разделе обосновывается практическая возможность оперативного упреждающего прогноза землетрясений и вступления волн цунами с повышенной вероятностью. Она основывается на принципе одновременного измерения упругих и электромагнитных волн от центра землетрясений.

Электромагнитные волны с частотой от 1 Гц до 1000 Гц хорошо проходят на поверхность Земли, возбуждают дно океана и уходят в открытый космос. При этом предполагается, что по времени прибытия электромагнитной волны в три (или более) точки можно определить координаты центра землетрясений. Измерение интенсивности принятого электромагнитного сигнала является информативным признаком прибытия разрушительных волн.

Метод снижения запасов энергии упругих волн в сейсмическом центре основывается на экспонировании электромагнитных волн в течение 30-50 дней в году. Именно эта закономерность положена в основу предлагаемого метода прогнозирования.

Экспериментально зарегистрировано, что в очаге землетрясения электромагнитное поле изменяется вместе с механическим движением частиц Земли в пространстве и времени. Изменение электромагнитного поля порождает электромагнитные волны различных типов, которые проникают в земную кору, водную толщу и выходят на земную поверхность и в космос.

В зависимости от электрических и магнитных характеристик слоя земной коры, морской воды и атмосферы электромагнитные волны, испускаемые очагом землетрясения, имеют различные физические характеристики, такие как интенсивность вектора электрического и магнитного поля, фазовая и групповая скорость распространения волн, волновое затухание и другие. Выбрав оптимальный измерительный датчик, можно с большой долей вероятности записывать изменения в электромагнитном поле, порождаемом очагом землетрясения. Поскольку скорость распространения электромагнитных волн в какой-либо среде гораздо выше, чем скорость распространения упругих волн, вполне возможно записать начало землетрясения специальными электромагнитными приемниками гораздо раньше, чем оно могло бы быть записано обычными приемниками упругих волн, потому что ускоренное движение очага землетрясения порождает электромагнитную волну. Это основной физический принцип, который позволяет делать правильный и незамедлительный прогноз землетрясений с вероятностью более чем 0,95. В зависимости от расстояния между очагом землетрясения и точкой на Земле может потребоваться всего лишь от нескольких секунд до сотен секунд, чтобы автоматически выключить газозаправочные и электростанции, остановить транспортные средства и другие автоматизированные производства. Однако этот временной интервал не-

достаточен для оповещения населения об опасности землетрясения, чтобы оно могло вовремя покинуть опасные районы.

По этой причине предлагается другой, более эффективный вид прогнозирования землетрясений, основанный на следующем физическом принципе. Когда электропроводящие слои Земли движутся с постоянной механической скоростью возле очага (или с локальным ускорением отдельных участков возле очага землетрясения), электромагнитные волны также порождаются в достаточно широком диапазоне частот от 0,1 кГц до 20 кГц и проявляются в постоянном магнитном поле Земли. Из-за случайного характера закономерностей порождения таких волн и большого затухания в электропроводящем слое земной коры, вероятность правильного прогнозирования землетрясений, как опасных явлений, повышается.

Тем не менее, временной интервал между прибытием информационных электромагнитных волн и разрушающей упругой волной в этом случае составляет от нескольких минут до нескольких часов. Этого времени вполне достаточно для оповещения населения о приближающемся разрушительном сейсмическом воздействии и времени прибытия этой разрушительной волны в конкретный район. Объединяя метод, предложенный выше, и обычные долговременные и краткосрочные методы прогнозирования землетрясений, можно заявить, что вероятность достаточно надежного прогнозирования землетрясений приближается к вероятности современных методов прогнозирования погоды.

Очаг землетрясения находится в электропроводящем слое земной коры. При медленном движении земных слоев из-за деформаций, магнитные и электрические волны изменяются, что записывается сенсорным приемником. Информация об изменениях в электромагнитных полях затем проходит через подводные кабели на подводный автономный центр обработки информации. Обработанная информация о приблизительных координатах очага землетрясения передается на поверхность океана и затем через радиопередающую систему искусственного спутника Земли на береговой центр обработки информации для принятия решения.

Если механические колебания участков Земли начинают двигаться с ускорением, вызывая генерацию электромагнитных волн, три или более антенн могут получить волну. По разнице между временем прибытия сигнала из очага на три антенны возможно определение фазового сдвига (смещения). В центре управления решается задача навигации, и определяются координаты очага землетрясения. Затем информация о точном местоположении очага землетрясения и его интенсивности передается через ретранслятор в береговую систему. После того, как проведен анализ характера изменений электрического сигнала, принимается решение о необходимости информирования населения о вероятности прибытия разрушительных волн в определенный район. На окончательной стадии кратковременного прогнозирования можно воспользоваться обычными методами и приборами для записи сейсмических волн в поверхностном слое океанического дна и гидроакустических волн в морской толще.

Однако известно, что горячие упругие волны приходят почти одновременно или после разрушительных волн. Для цунами, которое движется медленнее, чем упругие волны, такой дополнительный прогноз не представляет большой практической пользы. Поэтому прогнозирование изменяющихся электромагнитных полей в сейсмически опасных зонах имеет большую практическую ценность для подводных землетрясений, как с цунами, так и без.

При прогнозировании землетрясений очень большое значение имеет точное определение координат очага. Помимо трудностей, связанных с решением навигационной за-

дачи для источников в гетерогенных средах (таких как земная океаническая кора), при землетрясении возникает проблема случайной формы временного сигнала и углового соотношения, а также скорости распространения волн. Способы решения этой проблемы рассматриваются в теоретической части данной работы.

**Закономерности формирования электромагнитных волн в очаге зарождения землетрясения.** В работах [235,236,256] показана возможность генерации и измерения параметров бегущей электромагнитной волны при ускоренном движении очага землетрясения, расположенного в диэлектрическом слое. Детальное обоснование рассматриваемых закономерностей формирования и распространения электромагнитных волн в атмосфере Земли рассмотрено в известных работах по радиофизике.

Диэлектрический слой земной коры может лежать в узком диапазоне глубин от 6000 до 15000 метров. Поскольку очаг землетрясения может быть расположен в более широком диапазоне глубин от 3000 до 10000 метров и более, где среда хорошо проводит электрическое поле, в которой возможно рассматривать генерацию электромагнитных волн.

В качестве источника электромагнитных волн в очаге землетрясения, можно рассматривать объем участка земной коры  $W$ , который движется в магнитном поле Земли  $\bar{H}_E$  с постоянным ускорением. Общий объем участка можно разбить на более малые объемы  $w$ , движущиеся в магнитном поле земли с постоянными скоростями  $\bar{V}$ . Предположим, что сигнал  $H(c)$ , генерируемый очагом землетрясения, представляет собой гармонический сигнал. В реальной модели взрывной волны в очаге землетрясения будет рассматриваться только как линейный член.

Такая аппроксимация верна только для достаточно длинных расстояний от места взрыва, где сгенерировалась бегущая электромагнитная волна. Электрическое сопротивление в различных слоях Земли и морской воде пусть будет  $\rho_n$ , магнитная проницаемость среды –  $\mu_n$ , диэлектрические константы –  $\delta_n$ . Для такой физической модели математическое моделирование, описываемое двумя уравнениями Максвелла-Лоренца в гармонических условиях, является вполне приемлемым (верным). Для зависимости по времени первичной гармоники с круговой частотой  $\omega = 2\pi f$  (где  $f = (2\pi)/T$  - циклическая частота,  $T$  - временной период) уравнение может быть записано следующим образом

$$\text{rot}\bar{E} = \gamma\{\bar{E} + \mu[\bar{V} \times (\bar{H}_e + \bar{H})]\} \quad \text{rot}\bar{E} = i\omega\mu\bar{H}, \quad (9.3)$$

где  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Hn/m) - магнитная проницаемость вакуума,  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость материала,  $H_E$  – интенсивность постоянного магнитного поля Земли;  $E$ ,  $H$  – комплексные значения амплитуд интенсивности индуцированного (возбужденного, генерируемого) электрического и магнитного поля. Для небольшой частоты  $\omega$  потоки смещения не учитываются, пока выполняется неравенство  $|\bar{H}| \ll |\bar{H}_E|$ . После стандартных преобразований дифференциальное уравнение для генерируемого магнитного поля может быть записано как

$$\Delta\bar{H} + k^2\bar{H} = \mu\gamma\text{rot}[\bar{V} \times \bar{H}_E], \quad (9.4)$$

где  $\Delta$  – лапласиан,  $k = 2\pi/\lambda = \omega/c(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  волновое число,  $\lambda$  – длина электромагнитной волны с круговой частотой  $\omega$  и фазовой скоростью распространения  $c$ . Скорость



перемещения  $\bar{V}$  определяется решением соответствующей задачи механики для непрерывных сред или вычисляется в соответствии с натурным экспериментом косвенных измерений. Аналитическое решение некоторых моделей также возможно. Самой общей моделью для этого решения может быть функция Грина для произвольных поверхностей  $S$  ограниченных объемов  $W$ . Для этого случая уравнение (9.4) может быть записано следующим образом

$$\Delta \bar{H} + k^2 \bar{H} = \delta(\bar{r} - \bar{r}_0) \quad (9.5)$$

если в правой части есть дельта-функция Дирака. Для строго решения уравнения (9.4) необходимо найти функцию Грина из уравнения (9.5) при заданном соотношении между волновым числом и координатами  $K = k(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  и граничными условиями, соответствующими физическому модулю. Например, для горизонтальных слоев мы можем вывести следующие условия на границе  $m$  и  $(m+1)$  слое

$$\left. \begin{aligned} H^{(m)} &= H^{(m+1)} \\ \rho_m \frac{\partial H^{(m)}}{\partial n_m} &= \rho_{m+1} \frac{\partial H^{(m+1)}}{\partial n_{m+1}} \end{aligned} \right\}, \quad (9.6)$$

где  $\bar{n}_m$  – внешняя нормаль, относящаяся к поверхностному разделу  $m$  слоя.

Для поверхности произвольной формы граничные условия усложняются из-за требований непрерывности тангенциальных компонентов поля. Однако, основные положения и посылки, полученные для математических моделей (9.4) и (9.5), при граничных условиях (9.6) могут быть применены к более сложным условиям непрерывности на поверхностях произвольной геометрии. Следует отметить, что условия (9.6) также применяются к поверхностям с цилиндрической и сферической границами. Если центр симметрии увеличивается с началом криволинейной системы координат, тогда можно полагать, что модели (9.4-9.6), позволяют решить общую задачу по излучению волн очагом или центром землетрясения как для модели с плоским слоем, так и для симметрии со сферическим слоем.

Сначала выполним ряд оценок в соответствии с моделями (9.3-9.5), чтобы доказать реальную возможность записей электромагнитных полей с помощью существующих измерительных приемников электромагнитных полей с очага землетрясения.

Таким образом, горизонтальные движения пластов постоянной скорости не возбуждают (генерируют) вертикальных компонент магнитного поля точек. Этот принцип может рассматриваться как один из объективных критериев накопления механической энергии в очаге землетрясения, который выполняется в соответствии с величинами векторных компонент в магнитном поле Земли.

Основываясь на этих соображениях можно полагать, что при изменении траектории движения слоев вдоль вертикального компонента (когда появляются условия для генерации деструктивных упругих волн), совершенно определенно должны генерироваться магнитные поля с вертикальным компонентом. Это изменение должно учитываться также при измерении индуцированного магнитного поля в регионе землетрясения.

Поскольку электромагнитное поле горизонтального движения гальванической природы, оно очень слабо проникает через диэлектрический слой. В тоже время другие ти-

пы генерируемых полей негальванической природы легко проникают через диэлектрические слои земной коры. Это является третьим отличительным признаком начала опасных вертикальных движений подземных слоев, которые могут произойти в течение от нескольких дней и ночей до нескольких часов перед началом катастрофического возмущения земной коры в очаге землетрясения.

Однако, для того чтобы определить координаты очага землетрясения, необходимо измерить временные задержки сигнала между тремя или более точками с известными координатами в системе координат, связанной с Землей. Это означает, что необходимо измерить не только вариации измерений магнитного поля и электрического поля, связанного с магнитным полем, но и необходимо измерить параметры волны: ее амплитуду и слой между очагом (источником генерации волн) и фиксированными антеннами – приемниками.

Эта задача сводится к решению хорошо известной навигационной задачи взрывного сигнального источника (произвольного широкополосного сигнала). Несмотря на то, что решение этой задачи очень сложное, она была решена для ряда инженерных проектов (когда среды и границы однородны). В этом случае строгое решение уравнения (9.4) может быть использовано для расчета поперечно сужающейся сферической волны. Амплитуда и фаза этой волны изменяются в соответствии с вероятностными законами траекторного распространения сигнала. Полученные координаты очага землетрясения измеряются на глубине источника сигнала не более чем 100-150 км и расстоянии между измерительными антеннами 1000-1500 км. В этом случае влияние границ слоев на сигнал нельзя не учитывать.

Таким образом, физической моделью источника генерации сейсмического сигнала является сегмент Земли в очаге землетрясения. Сегмент ограничен сферическими поверхностями и имеет постоянные магнитные и диэлектрические константы. Сформированная широкополосная сейсмическая волна распространяется в линейном приближении. Магнитные и диэлектрические константы Земли есть координатная функция  $\mu = \mu(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  и  $\varepsilon = \varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ . Для того, чтобы применить хорошо разработанную теорию навигационных задач для однородной безграничной среды к сегменту Земли, необходимо решить уравнение (9.5) с учетом неоднородного волнового числа  $k = \omega/c(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ , где  $c^{-2}(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = \mu(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \cdot \varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  и обратные граничные условия на сегменте. Решением уравнения (9.6) будет функция Грина

$$G[M(\xi_1, \xi_2, \xi_3)M_0(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] = \bar{N}(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_{01}, \xi_{02}, \xi_{03}). \quad (9.7)$$

Она является пространственным аналогом сферической и цилиндрической функции Грина для свободного пространства. Поэтому, зная ее точное аналитическое решение, можно применить к ней аналоговые алгоритмы обработки частотной и временной информации, использующиеся для безграничного пространства. В этой связи, одной из главных теоретических проблем в решении навигационной задачи определения координат очага землетрясения, является строгое аналитическое решение уравнения (9.7) для функции Грина с граничными условиями, но при условиях непрерывности и их тангенциальных компонент магнитного поля.

В этой работе рассмотрим решение только двухмерной задачи с цилиндрической симметрией. Обобщение на трехмерную сфероидальную задачу не раскрывает сущность явления, но значительно увеличивает объем формы. Решим уравнение (9.5) в кри-

волинейной геодезической системе координат для двухмерной симметрии  $\xi_1 \xi_2$ , где  $\xi_1 \xi_2$  являются геодезическими координатами электромагнитных волн. Введем координаты  $\xi_1 \xi_2$  из условия  $d\xi_1 = k_0 dn(x, y)$ ,  $d\xi_2 = k_0 dn(x, y)$ , где  $x, y$  – плоскостная декартова прямоугольная система координат.  $n(x, y) = \frac{k(x, y)}{k_0(x_0, y_0)} = \frac{c_0(x_0, y_0)}{c(x, y)}$  является безразмерной величиной, описывающей показатель индекса рефракции электромагнитных волн внутри исследуемого сегмента земной коры.

В этом случае уравнение (9.5) может быть записано как

$$\Delta_{\xi_1, \xi_2} \bar{H} + k_0^2 \bar{H} = \delta(\bar{r}_{\xi_1, \xi_2} - \bar{r}_{0\xi_1, \xi_2}), \quad (9.8)$$

где  $\Delta_{\xi_1, \xi_2}$  – лапласиан в геодезической системе координат,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – являются константами,  $\lambda_0$  – длина волны в однородных средах с фазовой скоростью  $c_0(x_0, y_0)$ ;  $\bar{r}_{\xi_1, \xi_2}$  и  $\bar{r}_{0\xi_1, \xi_2}$  – расстояние между очагом землетрясения (точка  $M_0$ ) и точкой наблюдения. В системе координат  $\xi_1 \xi_2$  уравнение (9.8) может быть решено в рамках теории ортогональных систем координат.

Для этой цели необходимо заменить граничные условия, описывающие реальную геометрию задачи на геодезические поверхности в координатах  $\xi_1 \xi_2$ . Обобщенные законы Снеллиуса для цилиндрических волн могут быть записаны по аналогии с формулами, приводимыми в работе [251], следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \varphi_\xi - \varphi_{\xi_{otr}} - n\pi(\varphi_\xi - \varphi_{\xi_0}), \quad (\varphi_\xi - \varphi_{\xi_{pr}}) = \arctg \left[ \sqrt{\frac{c_j}{c_{j+1}}} \operatorname{tg}(\varphi_\xi - \varphi_{\xi_0}) \right] \\ r_{\xi_{otr}} = r_{\xi_0}, \quad r_{\xi_{pr}} = r_{\xi_0} \frac{c_j \cos(\varphi_\xi - \varphi_{\xi_0})}{c_{j+1} \cos(\varphi_\xi - \varphi_{\xi_{pr}})} \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

где  $\varphi_\xi, r_\xi$  – угол и расстояние до точки наблюдения,  $\varphi_{\xi_0}, r_{\xi_0}$  – угол и расстояние до точки предполагаемого изменения точки  $m_{\xi_0}$ . Индекс  $\xi$  в обозначении угла и расстояния показывает, что измерение проводится в геодезической криволинейной системе координат  $\xi_1, \xi_2$ .

Точное аналитическое решение уравнения (9.9) в геодезических координатах может быть записано как

$$\Phi(\varphi, r_1) = H_0^{(1)} \left( \frac{2\pi f}{\varepsilon \cdot \operatorname{Koeff}(r_1)} \cdot R(\varphi, r_1) \right) + K_{ot}(\varphi) H_0^{(2)} \left( \frac{2\pi f}{\varepsilon \cdot \operatorname{Koeff}(r_1)} \cdot R(\varphi, r_1) \right) \quad (9.10)$$

где  $H_0^{(1)}, H_0^{(2)}$  – функции Ханкеля первой и второй степени  $\operatorname{Koeff}(r_1) = r_1^{2/3} \cdot 0.4$ .

Можно видеть, что решение (9.10) является точным решением уравнения (6) для «цилиндрической» границы полупространства с индексами "j" и \*, где "j+1", где  $k_{0j} = \omega/c_{0j}$ ,  $k_{0j+1} = \omega/c_{0(j+1)}$  – волновые числа в полупространствах с индексами "j" и

"j+1". Для среды с бесконечно большим электрическим сопротивлением (диэлектрик)  $V_r \rightarrow \infty$ ,  $\rho_{r+1} \rightarrow \infty$  волновое число  $k_0$  и  $k_{0(j+1)}$  являются действительными числами. В общем случае, когда сопротивления  $\rho_r$  и  $\rho_{j+1}$  конечные величины, магнитные и диэлектрические константы могут быть записаны как комплексные числа

$$k_j = k_j^0 + ik_j^r, \text{ где } k = \frac{\omega}{\varepsilon} = \frac{\omega}{\varepsilon'(1 + \eta_c)} = k' + ik''$$

Полученные решения легко просчитываются с помощью современных компьютеров.  $K(r) = \sqrt{\alpha r}$ ,  $\alpha$  – коэффициент.

Время расчета на компьютере Pentium с 16 Мб оперативной памяти составляет 60 с.

Другие способы решения – такие как метод нормальных волн, приводят к аналитическим решениям типа двоичных связанных рядов.

Численные вычисления в этом случае достаточно сложны. Вычисления по предложенным алгоритмам (9.10) в каждом реальном случае могут быть более сложными. Однако, они вполне применимы для решения практических задач. Так, например, на начальном этапе изучения процесса распространения волн в реальной зоне нет необходимости получения строгих решений волновых уравнений типа (9.5, 9.7). Для приближенных вычислений поля в различной среде можно воспользоваться ранее рассмотренными упрощенными расчетами.

## **9.10. Прогнозирование сильных землетрясений по признакам проявления электромагнитных волн в атмосфере**

Предложенный выше подход к решению проблемы прогноза и мониторинга подземных землетрясений, делает возможным использование сложных, но высокоэффективных методов борьбы с ущербом, причиняемым различными природными катастрофами [235,236,250-256].

Однако, надежная и хорошо обоснованная практическая реализация проекта невозможна без учета строгой и точной теории дифракции и распространения электромагнитных волн внутри Земли и границ «Земля – Океан» и «Земля – Воздух», а также «Земля – Атмосфера».

Исходя из этого, предлагается достаточно строгая математическая модель, которая позволяет найти распространение электромагнитных волн в гетерогенных слоевых средах при условии, что фазовая скорость волн зависит от координат. Она сводится к решению волнового уравнения (или уравнения Гельмгольца) для гармонической аппроксимации в геодезических криволинейных координатах. В этом случае считаем, что в геодезических координатах вполне возможно воспользоваться обобщенными законами рефракции волн и теорией «направленной функции Грина». Строгое решение уравнения Гельмгольца в терминах функции Грина позволяет решить не только прямую задачу анализа подземных приемных антенн, но также позволяет сформулировать правильную обратную задачу синтеза подземных антенн.

Строгое решение теоретической проблемы анализа и синтеза антенн для данной ситуации позволяет дать некоторые практические рекомендации по конструированию подземных систем для прогноза и мониторинга землетрясений.

Практическая реализация этих систем и их производство требуют дальнейшего изучения.

Эффективный алгоритм определения очагов подводных и подземных землетрясений выполняется следующим образом. В некоторых точках пространства проводятся измерения вариаций магнитных (упругих) полей, их горизонтальных и вертикальных компонент одновременно. Эти измерения могут продолжаться от 30 до 60 суток.

В тот момент, когда вертикальная компонента магнитного поля резко возрастает с горизонтальной составляющей необходимо включить приемные антенны электромагнитных волн.

Главным требованием для работы системы электромагнитных антенн является наличие возможности измерения фазовой разницы (временной задержки) между тремя или более антеннами, расположенными на расстоянии от 500 до 1500 км. Решив задачу определения координат случайного излучателя электромагнитных волн (очага землетрясения), можно определить координаты очага землетрясения с погрешностью.

$$V^2 = (0.1 \div 0.2)\bar{\lambda}$$

где  $\bar{\lambda}$  – средняя длина волны.

Осуществив анализ изменений интенсивности прибывающего электромагнитного сигнала в течение 24 – 48 часов, можно оценить природу механических процессов, происходящих в очаге землетрясения. Во время анализа закономерностей изменения электрического сигнала и сильного роста его интенсивности вполне возможно оценить интенсивность упругой волны с вероятностью  $p > 0.95$  за 25-15 минут до начала механического взрыва и прибытия упругой волны в конкретный регион. Проблемы мониторинга механических напряжений в очаге землетрясения более трудоемки и требуют больше затрат по сравнению с прогнозированием электромагнитных волн. Однако эта проблема может быть технически решена с помощью существующих резистивных мощных антенн или паровых электрических станций. Общая мощность электромагнитной энергии, закачиваемой под землю, не должна превышать 30-60 дней в году. В целом, проблема определения места зарождения землетрясения решена достаточно сложно и неоднозначно, в этой связи, она до настоящего времени не реализована.

Прогнозирование подводных землетрясений только по информации стационарных гидроакустических станций малоэффективно. В этой связи для более полной достоверности прогноза необходимо комплексно анализировать информацию от различных средств наблюдения: сейсмоакустических, гидроакустических, сейсмических, электромагнитных, радиофизических и других средств наблюдения сейсмической обстановки.

**Заключение по разделу.** На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований проведено обоснование возможностей прогнозирования и упреждающего оповещения населения и специальных служб о вступлении сильных землетрясений. К сожалению, на данном этапе в работе проведено только обоснование возможных практических путей прогнозирования сильных землетрясений. Они основаны на большом объеме теоретических и экспериментальных исследований материалов дальневосточных ученых и инженеров в области сейсмических, синоптических и гидродинамических процессов в атмосфере и океане и земной коре, в качестве которых рассматривались:

– внутренние волны морской среды, как предвестники сильных землетрясений за время прохождения полного синоптического цикла в переходной зоне Охотского и Японского морей;

– низкочастотные акустические Т-волны, порождаемые землетрясениями, с их последующей регистрацией акустическими системами после разворота на акваториях шельфовых зон;

– низкочастотные электромагнитные волны, возбуждаемые земной поверхностью и фокусируемые в атмосфере;

– параметрический прием акустических, электромагнитных и гидродинамических волн, создаваемых подводными землетрясениями просветными измерительными системами, формируемыми на основе средств морского приборостроения.

– обоснована возможность комплексной регистрации признаков этих колебаний, на основе измерительных технологий низкочастотно нелинейной просветной гидроакустики.

На основании результатов теоретических исследований и экспериментальных наблюдений поведения сейсмической активности земной коры при воздействии на нее распределенной атмосферной нагрузкой продолжительной длительности было получено решение бигармонического уравнения, описывающего процесс механического изгиба неограниченной по площади земной плиты, сделана попытка оценки толщины ее слоя, вовлекаемой в колебание изгиба земной коры. В этих экспериментах были получены также оценки погрешности расчетной формулы, а также решены методические вопросы, связанные с организацией проводимых измерений.

Использование современных измерительных сенсоров электромагнитных волн, а также приемников электромагнитных волн позволяет значительно повысить надежность и правильность прогнозирования землетрясений и цунами. Теоретически доказано, что вероятность правильного прогноза (определения очага землетрясения и его интенсивности) может превышать величину вероятности 0,95 за 20-30 минут перед прибытием деструктивной упругой волны. Экспериментальные исследования приема электромагнитных волн в пространстве находятся в хорошем соответствии с теоретическими допущениями, сделанными в данной работе.

Теоретически доказано, что с помощью электромагнитных волн, излучаемых в очаге землетрясения вдоль подземного туннеля, возможно уменьшить или отследить механические напряжения в очаге землетрясения. При наличии очага землетрясения, испускаемого электромагнитными волнами в течение 30–60 дней в году, можно ожидать уменьшение вероятности катастрофических взрывов и механического смещения.

Решение сложной и актуальной задачи по определению места очага землетрясения и по своевременному оповещению о нем по основным критериям обосновано и разработано, но до настоящего времени практически не реализовано. Обнаружение координат и времени вступления опасных последствий от сильных землетрясений по акустическим измерениям их предвестников также разработано, но, к сожалению, реализуется неэффективно. Перспективным путем реализации этих направлений (прогнозирование и оповещение) может быть разрабатываемое в настоящее время широкомасштабное сейсмоакустическое наблюдение этого явления в создаваемой региональной системе освещения подводной обстановки.

## **10. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, ИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕАЛИЗАЦИЯ В СОЗДАНИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА И ЗЕМНОЙ КОРЫ**

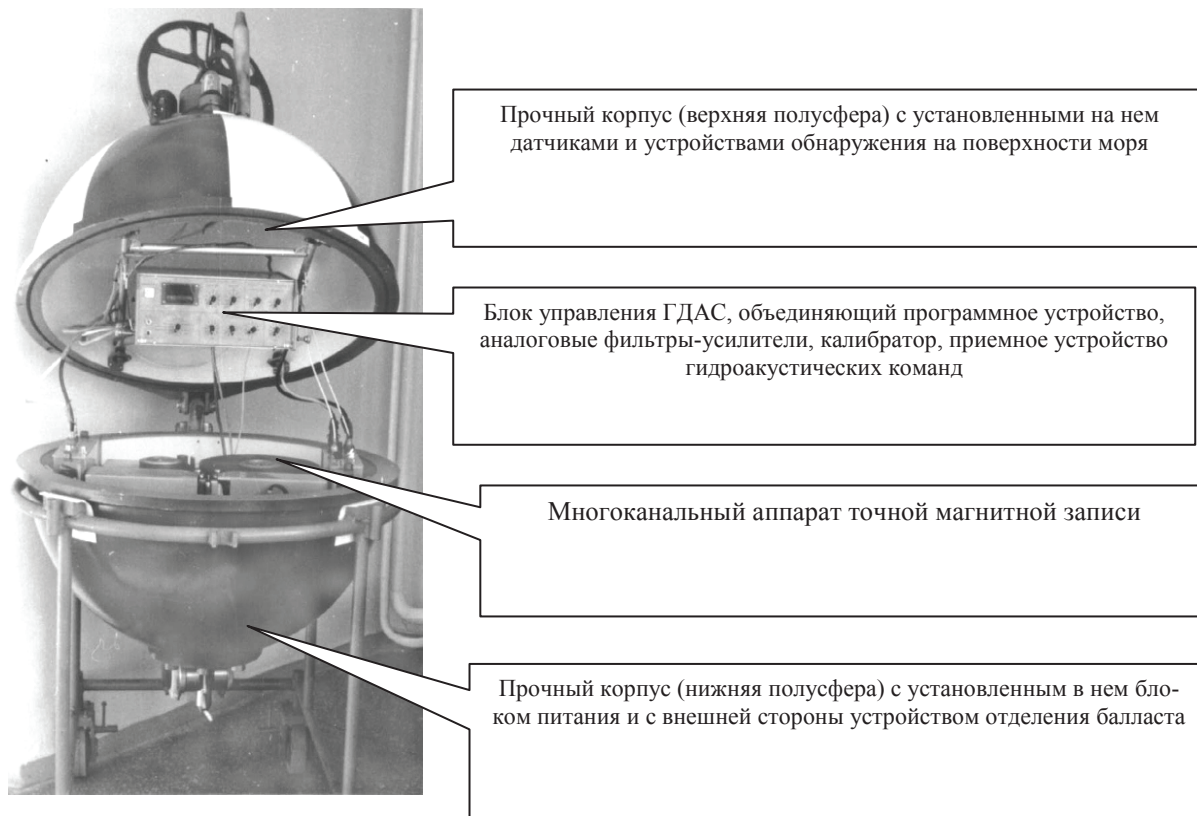
### **10.1. Глубоководные донные автономные станции в системе мониторинга полей морских акваторий**

Важное место в создании и развитии системы контроля морской деятельности для прибрежных и глубоких районов занимает решение проблемы создания и серийного изготовления глубоководных донных автономных станций (ГДАС). Первые проработки показали, что достижение высокой надежности аппаратуры в условиях длительных морских экспедиционных работ и глубоководных постановок станций, требует специальных конструкторских и технологических решений при создании образцов аппаратуры.

Многолетний опыт разработки, создания и испытаний различных образцов ГДАС в морских условиях, а также технологий их эффективного использования в макетах систем мониторинга полей морских акваторий обобщены и изложены в отчетах о НИР, статьях и докладах на акустических конференциях [13-20]. Первые опытные образцы акустических ГДАС серии «Монитор» созданы в 1986–89 годах и предназначены для измерения и регистрации фоновых гидроакустических полей на глубинах до 5000 м в автономном режиме работы. Установка ГДАС на дно обеспечивается свободным погружением с помощью балласта на гайдропе и всплытием на поверхность за счет положительной плавучести прочного корпуса при отделении балласта. ГДАС могут работать в комплекте до 5 шт., при этом обеспечивается независимое управление по гидроакустическому каналу и автономное измерение взаимной дистанции после постановки на дно. ГДАС обеспечивает усиление, предварительную обработку и регистрацию на 14-канальный измерительный магнитограф гидроакустической информации с вертикальной гирлянды гидрофонов или с гидрофона на корпусе станции с включением по заданной программе: магнитного регистратора; измерителя глубины (ИГ); системы измерения дистанции; исполнительного механизма сброса балласта (ИМСБ).

Прочный корпус, состоящий из двух полусфер, выполненный из высокопрочного алюминиевого сплава, обеспечивает защиту от гидростатического давления на глубинах до 5000 м. ГДАС в транспортном положении, а также при подготовке и проверке перед постановкой в море размещается на транспортировочной тележке, оснащенной подъемным механизмом для верхней полусферы (рис.10.1.) [16,19,90].

Привязка кода времени, регистрируемого на магнитную ленту, к единой системе точного времени на обеспечивающем судне или на нескольких ГДАС осуществляется от стабильного кварцевого генератора с точностью не хуже  $5 \cdot 10^{-8}$  за 10 суток. По гидроакустической команде, передаваемой с обеспечивающего судна, возможно включение аппарата магнитной записи и механизма сброса балласта (всплытие станции). Опытные образцы ГДАС являются результатом отработки, оптимизации и экспериментальной проверки технических решений, в результате проведенных научно-исследовательских работ СКБ САМИ ДВО РАН, выполняемых в последние десятилетия прошлого столетия и по настоящее время [1,2, 90, 232-234, 242-256].



*Рис. 10.1.* Внешний вид ГДАС «Монитор» на монтажно-транспортной тележке

Состав комплекса глубоководных донных станций (ГДАС) серии «Монитор» приведен на рис. 10.2., а структурная схема ГДАС серии «Монитор» приведена на рис. 10.3.

Для учета гидрологической обстановки во время работы комплекта ГДАС одна из ГДАС комплекта оснащается датчиками глубины, температуры, скорости звука с микропроцессорной системой сбора и обработки измерительной информации, которая измеряет и заносит в память профиль скорости звука во время погружения станции. Основные характеристики ГДАС серии «Монитор» приведены в таблице 10.1.

Специализированный комплект судовой аппаратуры для диагностики и предварительной проверки ГДАС (рис.10.4.) обеспечивает оперативность подготовки ГДАС к автономной работе и надежность ее работы в автономном режиме. Основные функции этого комплекта:

- оперативная перезарядка источника питания ГДАС;
- сведение опорных генераторов системы измерения дистанции;
- диагностика аппарата точной магнитной записи;
- подготовка магнитной ленты для аппарата точной магнитной записи;
- диагностика цепей питания ГДАС перед постановкой;
- формирование гидроакустических команд управления ГДАС.

Применение судовой аппаратуры для подготовки ГДАС в морских условиях технологически обеспечивает время полной подготовки комплекта из 5 ГДАС к автономной работе в течение 4 часов. Комплект специальных устройств постановки и выборки ГДАС с борта судна позволяет производить работы при волнении до 5 баллов, обеспечивая постановку и выборку в течение 10 – 15 минут (рис. 10.5).



### Комплект ГДАС

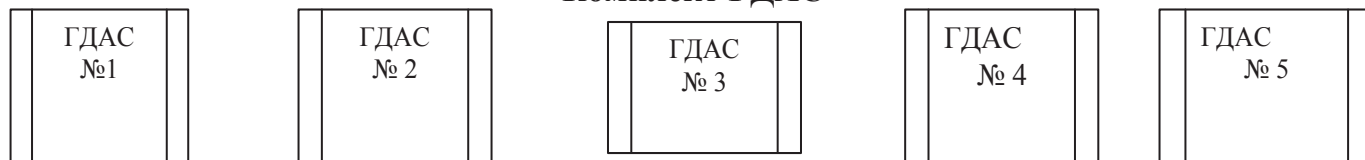


Рис. 10.2. Состав комплекса глубоководных донных станций (ГДАС) серии «Монитор»

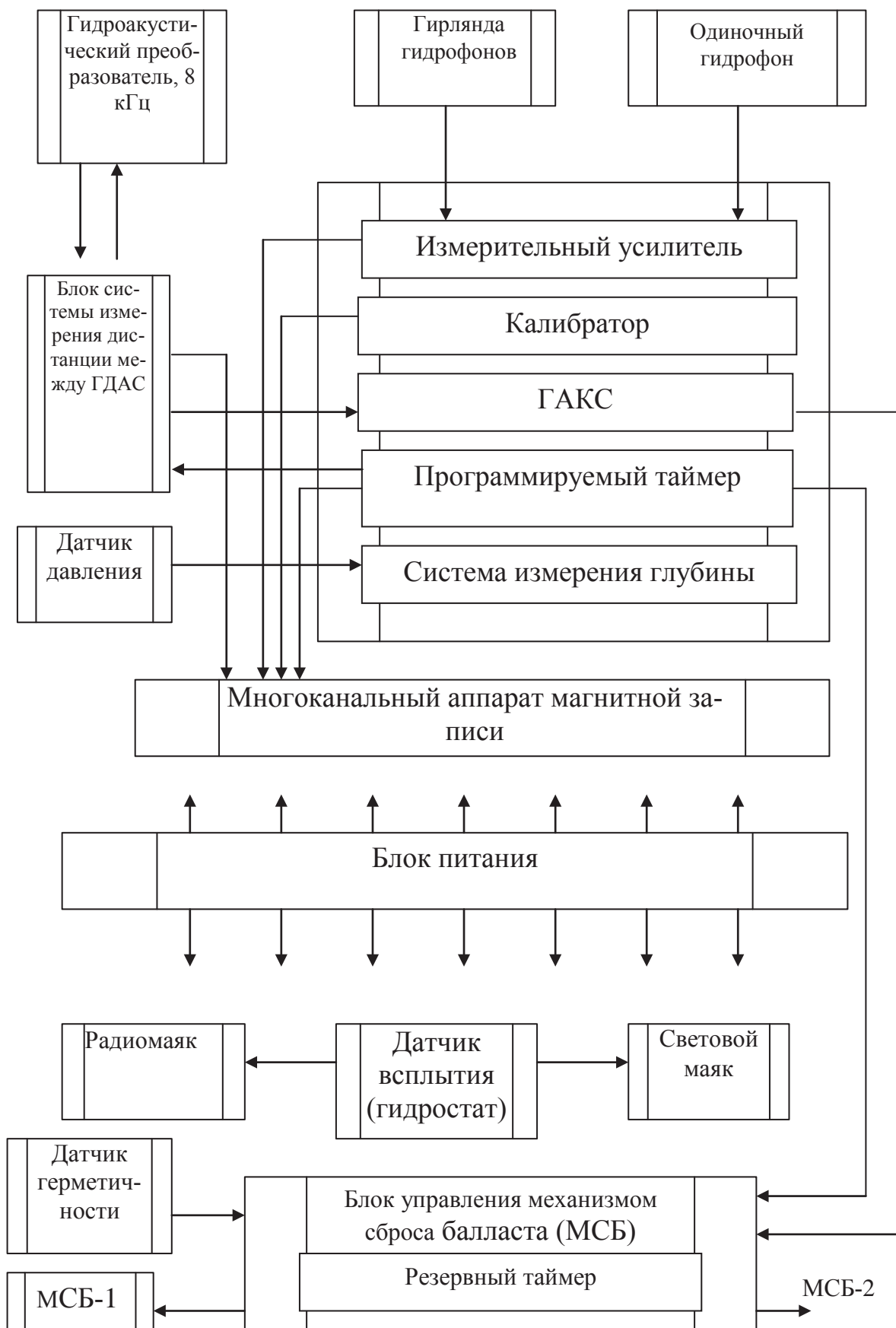


Рис. 10.3. Структурная схема ГДАС серии «Монитор»

## Основные характеристики ГДАС серии «Монитор»

Параметр	Значение
Предельная глубина постановки	5000 м
Максимальная длительность автономной работы	10сут
Длительность непрерывной регистрации данных на магнитную ленту в диапазоне частот: 1 ... 500 Гц 1 ... 100 Гц	12 часов 70 часов
Динамический диапазон приемно-регистрирующего тракта	70 дБ
Основная доверительная погрешность приемно-регистрирующего тракта	2 дБ
Погрешность системы измерения взаимной дистанции	6 м
Погрешность измерения глубины постановки	2 %
Автономность	10 суток
Вес на воздухе	200 кг
Диаметр прочного корпуса	925 мм

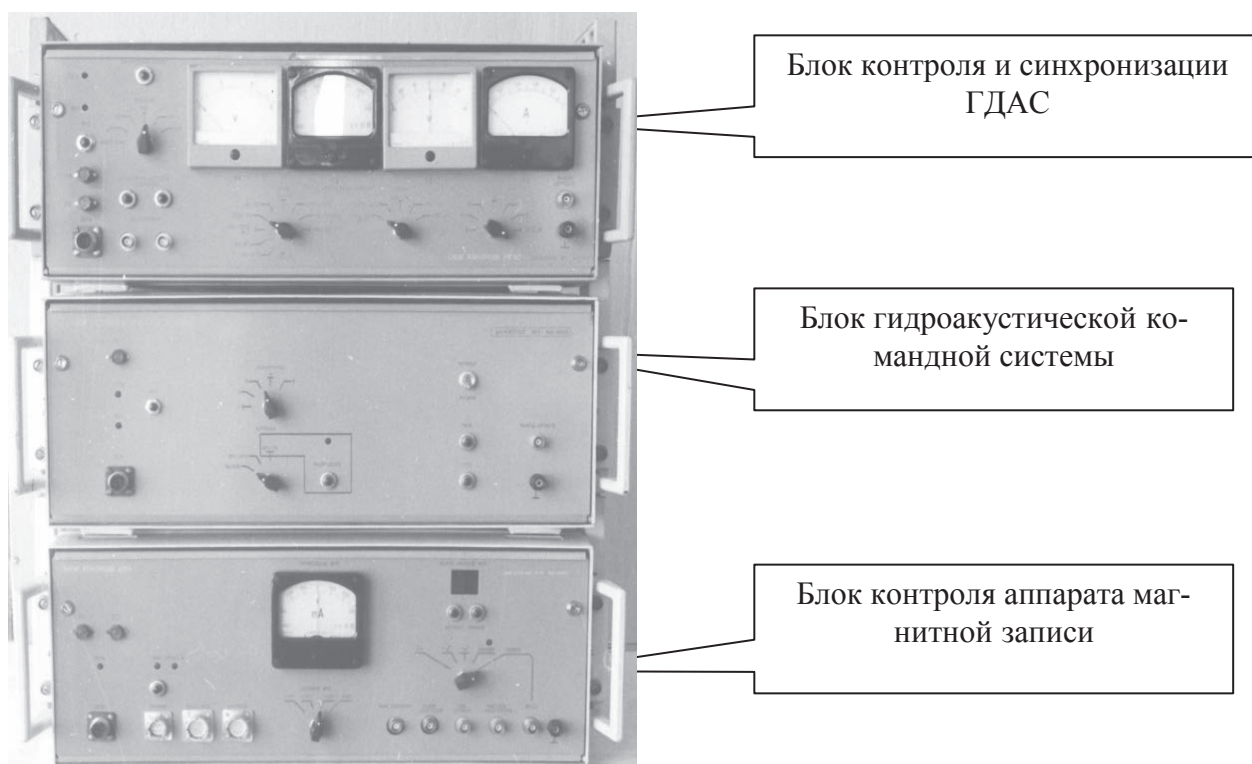


Рис. 10.4. Внешний вид судовой аппаратуры для обеспечения работы ГДАС



*Рис. 10.5.* ГДАС серии «Монитор» с комплектом гидрофизических датчиков после всплытия на поверхность моря

Около ста экспериментальных и опытных образцов ГДАС различных модификаций используется в научных экспериментах во всех районах Мирового океана. Рядом институтов Академии наук СССР, организаций ВМФ с использованием экспериментальных и опытных образцов ГДАС было проведено более 300 постановок ГДАС в различных районах Мирового океана.

Дальнейшее развитие автономной гидроакустической аппаратуры основано на применении технологий цифровой обработки и регистрации гидроакустических сигналов, использовании информационно емких принципов телеуправления и передачи информации по гидроакустическому каналу связи, позволяющих позиционировать установленные ГДАС с корабля – постановщика с совместным применением системы измерения дальности до установленной ГДАС и навигационной системы ГЛОНАСС. Развитие систем связи на базе низколетящих спутников позволяет применить их для передачи по радиоканалу предварительно обработанной и закодированной информации с поверхности моря на приемные центры в любой точке Земного шара.

Структурная схема комплекта ГДАС серии «Магна» с подсистемой передачи информации с поверхности моря на обеспечивающий корабль или на береговой информационный центр приведена на рис. 10.6.

Система ГДАС для решения этой задачи состоит из 5 ГДАС с комплектом всплывающих модулей передачи данных спутниковой системы связи (ВМ ПД). В количестве 10 модулей на каждую ГДАС, комплекта судовой аппаратуры, обеспечивающей подготовку в судовых условиях ГДАС и ВМ ПД к автономной работе, постановку ГДАС и ВМ ПД, проверку их функционирования в автономных условиях; определения фактических координат расстановки ГДАС и вход в систему телекоммуникации для передачи информации их постановки. Технические характеристики системы ГДАС приведены в таблице 10.2.

## Технические характеристики системы ГДАС

Параметр	Значение
Время автономной работы	До 6 месяцев
Предельная глубина установки ГДАС	6000 м
Погрешность определения времени прихода акустического сигнала	$\pm 0,2$ с
Погрешность определения координат источника акустического сигнала	$\pm 400$ м
Вероятность определения типа источника акустического сигнала на основе установленных (выделенных) классификационных признаков	0,8

Первичная акустическая информация о контроле времени прихода акустического сигнала, контроле координат и об определении типа источника акустического сигнала на основе установленных классификационных признаков, регистрации телеметрической информации и результаты ее обработки регистрируются на магнитный носитель и хранятся в течение времени работы станции. Данные о первичной акустической информации с результатами ее обработки передаются по спутниковому каналу связи типа "Гонец". Характеристики ГДАС серии «Магна» (Рис. 10.7.) приведены в таблице 10.3.

ГДАС серии «Магна» имеет следующие системы: приема, обработки, анализа и регистрации первичной гидроакустической информации; обработки зарегистрированной информации с целью выявления типа ИАС или выявления его модернизации и регистрации на магнитный носитель первичной информации и результатов ее обработки; хранения и корректировки единого времени; микропрограммного управления работой ГДАС; передачи и приема цифровой информации по гидроакустическому каналу связи на ВМ ПД (рис.10.8.) или обеспечивающий корабль; передачи информации по ССС "Гонец" с помощью одноразового автономного всплывающего модуля (при отказе гидроакустического канала связи с ВМ ПД или обеспечивающим кораблем); отделения балласта при получении команды на всплытие ГДАС от программного устройства; по гидроакустическому каналу связи с обеспечивающего корабля; от датчика герметичности внутри прочного корпуса; обнаружения ГДАС на поверхности моря по радиоканалу и световому маяку.



Рис. 10.6. Структурная схема комплекта ГДАС серии «Магна» с подсистемой передачи информации с поверхности моря на обеспечивающий корабль или на береговой информационный центр

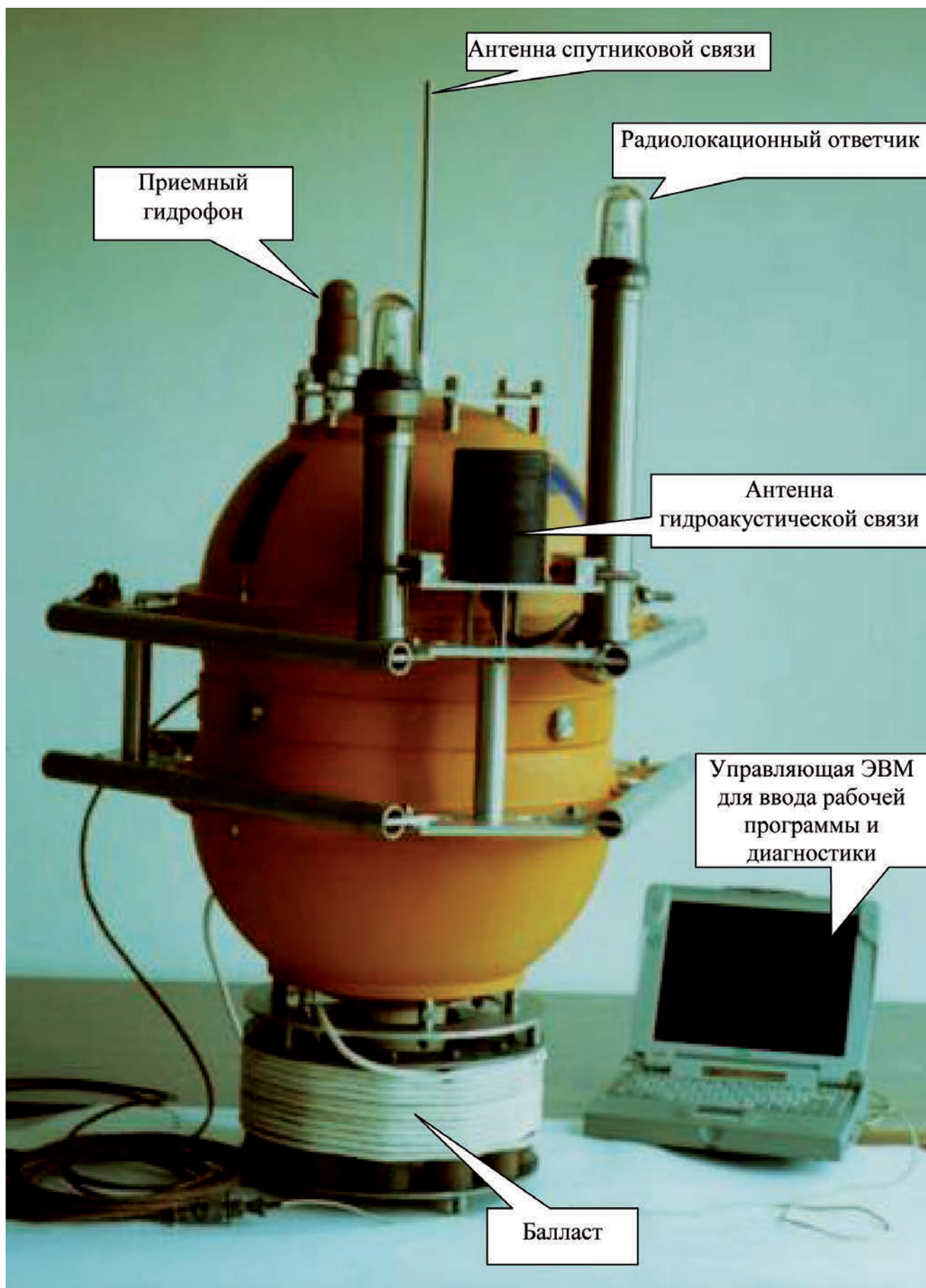


Рис. 10.7. Экспериментальный образец ГДАС серии «Магна»

Таблица 10.3.

Параметр	Значение
Вес в собранном виде	50 кг
Диаметр прочного сферического корпуса	450 мм
Предельная рабочая глубина погружения	6000 м
Время автономной работы	6 месяцев

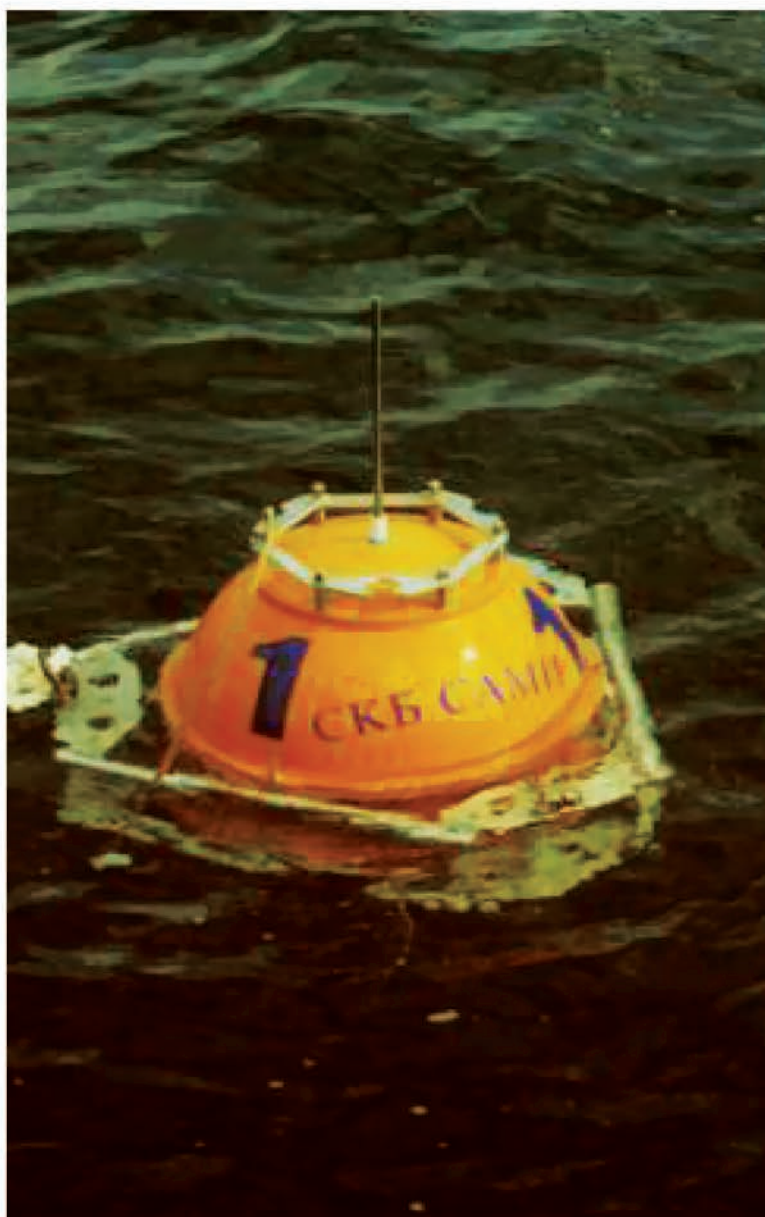


Рис. 10.8. Образец ВМ ПД прохождения связи с поверхности моря



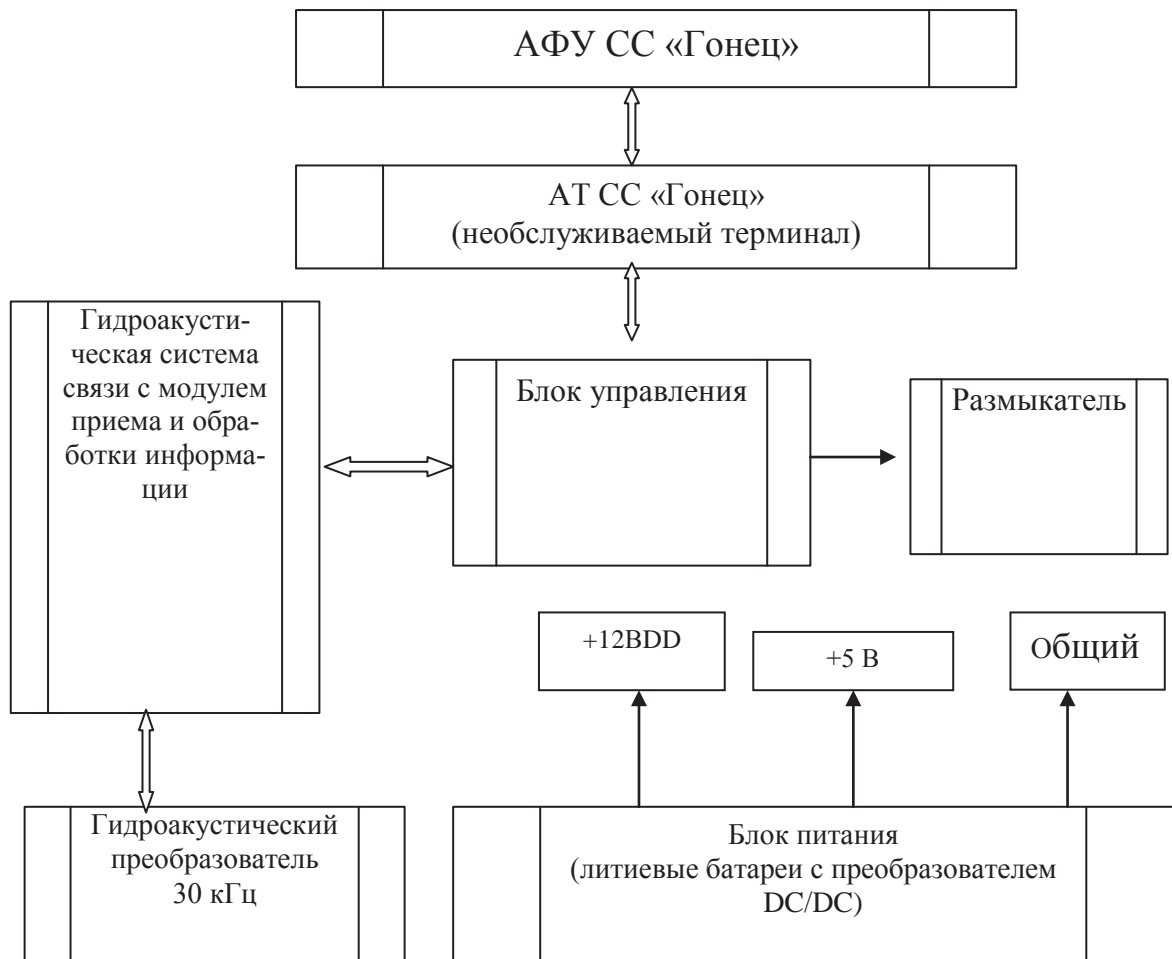


Рис. 10.9. Структурная схема ВМ ПД

ВМ ПД, структурная схема представлена на рис. 10.9, имеет следующие технические характеристики:

- глубина погружения, м, не более 6000;
- время автономной работы, месяцы, не менее 6,0;
- количество модулей в составе ГДАС, обеспечивающих за время автономной работы сеансов связи, не менее 10.

ВМ ПД обеспечивает:

- регистрацию принятой информации;
- всплытие на поверхность и передачу информации по формату предоставления данных о первичной акустической информации с результатами ее обработки и передачи по спутниковому каналу связи типа "Гонец";
- погружение (после завершения передачи информации) на дно;
- всплытие на поверхность по команде от датчика герметичности внутри прочного корпуса.

Комплект гидроакустических изделий представляет совокупность донных автономных станций. Указанные станции, размещенные заданным образом в районе испытаний, имеют круговую диаграмму направленности и реагируют на звуковые волны, создаваемые гидроакустическим ударом или взрывом специального заряда. Приемная и регистрирующая аппаратура принимает сигналы и регистрирует их с целью получения требуемой выходной информации.

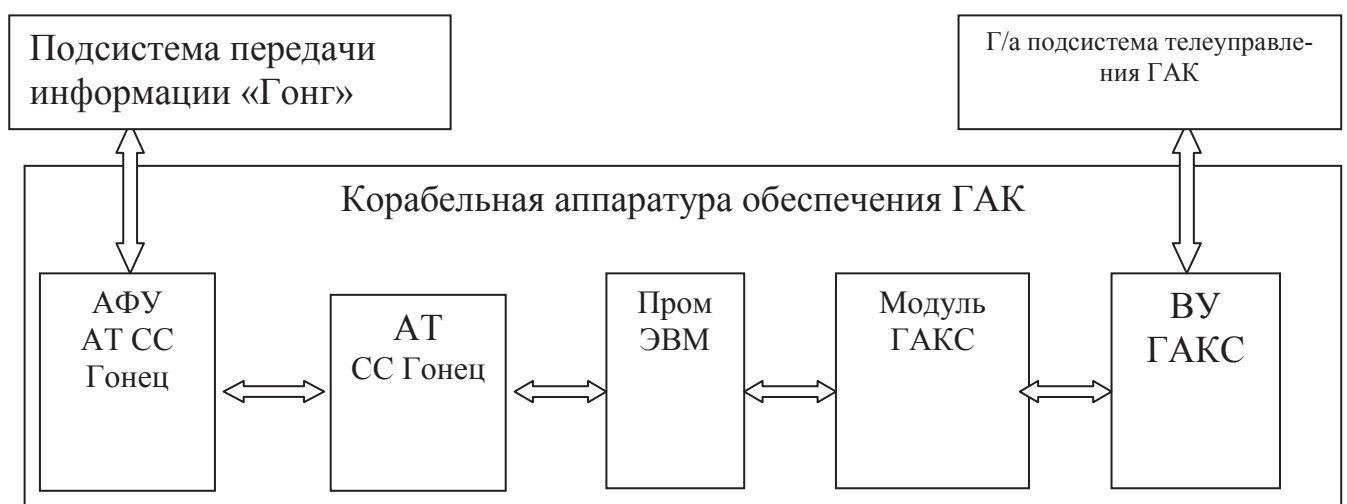
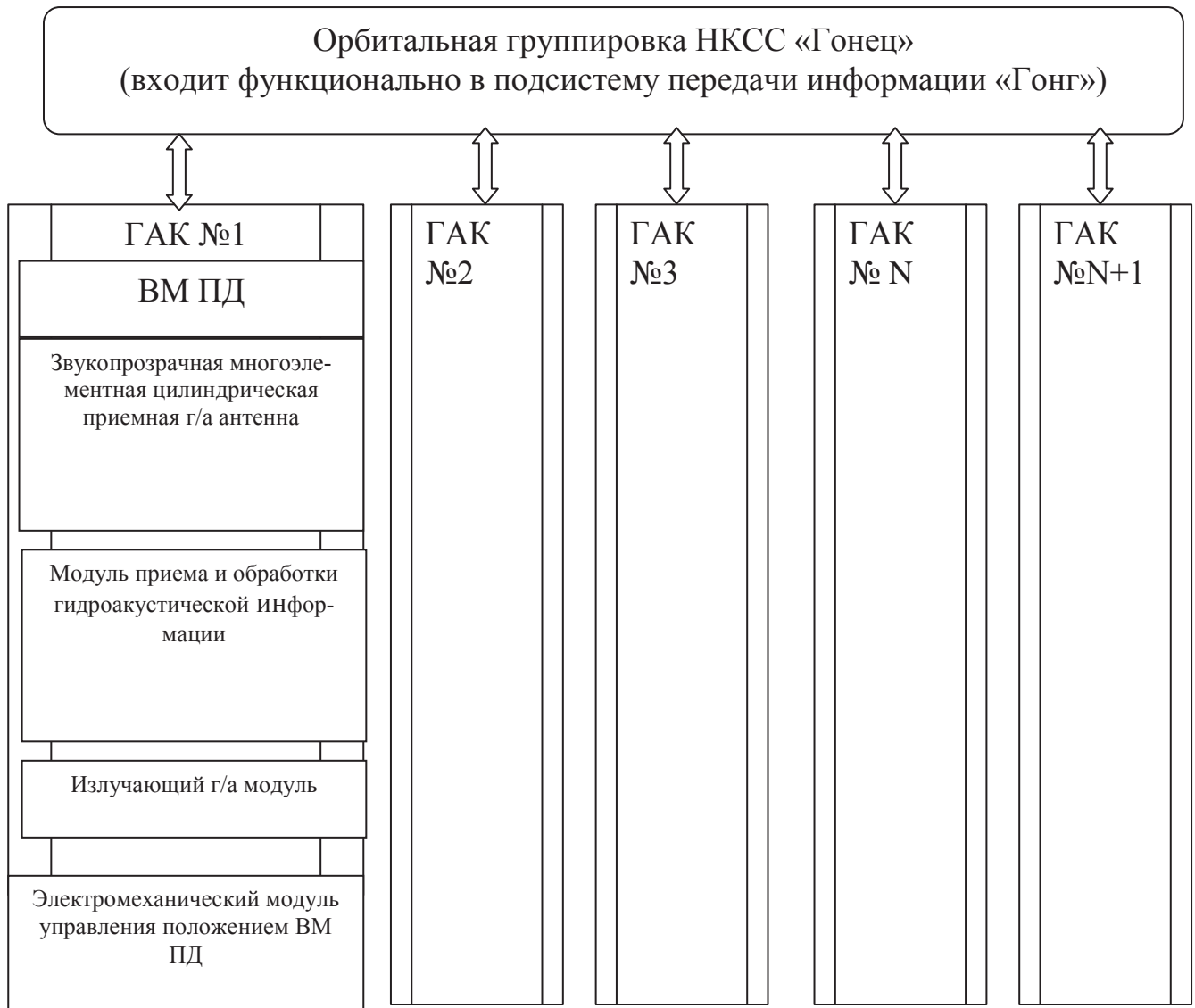


Рис. 10.10. Структурная схема гидроакустического комплекса освещения морской обстановки

На практике используют более трех станций, чтобы обеспечить высокую надежность получения измерений и найти, вне зависимости от расположения места нахождения объектов, такие две линии положения, которые пересекаются под углом, близким перпендикулярным, и обеспечивают наиболее высокую точность определения места объекта. Кроме того, на основе ГДАС может быть реализован контроль, определение координат взрывных сигналов. Максимальная эффективность применения средств освещения обстановки достигается, как правило, при комплексном использовании стационарных и автономных средств обнаружения. Технические характеристики автономных гидроакустических средств обеспечивают их эффективное использование при решении целого ряда частных задач, стоящих перед системами освещения и мониторинга морских акваторий (рис. 10.10).

Принципы проектирования ГАК позволяют создать различные по модификации средства, отличающиеся автономностью, диапазонами рабочих частот, энергетическим потенциалом и т.п., при минимальных доработках, сводящихся, в основном, к перенастройке программного обеспечения.

Постановку ГАК возможно осуществлять практически со всех типов кораблей и судов, а также с помощью вертолетов морской авиации без их существенного дооборудования специальными средствами постановки.

Гидроакустический комплекс, работающий как в пассивном режиме, так и при использовании активной акустической подсветки среды, имеет два варианта исполнения. Первый вариант представляет собой автономный комплекс, а второй вариант предполагает наличие кабельного канала передачи данных. Корпусно-механическая часть (КМЧ) ГАК так же имеет два варианта: для мелководных и для глубоководных районов установки Мирового океана, составляющих ~80% его площади. ГАК представляет собой универсальное средство, которое может быть развернуто в практически любых (по глубинам места) районах Мирового океана, обеспечивая решение задач освещения подводной и надводной обстановки. Сравнительно небольшие масса и габариты, допускающие его постановку практически во всех районах океана, обеспечивают высокую эффективность применения системы. В этом случае, для формирования рубежа должны быть выставлены несколько ГАК. Протяженность рубежа при заданной дальности обнаружения будет зависеть от выбранных средств передачи информации от них. Так, при использовании УКВ диапазона частот дальность передачи информации составит 60...80 км. При использовании связи через ИСЗ протяженность рубежа не ограничена.

Тактико-технические характеристики ГАК позволяют оперативно, т. е. в темпе изменения обстановки, наращивать потенциал системы наблюдения путем быстрого развертывания ГАК.

Особо важную роль автономные модификации ГАК могут играть в угрожаемый период времени, длительность которого по современным представлениям составляет около 30 суток. На таких временных интервалах современные источники тока по предварительным оценкам вполне способны обеспечить работу ГАК по вскрытию как надводной, так и подводной обстановки в районах развертывания.

Кабельный вариант ГАК целесообразно использовать в прибрежных районах, в том числе и характеризующихся высокой плотностью судоходства. В этом случае возможен и целесообразен вариант совместного использования совокупности пространственно разнесенных антенн, объединенных когерентной, когда это возможно, либо некогерентной обработкой сигнальной информации.

Выполнение различных измерительных задач в различных районах океана, отсутствие требований к судам – постановщикам, а также возможность применения в кабельном, и автономном вариантах, обеспечивают быструю окупаемость создаваемых радио-гидроакустических средств. Закладываемая в основу ОКР технологическая основа станций базируется на современных цифровых технологиях обработки сигнальной информации, которые позволяют осуществлять обработку больших объёмов информации и принимать решения о регистрации объектов в автоматическом режиме.

К особенностям ГАК можно отнести следующее:

- работа комплекса в активном локационном и в пассивном режимах;
- приёмные антенны имеют вертикальное развитие до десяти длин волн или больше (при необходимости);
- предполагается обеспечение совместной обработки информации от пространственно разнесённых антенн;
- кабельный и автономный варианты построения системы;
- модификации ГАК должны обеспечивать возможность функционирования в глубоководных и мелководных районах МО;
- модификации ГАК должны обеспечивать работу в режиме гидролокации совместно с излучающими системами различных типов.

Высокие показатели эффективности изделия достигаются за счет использования пространственно развитых фазированных, звукопрозрачных антенных решеток со встроенным трактом обработки сигналов, обеспечивающим реализацию всего тракта обнаружения и классификации в одном высокопроизводительном и маломощном сигнальном процессоре. В составе методов обработки сигналов используются:

- стабилизированное формирование веера диаграмм направленности антенн в горизонтальной (3600) и вертикальной плоскостях;
- адаптация к анизотропии помех и лучевой структуре сигнала;
- обнаружение и сопровождение трасс объектов;
- автоматическая классификация объектов.

Для снижения потерь полезного сигнала во входных цепях антенны и снижения энергопотребления применена «цифровая» антенна, в которой предварительный усилитель, АЦП и сигнальный процессор размещены внутри каждого гидрофона (рис. 10.11.). С целью повышения надежности и технологичности конструкции использованы современные стойкие в морской воде полиуретаны и пластмассовые конструкции серии «Силкаст». Соответствующее снижение массы упрощает постановку и выборку комплекса.

Эффективность применения глубоководных автономных донных станций в решении задач измерения и записи (консервации) характеристик гидроакустических полей среды и объектов заключается в исключении влияния помех на результат измерения от обеспечивающего корабля и применения в автономном режиме программируемого или измеряемого по гидроакустическому каналу связи режима регистрации.

Получение качественно новых данных по гидрофизическим полям среды и объектов достигается объединением группы станций в функционально связанный комплекс. Функциональная связь определяется наличием системы единого времени и связанной с ней системой измерения взаимной дистанции между установленными на дно станциями. Пространственно-развитая система сбора информации позволяет получить данные о пространственной и временной изменчивости среды и пространственных характеристиках первичных (и вторичных) полей объектов.



Рис. 10.11. Структурная схема приемного усилителя гидроакустических станций серии «Магна»

Автономные станции обеспечивают высокий экономический эффект применения за счет выполнения работ по измерению пространственных характеристик гидрофизических полей одним обеспечивающим кораблем, используя корабельное время только на постановку и выборку станций (которое составляет 5–10 % от общего времени работы станций в эксперименте).

Повышение эффективности применения систем ГДАС в системах мониторинга гидрофизических и геофизических полей морской среды, достигается за счет увеличения автономности работы (от 10 суток до 6 месяцев), уменьшения габаритов и увеличения (до 25) одновременно работающих станций, применения цифровой обработки и регистрации информации, определения географических координат расположения станций на дне с помощью корабельной аппаратуры, включающей в себя гидроакустическую систему измерения наклонной дальности, сопряженную с системой определения координат корабля ГЛОНАСС-GPS.

В условиях длительной автономной работы особое значение приобретает оперативность доставки информации потребителю. Оснащение станций подсистемой спутниковой связи, работающей в автоматическом режиме, позволяет по заданной программе передать информацию на центральные посты из любой точки Мирового океана.

Дальнейшее развитие автономных гидроакустических средств освещения обстановки заключается в оснащении донных станций пространственно-развитыми антенными решетками, основанными на цифровых технологиях предварительной обработки, передачи информации в вычислительное устройство и передачи результата обработки в формулярном виде на центральные посты. Получены научные и инженерные решения для разработки и создания современных глубоководных донных автономных станций, а также для выполнения экспериментальных работ, связанных с измерениями гидрофизических полей морской среды и объектов в Тихоокеанском регионе. Все разработки прошли практическую проверку. Так, например, изготовле-

на и комплексно испытана аппаратура (ГДАС "Монитор"), не имеющая аналогов в отечественной и в зарубежной практике. Нельзя не отметить, что актуальность, научная новизна, а также высокая практическая значимость разработок монографии заключается не только в решении государственной проблемы "совершенствования морской деятельности государства" и разработки в этой связи, "Единой системы освещения и контроля акваторий МЭЗ ДВР". Она непосредственно нацелена также на решение актуальных задач мониторинга, освоения и охраны богатых рыбных и нефтегазовых запасов глубоководных морских акваторий Охотского моря и шельфовых зон острова Сахалин [5–8].

Итак, технические характеристики и измерительные технологии СФС ГДАС, создание на их основе универсального контрольно-измерительного комплекса, дополнение его специально разрабатываемыми АРТМ КС, обеспечивающими возможность вхождения комплекса в Единый информационно - аналитический центр системы освещения морской обстановки, мониторинга полей искусственных и естественных источников акваторий, являются предметом исследований и технических решений настоящей работы.

## 10.2. Метрологическое обеспечение систем ГДАС серии «МОНИТОР»

Информационно-измерительная система (ИИС) функционально связанных МГАС серии «Монитор» обеспечивает регистрацию гидроакустических сигналов в автономном автоматическом режиме с целью их последующей обработки и анализа. Прием ведется либо на гидрофон, либо на гирлянду из трех гидрофонов.

ИИС МГАС серии «Монитор» содержит следующие, подлежащие метрологической аттестации, каналы измерения: звукового давления с основного гидрофона; звукового давления с гирлянды гидрофонов; дистанции [13-15].

**Программа и методика проведения испытаний автономной гидроакустической системы.** Система обеспечивает измерение гидрофизических полей среды и объектов. Структурная схема канала измерения звукового давления с одного (основного) гидрофона изображена на рис. 10.12., с гирлянды гидрофонов – на рис. 10.13. Схема канала измерения дистанции приведена на рис. 10.14.

**Приемники акустические (ПА),** серии ДЖУ 5.837.017, предназначены для измерения звукового давления в водной среде в диапазоне частот от 1 до 500 Гц, как в составе гирлянды гидрофонов, так и при установке на прочный корпус МГАС.

При падении звука на жесткую неподвижную сферу прочного корпуса МГАС звуковое поле вблизи него искажается, так как в результате воздействия падающей волны на препятствие возникает новая, рассеянная волна. Эти две волны и формируют звуковое поле вблизи сферы, которое принимается гидрофоном на корпусе станции.

Общепринято то, что влияние сферы на окружающее звуковое поле проявляется при  $\lambda \geq d$ ; где  $\lambda$  - длина волны, а  $d$  - диаметр сферы.

В нашем случае  $d = 1\text{ м}$ , а рабочий частотный диапазон 1...500 Гц, т.е. влияние сферы на окружающее акустическое поле можно ожидать на частотах около 500 Гц и выше. Теоретические расчеты этого поля сложны, поэтому произведены измерения в натуральных условиях [13-15].

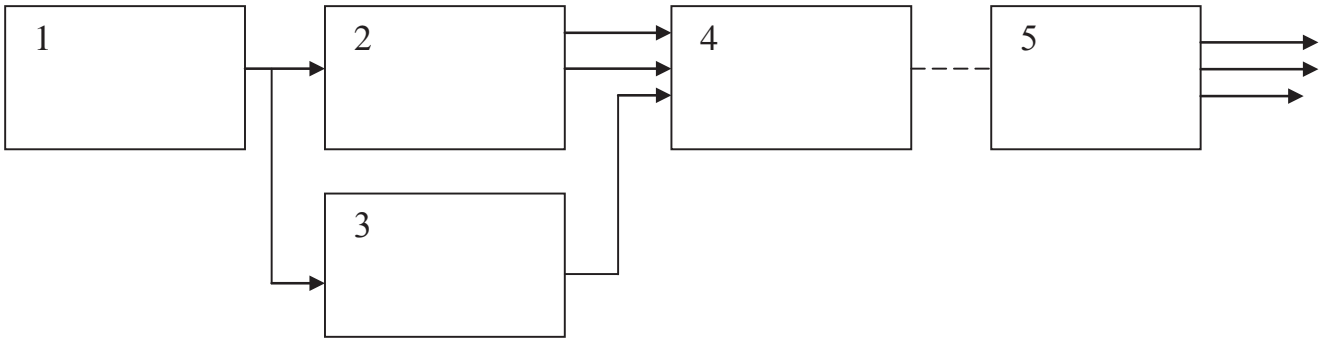


Рис. 10.12. Структурная схема канала измерения звукового давления основного гидрофона ГДАС: 1 - гидрофон ДЖУ 5.837.014; 2 – усилитель измерительный ДЖУ 5.032.027; 3 – Фильтр 1 кГц ДЖУ 5.067.003; 4 – АМЗ ДЖУ 3.831.008; 5- аппарат воспроизведения НО-68

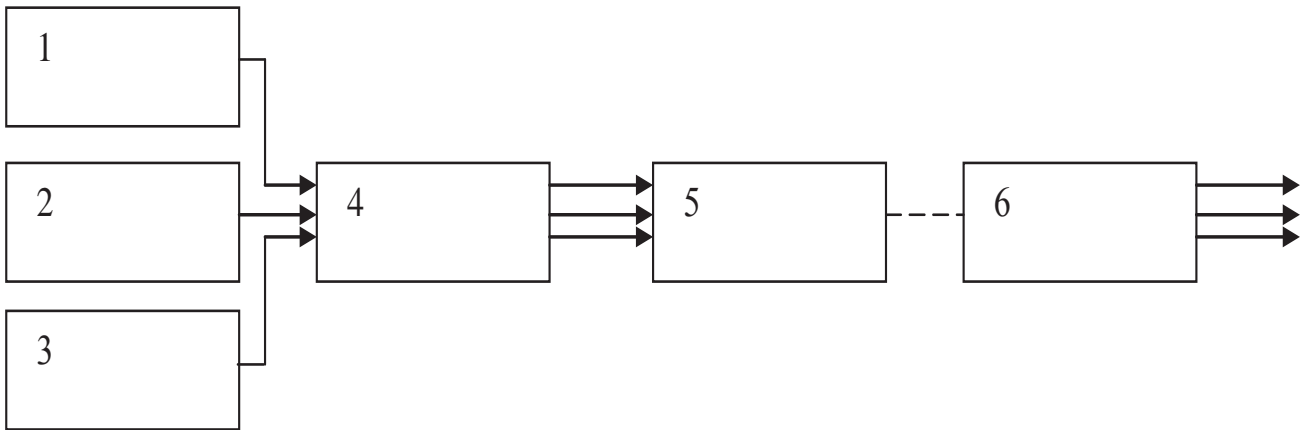


Рис. 10.13. Структурная схема канала измерения звукового давления с гирлянды гидрофонов: 1,2,3 – гидрофон ДЖУ 5.837.017; 4 – усилитель измерительный ДЖУ 5.032.025; 5 – АМЗ ДЖУ 3.831.008; 6 – аппарат воспроизведения НО-68

Схема канала измерения дистанции приведена на рис. 10.14.

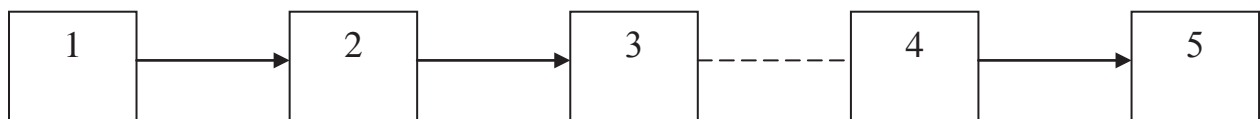


Рис. 10.14. Структурная схема канала измерения дистанции.  
1 – преобразователь акустический ДЖУ 5.406.003;  
2 – блок измерения дистанции ДЖУ 5.181.008; 3 – АМЗ ДЖУ 3.831.008;  
4 – аппарат воспроизведения НО-68;  
5 – блок обработки информации ДЖУ 3.036.0021.

Измерения проведены по нескольким схемам. В одной из них свободный гидрофон крепится к корпусу МГАС с помощью горизонтальной штанги переменной глубины. Корпус МГАС находится практически под излучателем, а измерения проводились на разных глубинах. В другой - гидрофон и прочный корпус с гидрофоном опускались на одинаковые глубины  $h$ . В третьей схеме гидрофоны буксировались на одинаковые расстояния от излучателя и устанавливались следующим образом: корпус МГАС с гидрофоном на дно, а одиночный гидрофон при помощи буйрепа на расстоянии, равном диаметру корпуса МГАС от дна.

Во время работы в промежутках между излучением тональных сигналов производились записи окружающих гидроакустических шумов, спектрограммы которых практически идентичны, пока гидрофоны находятся в непосредственной близости друг от друга. С увеличением расстояния между ними разность между спектрами в области частот выше 520-530 Гц увеличивается и стабилизируется при  $L = 3$  м. Следовательно, влияние конструктивных элементов сферического корпуса МГАС на погрешность измерения гидроакустических сигналов на частотах ниже 450 Гц не обнаружено, на частоте 500 Гц – не превышает 2дБ. Однако в диапазоне частот 520...1000 Гц начинает сказываться на расстояниях до сферического корпуса (диаметром 1 м) менее 3 м.

Для глубоководных исследований большое значение имеет влияние избыточного статистического давления на основные параметры гидрофона (чувствительность, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь) и влияние обтекателя на чувствительность гидрофона. Исследование проведено в измерительной камере ОСИ УГП-60. Измерения чувствительности проводились методом сравнения с гидрофоном типа Г3302 № 4. Результаты измерений приведены в таблицах 2.1-2.3, где:  $M_f$ -чувствительность гидрофона № 125 без обтекателя;  $M_f$ -чувствительность гидрофона с обтекателем;  $C$ -емкость ПА;  $tg\delta$ -тангенс угла диэлектрических потерь;  $P$ -избыточное статистическое давление.

В частотном диапазоне 1-500 Гц наличие обтекателя практически не влияет на значение чувствительности гидрофона. С ростом избыточного статистического давления до 50 МПа чувствительность  $M_{ГО}$  уменьшается на 17%, а его емкость уменьшается на 44 %,  $tg\delta$  увеличивается на 33 %.

Программа метрологической аттестации МГАС предусматривает определение метрологических характеристик ИИС «Монитор» [13-15]:

- коэффициента преобразования от входа гидрофона к выходу аппарата воспроизведения в полосе частот (1-500) Гц для информационно-измерительных каналов;
- погрешности системы измерения глубины установки МГАС;
- динамического диапазона измерений звукового давления;
- погрешности определения расстояний относительно установленных на дне МГАС.

**Метрологическая аттестация каналов измерения звукового давления** проводится по измерительным компонентам в соответствии со следующими документами:

- «Аппарат магнитной записи». Программа и методика метрологической аттестации. ДЖУ 3.831.008 ДИ-ЛУ.
- «Приемники акустические» ДЖУ 5.837.0143; ДЖУ 5.837.017. Методы и средства поверки. ДЖУ 5.037.014 ИП-ЛУ.
- «Усилители измерительные» ДЖУ 5.032.027; ДЖУ 5.032.025; ДЖУ 5.067.003.
- Программа и методика метрологической аттестации.

**Метрологическая аттестация канала измерения дистанции** производится в соответствии с документами: блок измерения дистанции; программа и методика метрологической аттестации; ДЖУ 5.178.004 ДИ.



Коэффициент преобразования от входа гидрофона к выходу аппарата воспроизведения на заданной частоте по  $j$ -му каналу определяется как

$$M_j = M_0 \cdot K_j \cdot K_{AM3-Bj},$$

где  $M_0$  (мкВ/Па) – чувствительность гидрофона,  $K_j$  – коэффициент усиления  $j$ -го канала на указанной частоте,  $K_{AM3-Bj}$  – коэффициент передачи  $j$ -го сквозного канала записи-воспроизведения.

Суммарная погрешность измерения звукового давления

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3,$$

где  $\delta_1$  – суммарная погрешность градуировки гидрофона;  $\delta_2$  – погрешность определения коэффициента усиления по каналам измерительного усилителя;  $\delta_3$  – погрешность коэффициента передачи тракта записи-воспроизведения, дБ.

Динамический диапазон определяется формулой

$$D = 20 \lg \left( \frac{U_H K_{\max}}{U_{\text{ш}} K_{\min}} \right),$$

где  $U_H = 707$  мВ – номинальный выходной сигнал, дБ;  $U_{\text{ш}}$  – выходной шум усилителя с коэффициентом усиления;  $K_{\max}$  – максимальный коэффициент усиления измерительного усилителя;  $K_{\min}$  – минимальный коэффициент усиления измерительного усилителя.

Погрешность определения расстояния между уставленными на дне МГАС определяется в соответствии с программой и методикой метрологической аттестации. ДЖУ 5.178.004 ДИ. Погрешность определения глубины постановки МГАС обоснована в техническом проекте на ОКР «Монитор» и составляет 2,1% , что соответствует ТЗ.

Методика определения погрешности серийного преобразователя давления ПДВ-50Б должна соответствовать требованиям ГОСТ 18.618-83.

Периодической поверке подвергаются все ПА (в процессе эксплуатации) с поверочным интервалом в 1 год. Периодичность поверки уточняется по мере накопления статистических данных в процессе эксплуатации. При проведении поверки должны быть выполнены следующие операции: внешний осмотр; опробование; определение частотной характеристики чувствительности; определение уровня чувствительности и неравномерности частотной характеристики чувствительности.

При проведении поверки должны быть применены следующие средства измерений и вспомогательные устройства:

- комплекс образцовых поверочных средств 2-го разряда КОГС-1 в диапазоне частот от 1 до 4000 Гц с доверительной относительной погрешностью измерения чувствительности 2 дБ при  $P = 0,95$ ;
- частотомер Ф 5034 по ТУ 5025-04-3035-75;
- термометр технический (Т.Т) с диапазоном измерений от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ , ценой деления  $1^{\circ}\text{C}$  по ГОСТ 2823-73;
- барометр – aneroid БАММ-1 по ТУ 25-04-1799-72;

- психрометр аспирационный М34 с пределами допускаемой абсолютной погрешности не более  $\pm 5\%$  по ТУ 25-08-809-70;
- источник питания ТЭС-14 НТР-306.

Все средства должны иметь документ о поверке (аттестации).

**Определение частотной характеристики чувствительности ПА.** Чувствительность определяется методом пьезоэлектрической компенсации в измерительной камере на средних частотах каждой 1/3-октавной полосы частот в соответствии с эксплуатационной документацией на КОГС-1-ПИ1.450,005 ТО и ПИ1.450.005 ИЭ; частота контролируется частотомером Ф5034.

Измерения на каждой частоте повторяются три раза и вычисляют среднее арифметическое значение чувствительности ( $M_{cp}$ ) поверяемого ПА, которое заносится в формуляр. При  $M_{cp}$  56 дБ отн. 1 мкВ/ПА ПА бракуется.

За уровень чувствительности ( $M_0$ ) принимается среднее арифметическое значение уровня чувствительности ( $M_{cp}$ ) ПА в диапазоне частот от 1 до 500 Гц. Уровень чувствительности ПА ДЖУ 5.837.014. и ДЖУ 5.837.017. в диапазоне частот от 1 до 500 Гц должен быть не менее 56 дБ относительно 1 мкВ/ПА. Определение неравномерности частотной характеристики чувствительности от уровня в диапазоне частот от 1 до 500 Гц: на каждой частоте найти отклонение чувствительности от уровня ( $M_i - M_0$ ); максимальное отклонение чувствительности от уровня не должно превышать 2 дБ; доверительная относительная погрешность поверки на КОГС-1 около 2 дБ при вероятности  $P=0,95$ .

Модульность построения станции обеспечивает поэтапную метрологическую аттестацию ИИС ГДАС, изменение или модернизацию ГДАС без особо сложной конструкторской доработки.

Комплексный подход к измерению гидрофизических полей с помощью донных станций реализуется на основе специально разработанных (обладающих новизной решений) метрологического обеспечения и информационно-измерительных систем.

Надежность и эффективность (точность) информационно-измерительных систем ГДАС подтверждается метрологическими исследованиями по результатам опытной эксплуатации станций и установлением поверочного интервала, превышающего срок автономной работы или срок непрерывной эксплуатации станций в работе.

Таким образом, решение задач метрологического обеспечения при использовании ГДАС, включая станцию "Монитор" и другие, производится на основе комплексного подхода к измерению совокупности гидрофизических полей и с использованием технических средств, обладающих научно-технической новизной.

### **10.3. Звукопрозрачная приемная гидроакустическая антенна, ее технические и измерительные характеристики и результаты испытаний**

Целью проведения экспериментальных исследований являлась проверка работоспособности цилиндрической звукопрозрачной приемной в морских условиях, оценки ее характеристик (диаграммы направленности, помехоустойчивости). В состав приёмной системы входят: приёмная гидроакустическая антенна, многоканальный фильтр-усилитель и модуль сбора данных, состоящий, в свою очередь, из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера, рис. 10. 15.

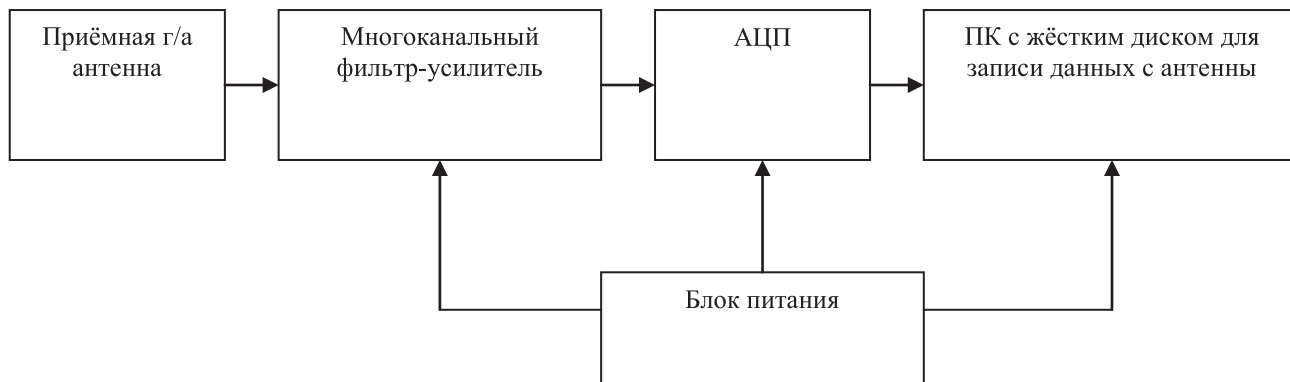


Рис. 10.15. Структурная схема испытательной гидроакустической системы

Приёмная гидроакустическая антенна представляет собой цилиндр диаметром 1350 мм и высотой 1100 мм, составленный из 30 эквидистантных линейных антенных модулей по 8 гидрофонов в каждом. Гидрофоны изготовлены из пьезоэлементов Щ47.124.129-06 (керамика ЦТС-19) и герметизированы полиуретаном.

Антенные модули закреплены в верхних и нижних лучах каркаса антенны, как показано на рисунке 10.16.

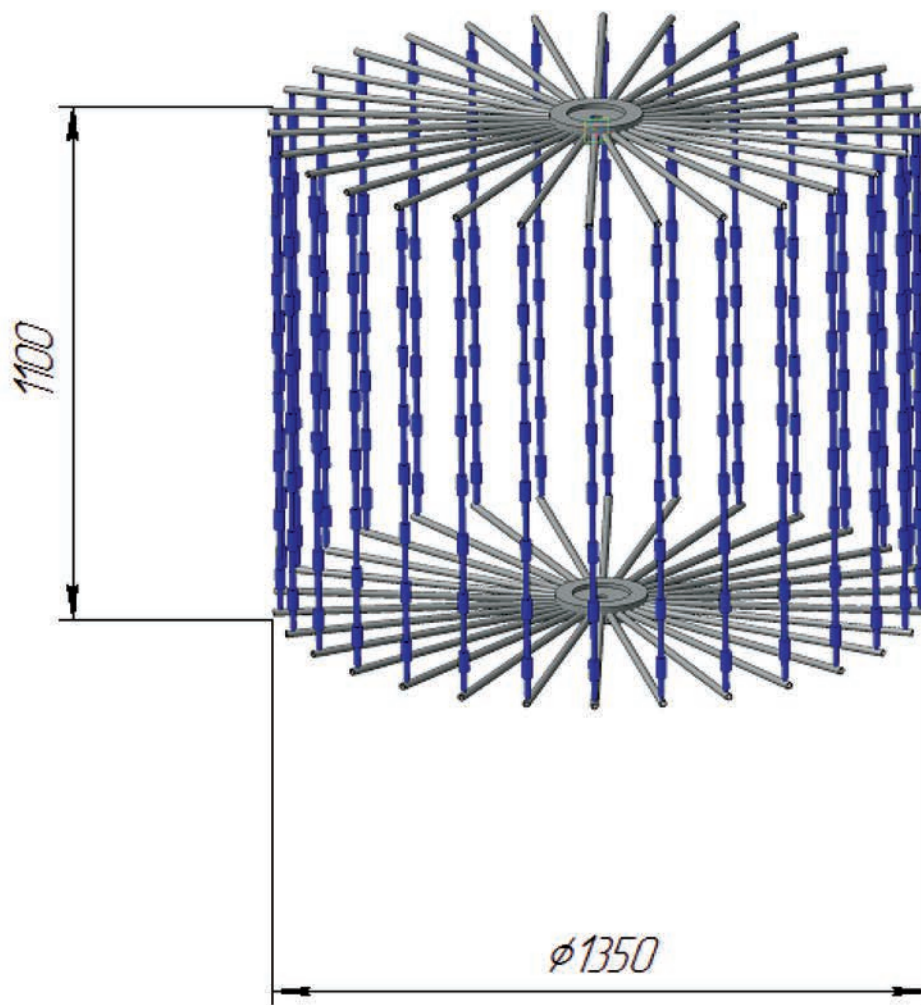
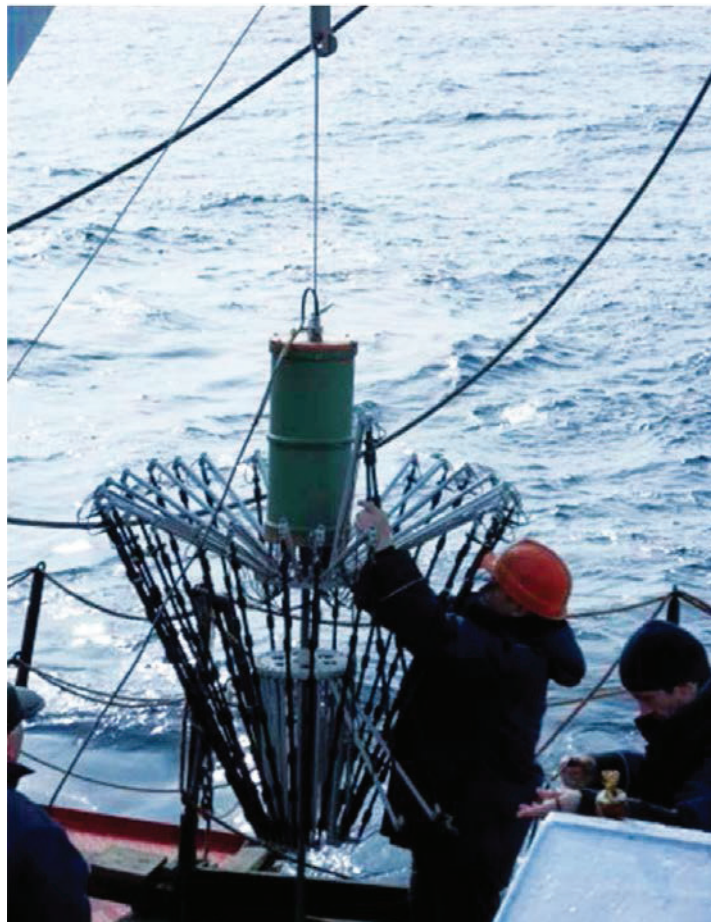


Рис. 10.16. Звуконепрозрачная приемная акустическая антенна

Внешний вид трех «сверток» конструкции антенны в транспортном положении, порядок ее разворачивания и погружения в море показаны на рисунках 10.16.1 – 10.16.3.



*Рис. 10.16.1.* Модули гидроакустические в транспортном положении



*Рис. 10.16.2.* Разворачивание гидроакустической антенны в рабочее положение

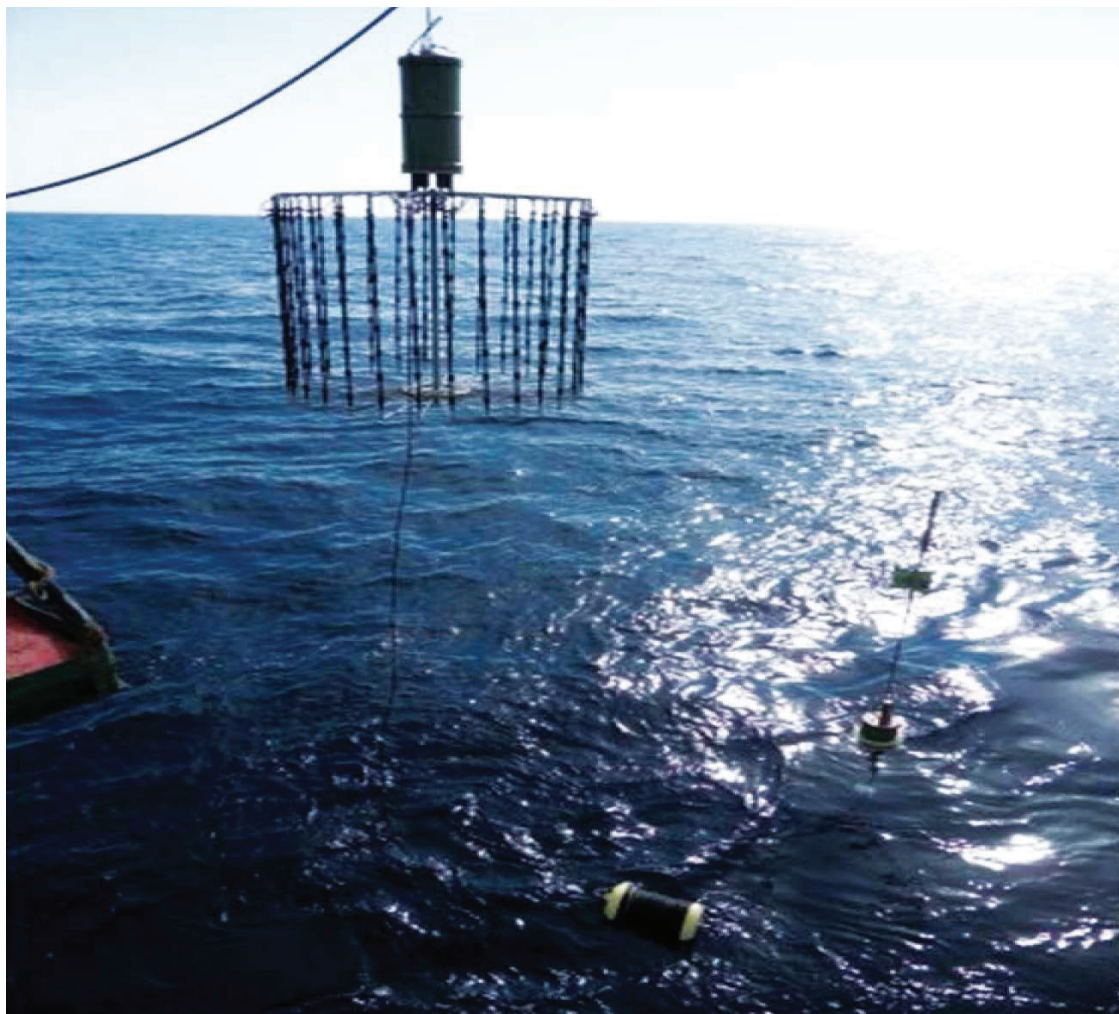


Рис. 10.16.3. Вывешивание МГА за борт и погружение в воду

Антенные модули соединяются с блоком фильтров-усилителей с помощью двужильного морского кабеля в полиэтиленовой изоляции.

Чувствительность модуля в направлении максимума – 540 мкВ/Па. Электрическая емкость модуля – 2,6 нФ. Многоканальный фильтр-усилитель (ФУ) предназначен для усиления сигналов, получаемых от приемной антенны, в рабочей полосе частот и фильтрации акустических помех за пределами рабочей полосы. ФУ содержит 30 идентичных каналов, формирующих сигналы от 30 антенных модулей.

ФУ имеет следующие характеристики:

- коэффициент передачи на частоте 5000 Гц равен 10;
- неравномерность АЧХ в полосе 4500 – 5500 Гц составляет 0 – 1 дБ;
- уровень собственных шумов на выходе не более 150 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ;
- максимальный уровень сигнала на выходе 1 В.;
- крутизна среза ФНЧ и ФВЧ за пределами полосы 12 дБ/окт.

Амплитудно-частотная характеристика ФУ. АЦП NI USB-6259 имеет 32 однополярных (SE) или 16 дифференциальных (DI) аналоговых канала с частотой дискретизации 1,25 миллионов выборок в секунду на все каналы. Имеет 7 диапазонов входного напряжения. Максимальный диапазон входного напряжения +/- 10В. Таким образом, при частоте дискретизации по каждой из линеек, равной 30000 отсчетов в секунду, для частоты 5 кГц получается 6 отсчетов на один период измеряемого сигнала.

## Результаты испытания приемной звукопрозрачной антенны в составе системы обработки гидроакустических сигналов

Испытания проводились в сентябре 2009 года на озере Тунайча (о. Сахалин). Температура воды составляла 20°C, скорость звука- 1470 м/с, глубина озера в месте постановки антенны - 10 метров, коэффициент отражения от дна принимался равным нулю.

Антенна устанавливалась на глубине (от уреза воды до верха) ~ 5 м. Модуль №1 был ориентирована на север, а модуль №16 – соответственно – на юг. Рис. 10. 17.

Маломерное судно маневрировало между четырьмя точками, координаты которых были сняты GPS-приёмником G.

Излучатель опускался с маломерного судна на глубину ~ 5 м. Поочередно из каждой из четырёх точек излучался в течение 2х минут тональный импульс с частотой заполнения 5 кГц, длительностью 6 мс и периодом следования 2 секунды. Сигнал, принятый антенной, в каждом модуле испытывает временную задержку, равную

$$T_i = \frac{R \cdot (1 + \cos \alpha_i)}{c},$$

где  $i$  – номер модуля,  $R$  – радиус антенны,  $c$  – скорость звука в среде,  $\alpha$  - угол между линейкой номер  $i$  и линейкой, ближайшей к источнику сигнала.

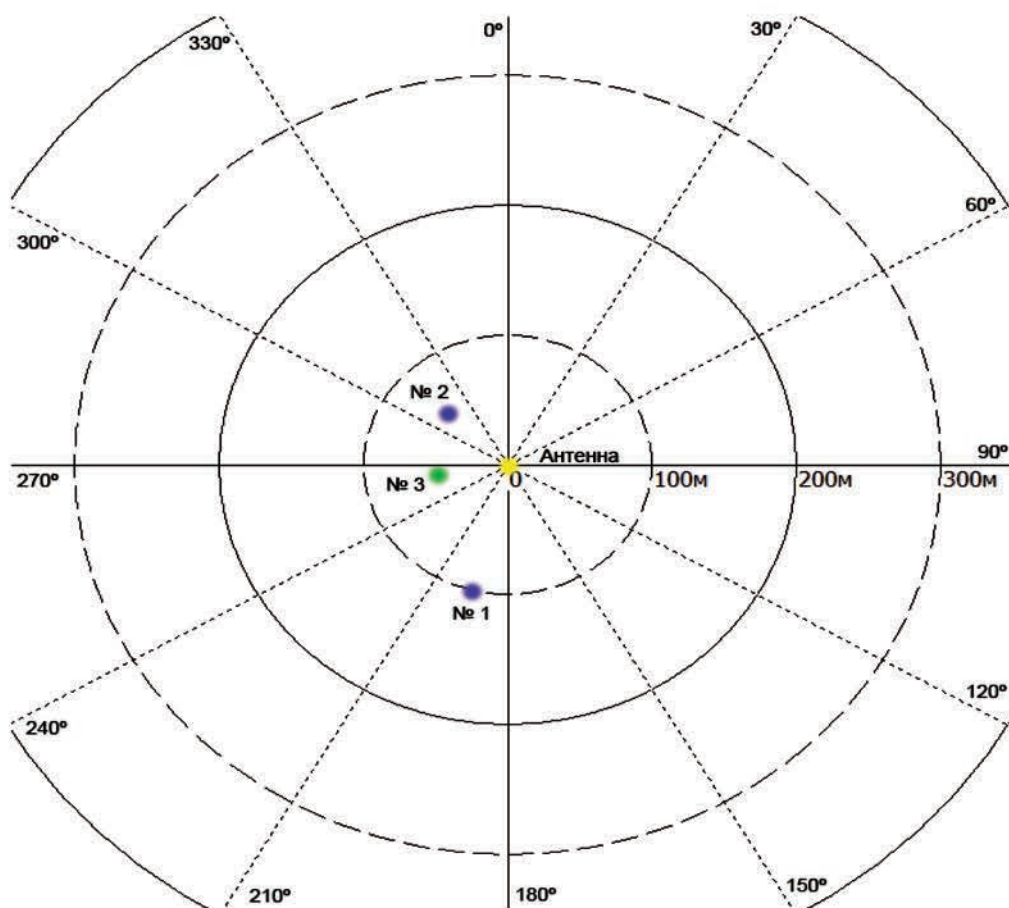
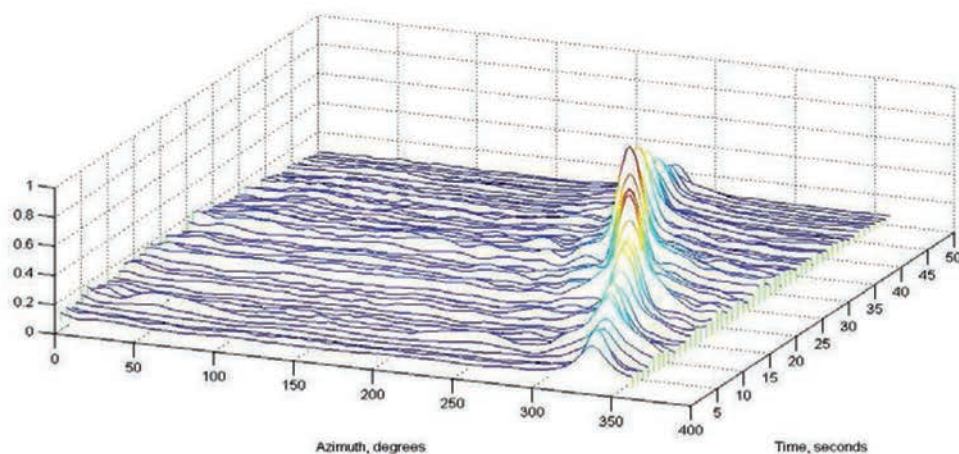


Рис. 10.17. Схема проведения эксперимента

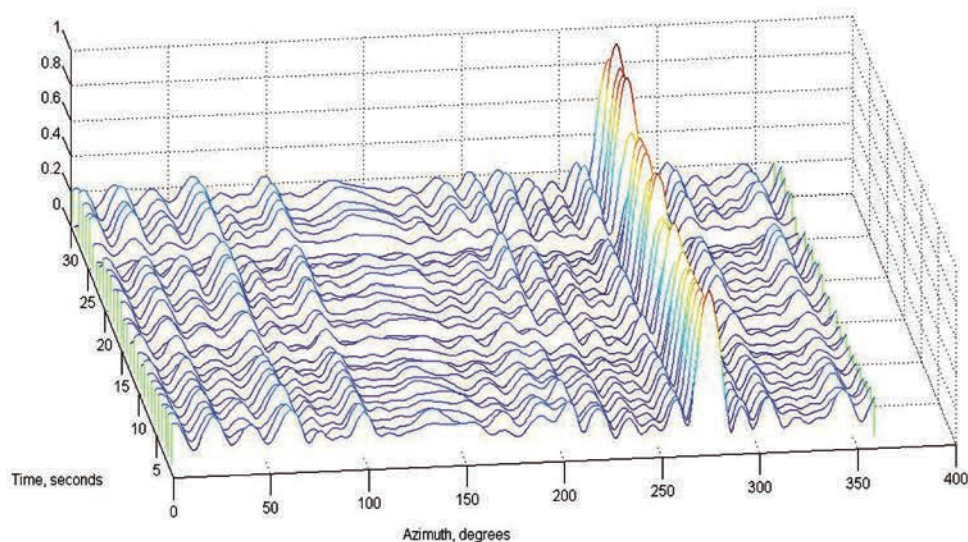
## Формирование характеристики направленности и определение пеленга на источники излучения сигналов

Для определения пеленга на источник использовался метод сдвига и суммирования: в цикле для каждого из 30 модулей (в предположении, что он обращён к источнику) брался противоположный ему; сигналы со всех модулей сдвигались на время распространения от них до этого дальнего модуля, затем суммировались, после чего вычислялось СКО этого суммарного сигнала. Номер модуля с максимальным значением среднеквадратического отклонения и даёт пеленг на источник сигнала.

На рис. 10.18 в трёхмерном виде показано изменение пеленга на маломерное судно, движущееся малым ходом; на рис. 10.19 – при движении маломерного судна с большой скоростью.



*Рис. 10.18.* Направление антенны на звук маломерного судна, на малой скорости движения.  
По левой горизонтальной оси – азимут в градусах.  
По правой – время в секундах



*Рис. 10.19.* Направление антенны на источник сигналов.  
По левой горизонтальной оси – время в секундах,  
по правой горизонтальной оси – азимут в градусах

На рис. 10.20 – трёхмерное изображение пеленга на источник импульсов, в условиях поднявшегося ветра и волнения: видно, что источник сносит к северу.

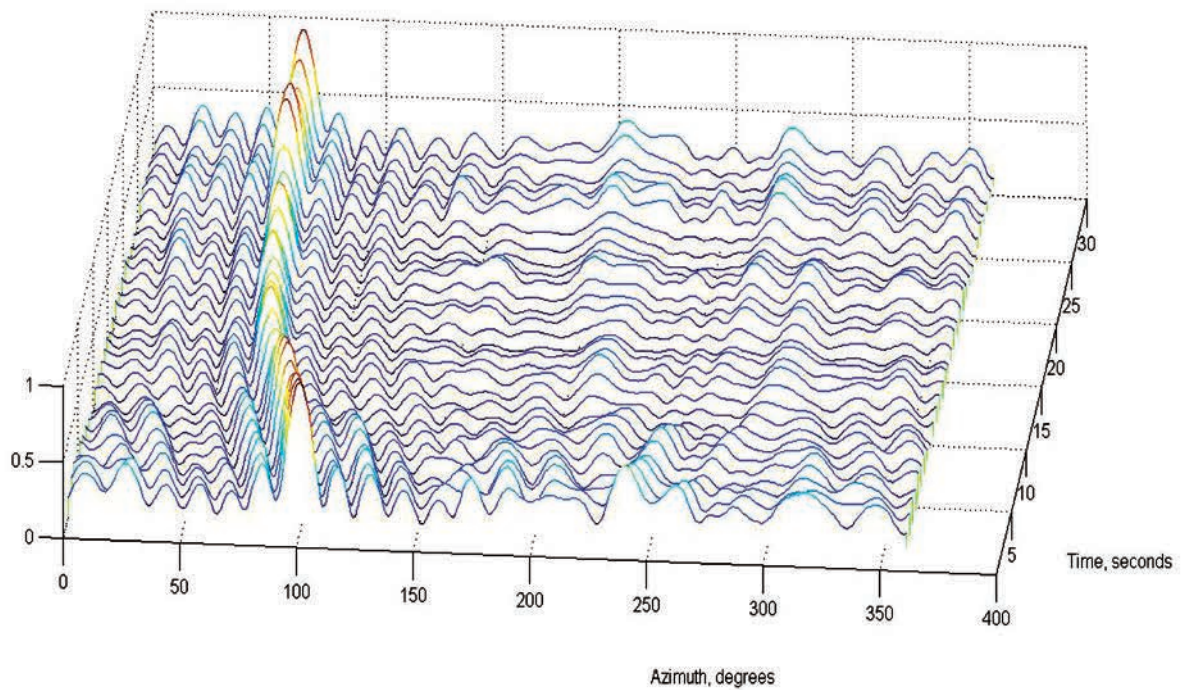


Рис. 10.20. Направление антенны на источник излучения сигналов в условиях ветра и волнения. По левой горизонтальной оси – азимут в градусах, по правой оси – время в секундах

На рис. 10.21 представлена диаграмма направленности звукопрозрачной антенны.

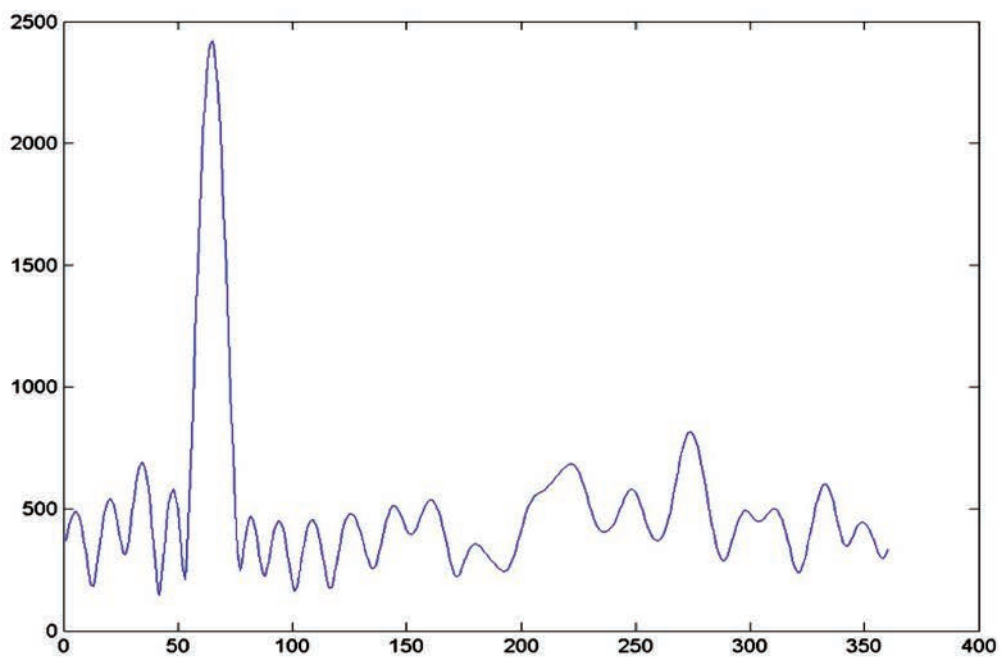


Рис. 10.21. Диаграмма направленности приемной звукопрозрачной антенны



На рис. 10.22 приведена расчетная диаграмма направленности цилиндрической антенны.

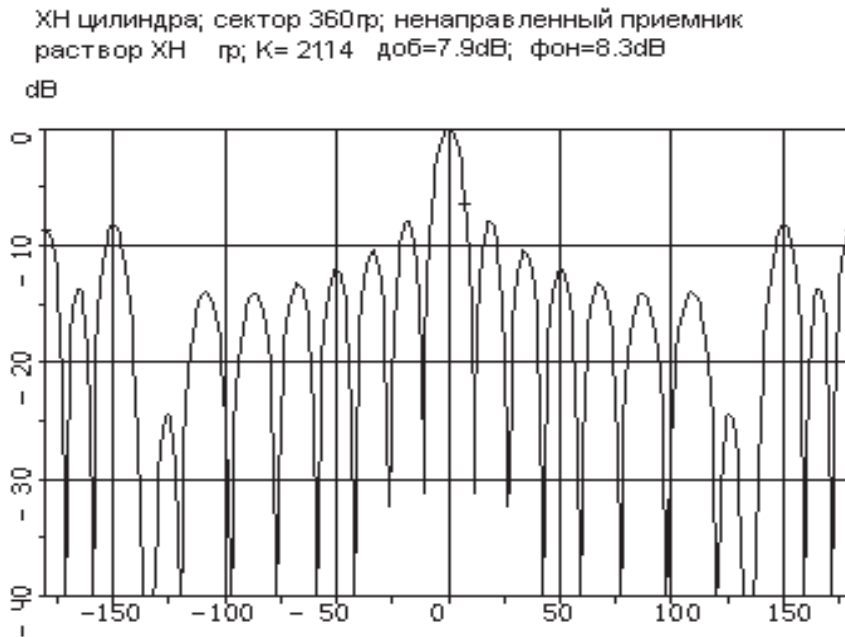


Рис. 10.22. Расчетная диаграмма направленности цилиндрической антенны

Для сравнения была рассчитана для этой же конфигурации диаграмма направленности в соответствии с классической теорией направленности гидроакустических антенн. Диаграмма направленности цилиндрической антенны вычисляется по формуле

$$R(\varphi, \theta) = \frac{D(\varphi, \theta)}{D(\varphi, \theta)_{\max}};$$

$$D(\varphi, \theta) = \sum_{q=-N}^N \sum_{g=1}^M R_e A_q e^{ikR[(\cos(\varphi) - \cos(\varphi_0)) \cos q\delta + (\sin(\varphi) - \sin(\varphi_0)) \sin(q\delta)]} e^{gd_z \cos \theta}$$

где  $\delta$  – угловое расстояние между центрами преобразователей по окружности;  $d_z$  – расстояние между центрами преобразователей по высоте цилиндра;  $M$  – количество поясов по вертикали;  $N$  – количество столбов по окружности в секторе до  $180^\circ$ ;  $R$  – радиус цилиндра;  $\varphi_0$  – угол, определяющий направление компенсации;  $R_e$  – характеристика направленности элемента приемника

$$R_e = \frac{1 + \cos(\delta q - \varphi)}{2}.$$

Для ненаправленного элемента приемника  $R_e = 1$ .

Характеристика направленности плоской антенны вычислялась по формуле

$$R(\varphi) = \sum_{n=1}^N R_e A_n e^{ikd \sin(\varphi)}$$

где  $R_e$  – характеристика направленности антенны кардиоидного типа.

Коэффициент концентрации определяется путем интегрирования характеристики направленности по пространству

$$K = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} R^2 \sin \theta d\theta d\phi}$$

Из сравнения расчетной и экспериментальной диаграмм следует, что ширина основного максимума и уровень бокового поля сравниваемых диаграмм отличаются незначительно. Некоторые отличия можно объяснить влиянием гидроакустического канала между точками излучения и приема, погрешностями дискретизации натурального сигнала и неконтролируемыми ошибками возбуждения в гидрофонах.

**Проведенными морскими испытаниями установлено.**

1. Разработанный в СКБ САМИ ДВО РАН макет приемной звукопрозрачной гидроакустической антенны подтвердил свою работоспособность в натуральных условиях. Отмечается безотказная работа всех составных частей антенны в процессе экспериментов.

2. Результаты предварительной обработки и анализа результатов экспериментов подтверждают соответствие основных параметров диаграммы направленности рассчитанной цилиндрической звукопрозрачной антенны. Рекомендовано провести технические доработки и совершенствование антенны для ее практического применения в разрабатываемой радиогидроакустической системе мониторинга гидрофизических полей морских акваторий.

#### **10.4. Структура, схемные и конструктивные решения создания автономного радиотехнического модуля космической связи**

**Структура автоматизированной системы сбора информации.** Автоматизированный сбор информации с необслуживаемых модулей и систем является одной из составных задач, решаемых низкоорбитальной спутниковой системой связи "Гонец" [17-22, 35-36]. Практически единственной системой, прошедшей все стадии разработки, включая НИР и ОКР и находящейся на стадии развертывания, является низкоорбитальная система спутниковой связи "Гонец". Разработка системы спутниковой связи "Гонец" осуществляется в соответствии с Федеральной космической программой России на период до 2000 года, утвержденной постановлением Совета Министров-Правительства Российской Федерации № 1282 от 11 декабря 1993 года. Создание космического сегмента системы в настоящее время финансируется Российским космическим агентством.

Услуги и области использования системы "Гонец" ориентированы, в основном, на региональное обслуживание, то есть основной объем трафика составляют сообщения внутри регионального маршрута. Протяженность региона не превышает 4000 км (зона контроля одного спутника). Структурная схема МСПСС «Гонец» приведена на рис. 10.23.

Связью в регионе управляет региональная станция. В одном регионе может располагаться одна или несколько региональных станций, которые обслуживают свои ведомственные сети.

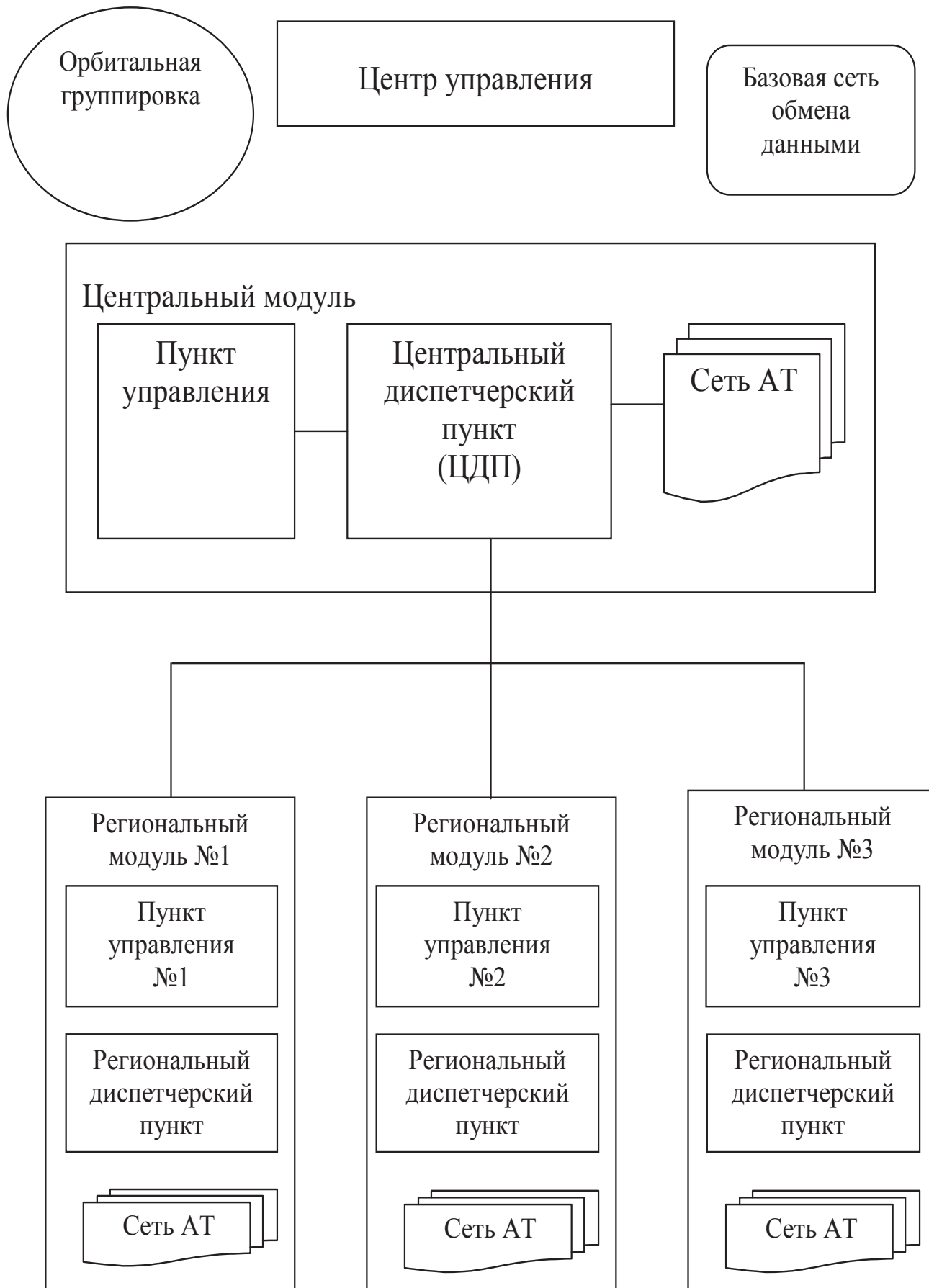


Рис. 10.23. Структурная схема построения ППД

Региональная станция рассчитывает зоны уверенного обслуживания терминалов своего региона каждым спутником системы и заказывает в центральную региональную станцию (ЦРС) необходимый ресурс. ЦРС распределяет между региональными станциями общий ресурс системы и составляет расписание их работы. Организация регионального обслуживания абонентов с использованием системы спутниковой связи «Гонец» приведена рис. 10.24.

Региональная станция в выделенное для ее работы время организует групповой сеанс связи. При этом становится возможной оперативная связь между абонентами данного региона. Она может также организовать обслуживание определенных групп абонентов, например сбор информации с систем датчиков, например, сбор информации о местоположении транспортных средств. По принципу региональной связи может быть организована связь между морскими судами, при этом региональная станция этой сети размещается на берегу или на одном из судов. Через региональную станцию может быть установлена связь с абонентами сетей общего пользования.

Терминалы, выходящие за пределы зоны действия региональных станций, обслуживаются в персональном режиме. Возможность размещения таких терминалов в регионе определяется ЦРС в зависимости от уже заявленного трафика средств системы данного региона.

С точки зрения организации связи к основным особенностям системы "Гонец", определяющим ее технические и тактические возможности, можно отнести следующее:

- спутниковые каналы различных КА разделены по частоте;
- на каждом спутнике 91 канал доступа работает с разделением во времени, 16 первых из этих каналов разделены по частоте на одном спутнике, но одинаковы для всех спутников системы;
- работа по каналам «вверх» и «вниз» с данным КА осуществляется на частотах, которые индицируются в МС, если другой режим работы специально не оговорен для конкретного терминала. Номера частот в МС могут быть изменены по командам ЦУС и РС;
- на каждом КА организовано 128 запоминающих устройств, к каждому из которых обеспечен автономный доступ для записи и воспроизведения информации. Объем каждого ЗУ - 98304 бит;
- наличие информации в любом из ЗУ индицируется в специально сформированном адресном слове.

**Адресация.** Бортовые ЗУ распределяются между пользователями для доставки информации абоненту или группе абонентов. Одному пользователю может быть выделено одно или несколько ЗУ на одном, нескольких или всех КА.

Номера выделенных для обслуживания КА и ЗУ входят в состав адреса данного абонента в системе "Гонец – Д 1". Если ЗУ предназначено для группового использования, то в адрес данного абонента входит также номер его терминала в группе. Каждый терминал хранит список адресов, с которыми предполагается установление связи. Часть адреса, содержащая номер КА и номер ЗУ, используется ПО терминала. При формировании исходных данных на сеанс с КА и по радиоканалу она не передается. Номер терминала в группе при групповом использовании ЗУ включается в состав служебного слова передаваемого сообщения.

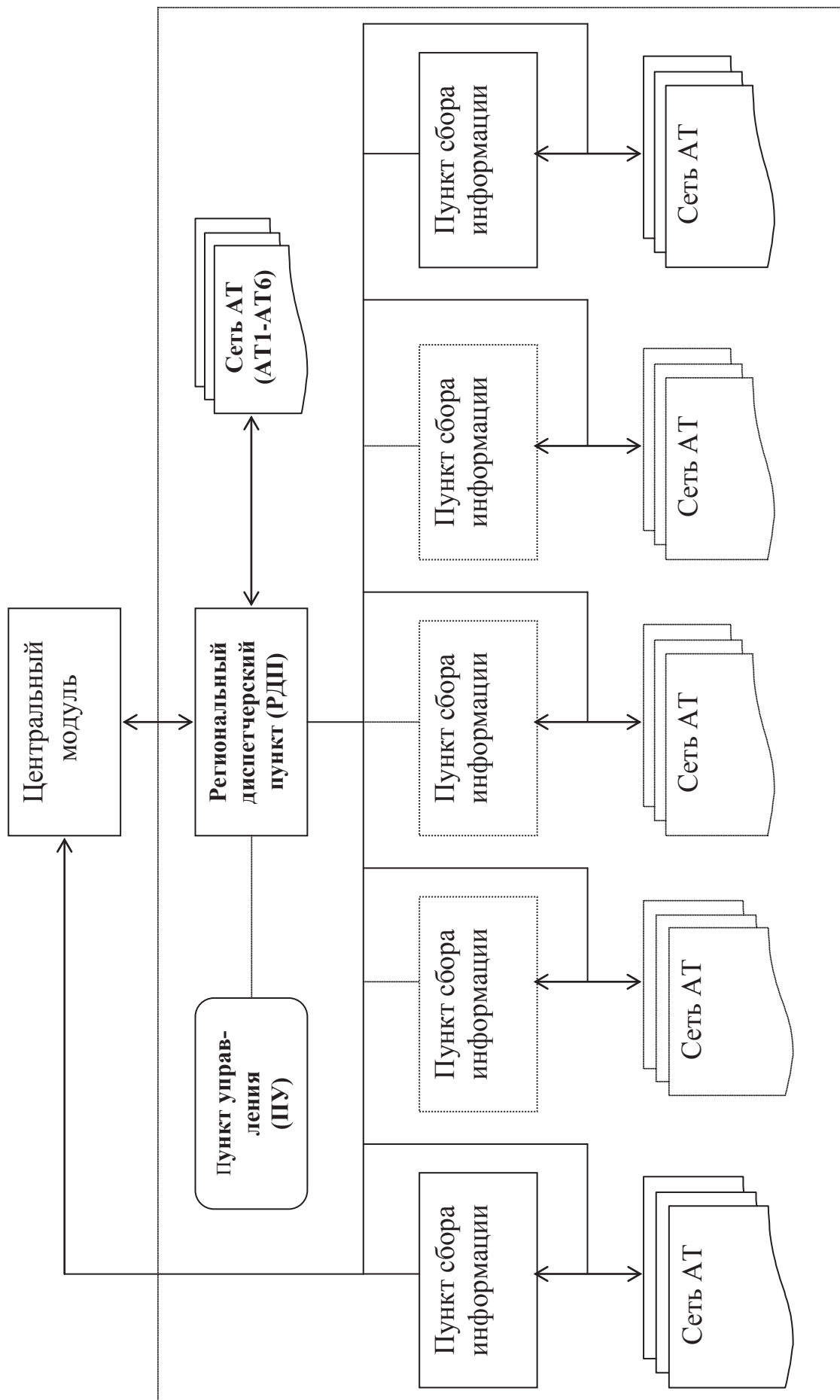


Рис. 10. 24. Структурная схема регионального модуля

Доступ к КА. Доступ к спутниковым каналам и передача информации на КА производится по одному и тому же частотному каналу с разделением во времени. Для доступа к спутниковым каналам на каждом КА организован 91 канал с временным разделением. Первые 16 каналов разделены и по частоте, остальные 75 каналов работают на спутнике на одной из 16 частот, причем для каждого спутника ЦУС назначает свою частоту. 1 и 2 канала доступа выделяются для передачи срочных аварийных сообщений. Каналы 3-ий - 5-ый выделяются для ЦУС. Остальные 86 каналов доступа, разделенных по частоте, выделяются приоритетным пользователям. Каналы с 17 до 91 обслуживают пользователей системы. При вводе терминала в систему его программное обеспечение настраивается либо на определенный канал доступа, либо на режим свободного (конкурентного) доступа в определенной группе каналов.

При приеме маркерного сигнала абонентский терминал определяет номер частотных каналов передачи и приема данного КА (по значению 7-10 символов МС). Соответствие между кодировкой МС и значениями частот прямого и обратного каналов приведено в документе "Структуры сообщений БРТК системы "Гонец-Д1".

Установив заданную частоту приема информации, терминал принимает адресное слово, определяет наличие на данном КА предназначенной ему информации, циркулярной или персональной. Если запланирована передача информации на КА либо анализ адресного слова показывает необходимость съема информации, абонентский терминал подготавливает передачу команды "Включение сеанса" на частоте данного КА в выделенном терминалу временном интервале.

В процессе ожидания выделенного канала абонентский терминал контролирует канал приема для определения факта проведения сеанса связи с КА другим терминалом, который имеет более высокий приоритет по времени доступа к КА. Контроль осуществляется по наличию сигнала "Захват" приемного устройства. При контроле терминалом должен обеспечиваться сброс схемы обнаружения несущей по каждому СИ.

Если определено, что другой терминал организовал сеанс связи с данным КА, запланированный сеанс связи в этой минуте отменяется.

Если абонентский терминал определяет, что спутниковый канал в данном минутном интервале не занят, то в выделенном ему канальном интервале передается команда "Включение сеанса" и проводится сеанс связи.

Для ведомственных терминалов и для других пользователей может быть задана любая другая приоритетность работ при разработке ориентированной на этого пользователя версии программного обеспечения терминала.

**Персональный и групповой режимы обслуживания системы «Гонец».** В зависимости от вида обслуживания, предусмотренного в системе "Гонец", терминал работает с КА в одном из режимов: персональном, групповом или смешанном. Работа системы «Гонец» поясняется рисунками 10. 25 и 10. 26а, 10.26б.

В режиме персонального обслуживания сеанс связи с КА организуется терминалом, специальное программное обеспечение (ПО) которого настроено на персональный режим, при наличии в маркерном сигнале признака персонального обслуживания. Выполняемые в сеансе работы определяются планом сеанса. План типового сеанса определяет и может изменяться при вводе терминала в систему. В одном минутном интервале с КА работает один терминал.

Сеанс связи в персональном режиме организуется терминалом при выполнении следующих условий:

- наличие у терминала информации для передачи абоненту, занесенному в таблицу адресации, и (или) наличие в запоминающем устройстве (ЗУ), номер которого задан, как номер рабочего ЗУ терминала, информации;
- отсутствие действующих ограничений на доступ к данному КА;
- отсутствие ограничений на проведение операций съема информации при отсутствии необходимости закладки информации (например, после уже проведенного достоверного съема информации данного ЗУ в предыдущем сеансе);
- невыход на связь с КА других абонентов системы перед данным терминалом определяется отсутствием приема квитанции на РК «Включение сеанса» до выдачи терминалом РК «Включение сеанса».

В режиме группового обслуживания сеанс связи с КА организуется региональной станцией. Терминалы, ПО которых настроено на групповой режим обслуживания, работают по жесткой программе, определенной при вводе терминала в систему. В одном минутном интервале с КА могут работать на передачу до 7 терминалов при объеме передаваемых сообщений до 786 байт и 33 терминала при объеме передаваемых сообщений до 26 байт.

Общая схема функционирования терминала в групповом режиме такова. РС записывает в ЗУ, а после достоверной записи сразу считывает специальный массив, называемый словом управления сеансом (СУС), состоящий из отдельных блоков. СУС формируется на этапе планирования сеансов связи на РС.

Информационная часть каждого блока СУС содержит признак группового сеанса связи. Признак группового сеанса – это совокупность параметров, определяющих подсистему связи, сетевой номер терминала, тип сеанса, номер группового ЗУ, канальный интервал начала и конца работы терминала.

Терминал, приняв и обработав СУС, организует сеанс связи с КА в соответствии с логикой работы, заложенной в каждом блоке.

Предварительное формирование СУС на этапе планирования сеансов связи позволяет формировать гибкие схемы передачи данных внутри подсистемы связи (например, каждый с каждым или выборочно). При этом время доставки информации определяется длительностью связи, который в МСПСС «Гонец» составляет 1 минуту.

#### **Передача аварийных и экстренных сообщений.**

Система «Гонец» обеспечивает приоритетное представление каналов связи для передачи аварийных и экстренных сообщений в условиях возникновения на обслуживаемой территории чрезвычайной ситуации. Предоставление этой услуги конкретному пользователю определяет программное обеспечение при вводе терминала в систему.

Передача экстренных сообщений в МСПСС «Гонец» при персональном режиме обслуживания организуется настройкой ПО АТ с предоставлением абонентскому терминалу канального интервала с наибольшим приоритетом доступа к КА (время выдачи РК «Включение сеанса» на минутном интервале). Настройка работы программного обеспечения определяет размер стандартного пакета для передачи экстренного сообщения и один из шести адресов получателя, указанных в таблице адресации.

При групповом режиме обслуживания в вариантах обращения РС к терминалу предусмотрен типовой сеанс сбора экстренных сообщений.

Настройка ПО АТ позволяет определить нижнее значение приоритета экстренной информации (служит для определения наличия экстренной информации в терминале при сборке сообщений) и размер максимального окна выделенного для передачи экстренной информации (определяет фрагмент выделенного СУС интервала сбора экс-

тренной информации). При этом, обеспечивается постановка в очередь и первоочередная отправка только одного стандартного пакета (размер стандартного пакета определяется настройкой ПО) экстренного сообщения по любому указанному адресу независимо от состояния исходящей информационной очереди.

Передача координат местоположения. Информация местоположения вырабатываются автоматически программно-аппаратными средствами терминала при наличии в нем приемного устройства GPS и настройке программного обеспечения. Настройки программного обеспечения позволяют использовать информацию местоположения двумя способами:

- непосредственным формированием из информации местоположения пакетов и отправлением их по радиоканалу (непосредственное использование информации местоположения);
- передачей информации о местоположении объекта в виде специального сообщения во внешний вычислительный комплекс, что позволяет провести дополнительную обработку этой информации и передавать ее в обработанном виде терминалу по радиоканалу (внешнее использование информации о местоположении).

Программное обеспечение построено так, что указанные способы применения информации местоположения являются взаимоисключающими и определяются его настройкой. Непосредственное использование информации о местоположении предполагается применять в автономных режимах работы терминала. Настройка ПО, возможность использования одного из двух вариантов внутренней обработки информации о местоположении: накопление информации о трассе с ее последующей передачей по радиоканалу; передача по радиоканалу только последних данных местоположения, при этом аварийные и пустые сообщения местоположения при наличии не переданных точных координат не рассматриваются.

При непосредственном использовании информации местоположения приоритет сообщений, методы обработки информации и период опроса информации местоположения задаются настройкой программного обеспечения.

**Режимы передачи информации и принципы форматирования исходящих сообщений.** Информация, передаваемая по каналам системы «Гонец», при передаче разбивается (форматируется) на два типа пакетов – короткие и стандартные. Параметры настройки ПО способны задавать размеры коротких и стандартных пакетов. Изменение размера пакетов от общепринятых в системе (44байт и 804 байт соответственно) может понадобиться при работе терминала в групповом режиме для согласования выделяемых для сбора информации окон с размерами пакетов.

Параметры программного обеспечения позволяют задавать до пяти типов информации передаваемой короткими пакетами. Короткими пакетами, как правило, передаются квитанции на пакеты, квитанции на сообщения, информация местоположения, экстренные сообщения.

Передача информации в системе «Гонец» осуществляется, как правило, в одно пакетном режиме, означающий передачу терминалом в сеансе связи с КА только одного пакета информации, объем которого соответствует размеру окна, выделенного для передачи. В случае необходимости передачи сообщений больших объемов, в системе «Гонец» организуется сложный режим передачи информации (двух и более пакетов). Его организация осуществляется за счет настройки ПО РС и представляет собой перераспределение временных интервалов опроса АТ из группы в сеансе связи.



Система «Гонец» после завершения второго этапа будет иметь следующие оперативные характеристики. Время ожидания сеанса связи на территории РФ и СНГ в широтном поясе 35-80° с. ш. не превосходит 20 мин с вероятностью 0.9 при минимальном угле места 15° на всем сроке активного существования. При угле места 10° время ожидания связи – не более 15 минут для РФ и прилегающих территорий. Среднее время ожидания связи в широтном поясе 35-80° с. ш., угле места 15° не превышает 7 минут.

Время доставки сообщений – не более 2 минут при расположении отправителя и получателя в общей зоне радио-видимости одного КА и не более 15 минут при глобальном обслуживании и использовании наземных каналов связи между региональными станциями (без наземных каналов связи – 70 минут).

Из модуля регистрации информация может быть передана на абонентский терминал СС «Гонец» и, после всплытия, передана с поверхности моря по заданному адресу (направлению). Работа системы «Гонец» в масштабе комплексной системы космической связи показана на рисунках 10.25 и 10.26.

**Энергетический расчет канала передачи информации с поверхности моря.** Определим энергетические характеристики радиолиний для частот в диапазоне 0,2 – 0,4 ГГц, исходя из достижимых параметров бортовой аппаратуры и аппаратуры абонентских терминалов.

Основные параметры космического аппарата системы «Гонец»: масса на орбите – 250 кг; мощность энергопотребления – 400 Вт; точность ориентации  $\pm 0,2^{\circ}$ ; срок активного существования – 5-7 лет.

С учетом потребления и отдачи энергии бортовой системы электропитания выходная мощность бортового передатчика, приведенная к входу антенны, не может превышать 10 Вт, аналогичная мощность может быть в абонентской станции АТ. Бортовая и наземная антенны должны на максимальной дальности иметь максимальное усиление, а при минимальной дальности - минимальное, с тем, чтобы скомпенсировать потери на распространение и обеспечить примерно постоянный уровень принимаемого сигнала с КА в зоне действия абонентской станции. Реально усиление бортовой антенны при углах  $+60^{\circ}$  от оси составляет 2 – 3 дБ, что соответствует максимальной дальности.

Наземная антенна для абонентских терминалов АТ при углах места  $20^{\circ}$  может иметь усиление 1,5...2 дБ. Потери на распространение в диапазоне 0,26 ГГц ("Гонец-Д1") при  $L_{\min}=20$  составят 150,1 дБ. Потери энергии на распространение сигналов в диапазоне частот 0,3...0,4 ГГц ("Гонец-Д1") при  $L_{\min}=20$  составят: радиолиния "Земля - Борт"  $L_0=151,8$  дБ; радиолиния "Борт - Земля"  $L_0=153,6$  дБ.

Поляризационные потери при работе с абонентскими станциями АТ, имеющими антенны с круговой поляризацией, составят не более  $L_{\text{пол}}=1,5$  дБ, с линейной поляризацией 3 дБ. Аппаратные потери  $L_{\text{ап}}$  из-за рассогласований в приемных и передающих устройствах составят не более 2 дБ. Значение энергетических потерь за счет влияния морских волн  $L_M$  носит периодический характер и требует уточнения. Поэтому, оценим энергетику радиолиний и определим энергетические запасы без учета  $L_M$ , т.е. потенциальные запасы в радиолиниях.

Распространение радио сигналов в атмосфере сопровождается: потерями в невозмущенной атмосфере  $L_{\text{атм}}=0,1$  дБ и потерями в дожде  $L_{\text{д}}=0,4$  дБ, а также потерями в ионосфере  $L_{\text{и}}$ , имеющими циклическое изменение в течение суток при изменении освещенности, которые для средних широт не превышают 2 дБ в диапазоне частот 0,2 – 0,4 ГГц.

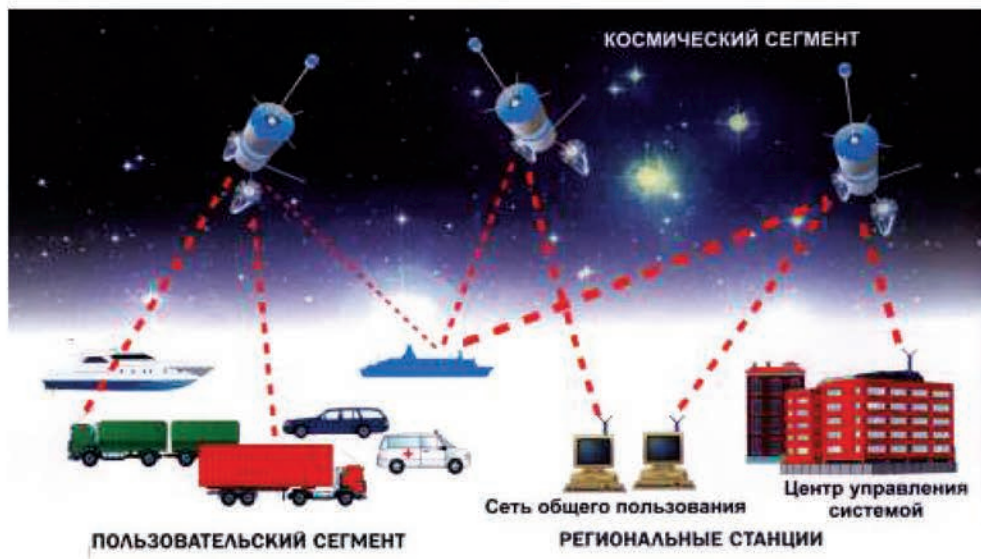


Рис. 10.25. Структура НКСС «Гонец»



Рис. 10.26. Зоны радио-видимости региональных станций НК СС «Гонец»

Поскольку ионосферные замирания носят временный характер и заметно проявляются только в отдельных районах Земного шара (некоторые экваториальные и полярные области), то при необходимости работы в условиях замираний целесообразно использовать модификации абонентских терминалов с повышенной мощностью, а при ограничениях на энергопотребление – терминалы с более эффективными антенными системами. При этом подавляющее большинство абонентских терминалов будет размещаться в районах, где замирания не проявляются.

Таким образом, дополнительные потери составляют:

$L_{\text{доп}} = L_{\text{атм}} + L_{\text{д}} = 0,5 \text{ дБ}$  в диапазоне 0,2...0,4 ГГц Эквивалентная шумовая температура приемных систем, приведенная ко входу антенны, определяется по формуле

$$T_{\text{эб}} = T_{\text{а}} + T_0 (1 - L_{\text{ф.прм}}) / L_{\text{ф.прм}} + T_{\text{прм}} / L_{\text{ф.прм}}$$

где  $T_a$  – эквивалентная шумовая температура антенны,  $L_{ф.прм}$  – коэффициент передачи приемного фидерного тракта,  $T_{прм}$  – шумовая температура приемного устройства,  $T_0 = 290 \pm K$  – температура окружающей среды.

Шумовая температура приемного устройства для современных малошумящих усилителей  $150 \pm K$ . Для бортовых приемных устройств диапазона 0,2 – 0,4 ГГц с учетом потерь во входных фильтрах и переключателях резерва шумовая температура  $T_{прм} \sim 300 \pm K$ . Шумовая температура приемных устройств абонентских терминалов с учетом потерь во входных цепях  $170 \pm K$ .

Эквивалентная шумовая температура для бортовой антенны определяется по формуле  $T_{ба} = T_{яа} + T_{яз} + C * (T_{яз} + T_{язз}) + T_{ша} + T_{об}$ , где  $C$  – коэффициент, учитывающий уровень энергии боковых лепестков,  $T_{як}$  – яркостная температура космического пространства,  $T_{яа}$  – яркостная температура атмосферы,  $T_{яз}$  – яркостная температура Земли,  $T_{язз}$  – яркостная температура излучения атмосферы, отраженного от Земли,  $T_{ша}$  – шумовая температура, обусловленная омическими потерями в антенне,  $T_{об}$  – шумовая температура, обусловленная омическими потерями в обтекателе.

При расчетах приняты следующие потери в фидерных трактах: в передающем фидерном тракте КА 0,7 дБ; в передающем фидерном тракте АТ 1,5 дБ, в приемном фидерном тракте КА 1,5 дБ, в приемном фидерном тракте АТ 1,5 дБ.

**Расчет энергетики радиолиний системы «Гонец».** Расчетные соотношения сигнал/шум в радиолиниях и запасы по энергетике приведены в логарифмической форме

$$P_c/P_{ш} = P_{пер} - L_{ф.пер} + G_б + G_з + K - L_0 - L_{пол} - L_{ап} - L_{доп} - L_m - T_{эkv} - DF,$$

где  $P_{пер}$  – эффективная мощность передатчика, дБ \* Вт;  $L_{ф.прд}$  – потери в передающем фидерном тракте, дБ;  $G_б$ ,  $G_з$  – коэффициенты усиления бортовой и абонентской (земной) антенн, дБ;  $L_0 = (l/4R)^2$ , дБ;  $L_{пол}$  – затухание в свободном пространстве, дБ;  $l$  – длина волны, м;  $R$  – расстояние от абонента до КА ( $R = 2934$  км при угле места  $\approx 20^\circ$ ), км;  $L_{пол}$  – поляризационные потери, дБ;  $L_{доп}$  – дополнительные потери на трассе распространения сигналов, определяемые состоянием атмосферы и ионосферы, дБ;  $L_m$  – потери за счет влияния морского волнения, дБ;  $K$  – постоянная Больцмана ( $K = -228.6$  дБ\*Вт/Гц\*±К);  $T_{эkv}$  – эквивалентная шумовая температура приемного тракта, приведенная к входу антенны, ±К;  $DF$  – информационная полоса сигнала, дБ \* Гц.

Вероятность ошибки на двоичный символ не более  $10^{-5}$  при использовании относительной фазовой телеграфии (ОФТ) обеспечивается при отношении  $P_c/P_{ш} \sim 10$  дБ. Без учета потерь в морской воде запасы в радиолиниях по энергетике составляют 8...14 дБ. Данные значения позволяют сделать вывод об устойчивости радиолиний при воздействии на АТ морских волн.

**Основные тактико-технические требования к созданию АРТМ КС.** АРТМ КС размещается в герметизированном контейнере. Условия эксплуатации внутри герметизированного контейнера (давление, температура, влажность, состав газовой среды) – нормальные. Антенное устройство располагается на верхней полусфере герметичного контейнера. Контейнер ВМ (его верхняя полусфера) может быть выполнен из сплава В96ТЦ1 или прозрачного для радиоволн материала:

- ситалл СТЛ-10, внутренний диаметр ~ 350 мм, толщина стенки 15... 20 мм;
- стекло С-93, внутренний диаметр 440мм, толщина стенки 20...25 мм;
- высота верхней части корпуса над поверхностью воды 300...400 мм;

- крепление приборной части внутри корпуса АРТМ КС – жесткое;
- допустимый вес аппаратуры, размещаемой внутри корпуса не более 5 кг.

Источник электропитания – литиевая батарея ФУЛ – 200: емкость 200 А/ч, напряжение 12 в, ток разряда не более 10 А, срок годности 12 лет.

Условия работы: волнение моря не более 3 – 4 баллов, температура окружающей воды не более 30<sup>0</sup>С.

АРТМ КС должен разрабатываться по базовой модификации приемо-передающего комплекса в конструкции, обеспечивающей размещение и работоспособность в заданных условиях эксплуатации. Информационно-управляющий комплекс терминала – датчика должен обеспечивать взаимодействие с источником информации модуля в необслуживаемом режиме.

АРТМ КС должен функционировать в двух режимах: режим накопления информации и режим ее передачи по спутниковым каналам системы "Гонец" с поверхности моря. Объем накапливаемой информации – до 2 Мбайт. Информация, переданная на КА всеми АРТМ КС, доставляется в центральный пункт. Вероятность необнаруженной ошибки при передаче информации по спутниковым каналам – не более 10<sup>-4</sup>. Энергопотребление абонентского терминала при работе на передачу не превышает 50 Вт, что соответствует току потребления 4 А по сети 12 В. Вес абонентского терминала (без веса антенны) составляет 1,6 кг. Вес антенны будет зависеть от выбранного типа и не превысит 1 кг.

Таким образом. Для передачи принимаемой и преобразованной в цифровую форму гидроакустической информации с системы функционально объединенных ГДАС по космическим каналам связи, разработан специальный автономный радиотехнический модуль (АРТМ КС). Разработанный модуль, кроме основной функции-передачи информации по космическим каналам связи, обеспечивает дополнительные возможности. Эти функции существенно повышают технические характеристики системы измерительных ГДАС и расширяют их возможности, что можно сформулировать так: совершенствование автономных донных гидроакустических станций и корабельных средств обеспечения и эксплуатации достигается применением цифровых технологий в тракте приема, первичной обработки и хранения информации; модульный принцип построения элементов приемно-регистрирующего тракта с открытой для наращивания цифровой линией передачи данных обеспечивает создание и применение приемных антенн различной конфигурации и частотного диапазона без существенной конструкторской доработки; цифровая система регистрации данных модульного типа обеспечивает наращивание объема памяти донной станции в зависимости от решаемой задачи; экономическая эффективность применения донных станций обеспечивается сокращением корабельного времени, которое создается при подготовке станций к автономной работе. Это обеспечивается за счет комплексного контроля модулей станции с помощью корабельного оборудования и использования ЭВМ, сокращения времени первичной обработки информации, на борту корабля и доставки ее на береговые центры по спутниковому каналу связи системы «Гонец», непосредственной передачи информации с поверхности моря на береговые центры по спутниковому каналу связи системы «Гонец». Сформулированные выводы, как результат научно-технических разработок по рассматриваемому направлению исследований характеризует их новизну и высокий уровень совокупности научно-технических решений проблемной задачи – комплексного измерения информации о гидрофизических полях морской среды и передачи ее в центральный пост анализа и управления по космическим каналам связи.

**Заключение по разделу.** Обоснована и решена совокупность сложных научно-технических задач, составляющих актуальную проблему народно-хозяйственного и оборонного значения. Сущность решенной проблемы, ее актуальность и научно-технический уровень подтверждается научными результатами, техническими решениями, конструкторскими разработками и созданием технологий их серийного производства, которые можно сформулировать в следующем виде.

Разработаны основы проектирования и создания системы функционально связанных (СФС) гидроакустических донных автономных станций (ГДАС), автономных радиотехнических модулей космической связи (АРТМ КС), а также технологии создания изделий ГДАС и АРТМ КС, налажено их серийное производство.

На основе СФС ГДАС и АРТМ КС сформирован быстро разворачиваемый измерительный радиогидроакустический комплекс (ИРГАК). Обоснована возможность использования комплекса в автономном режиме, а также в качестве модуля системы освещения и мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий. Технические характеристики и эксплуатационные возможности комплекса могут быть эффективно реализованы в создаваемой радиогидроакустической системе освещения морской экономической зоны Дальневосточного Региона (МЭЗ ДВР). ИРГАК обеспечивает возможность оперативного развертывания и последующего скрытного мониторинга гидроакустических и гидрофизических полей морской среды и объектов, а также их длительной консервации на магнитных носителях и одновременной передачей информации по каналу космической связи в Единый информационно-аналитический центр сбора и обработки информации. Разработанные и серийно изготавливаемые изделия ГДАС и АРТМ КС включают следующие радиотехнические тракты, боки, узлы и конструкторские решения. Автономные радиогидроакустические комплексы включают:

- корпусно-механическую часть (прочный корпус);
- систему преобразования акустических сигналов в аналоговый и цифровой сигналы;
- модуль первичной обработки информации;
- блок регистрации данных;
- систему гидроакустической связи и телеметрии;
- блок электропитания;
- систему сигнализации для обнаружения станции на поверхности моря.

Изделия автономных радиотехнических модулей спутниковой связи включают:

- корпусно-механическую часть (прочный корпус);
- систему промежуточной регистрации данных;
- систему гидроакустической связи и телеметрии;
- систему электропитания;
- абонентский приемо-передающий терминал системы связи с антенно-фидерным устройством;
- систему обнаружения станции на поверхности моря.

Разработанные и сформированные тракты гидроакустического канала связи, а также космического канала связи включают следующие блоки и узлы.

Гидроакустический канал связи между СФС ГДАС и обеспечивающим кораблем по характеру обмена сигналами в аппаратуре ГАКС её следует рассматривать как аппаратно-программный комплекс, который по функциональным признакам можно разделить на следующие составные части:

- аппаратура донной части ГАКС для пяти гидроакустических донных автономных станций;

- аппаратура ГАКС всплывающих модулей спутниковой системы связи;
- аппаратура судовой части ГАКС судового приемно-обрабатывающего комплекса;
- контрольно-проверочная аппаратура;
- специальное программно-математическое обеспечение ГАКС для судовой ЭВМ.

Указанное деление условно, так как контрольно-проверочную аппаратуру предлагается выполнить конструктивно встроенной в приемо-передатчики судовой и донной частей аппаратуры ГАКС, а также в качестве соответствующих частей программных средств. Отдельным блоком контрольно-проверочной аппаратуры судовой части ГАКС является дополнительная приемно-передающая антенна.

Космический канал связи СФС ГДАС и ЦП состоит из четырех основных элементов: космического сегмента; наземных терминалов; региональных станций; информационно-аналитического центра (ИАЦ) обработки данных и управления системой. Космический сегмент, сформированный с использованием КИРГАК, построен на основе низкоорбитальных аппаратов с бортовыми ретрансляционными комплексами. Аппараты движутся по близким к круговым полярным орбитам с высотой около 1500 км и наклоном 82,5 градуса. В состав космического сегмента входят 8...12 КА по 4...6 КА в двух "кольцах". Плоскости "колец" смещены друг относительно друга на 90 градусов по долготе восходящего узла.

Связь между наземными терминалами устанавливается через спутник, когда он находится в зоне наблюдения терминала. Связь внутри региона, диаметр которого меньше 5000 км (пятно наблюдения одного спутника), осуществляется в масштабе времени, близком реальному. Переданное на спутник сообщение запоминается и передается получателю, когда он появится в зоне наблюдения этого спутника. Бортовые ретрансляционные комплексы (БРК) каждого КА решают целевую задачу по ретрансляции информации между абонентами системы связи. Кроме того, БРК решает задачи по ретрансляции технологической информации, необходимой для работы системы связи, а также передает телеметрическую информацию, информацию для траекторных измерений и командно-программную для управления работой связных и служебных систем.

Результатами многолетней и разносторонней эксплуатации разработанных СФС ГДАС и АРТМ КС подтверждена их эксплуатационная надежность и высокая эффективность. Исследованиями и испытаниями изделий в различных морских условиях показано, что эксплуатационные технические характеристики разработанных изделий СКБ САМИ находятся на уровне известных мировых образцов.

Итак, решена совокупность сложных научных и технических задач, составляющих крупную проблему морской науки, народнохозяйственного и оборонного комплексов. Проведено обоснование и разработка научно-технических основ создания Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения морской обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы на протяженных акваториях. Решение основано на закономерностях и измерительных технологиях нелинейной просветной гидроакустики, а также радиогидроакустических комплексов. Радиогидроакустические комплексы обеспечивают возможность их эксплуатации, как в автономном варианте, так и в составе системы освещения морской обстановки, комплексного мониторинга гидрофизических и геофизических полей искусственных и естественных объектов, процессов и опасных явлений на протяженных акваториях морской экономической зоны Дальневосточного Региона (МЭЗ ДВР).

# **11. ФОРМИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРОСВЕТНОЙ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПРОТЯЖЕННОМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН**

## **11.1. Анализ разработок в создании параметрических акустических систем**

В разделе проводится обоснование возможности и практических путей формирования пространственно-развитых просветных параметрических систем в условиях многолучевого распространения акустических волн в протяженном гидроакустическом канале с переменными характеристиками среды и ее границ. Рассматриваются так же результаты морских испытаний макетов экспериментальных систем мониторинга на акваториях Дальневосточных морей, обеспечивающей дальний параметрический прием волн различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот сотни – десятки – единицы – доли Герца. Просветная параметрическая система обеспечивает так же прием волн, формируемых СНЧ колебаниями движущихся объектов и неоднородностей среды, как целого.

Использование закономерностей многолучевого распространения сигналов по трассам контролируемой акватории обеспечивает возможность достижения принципиально нового эффекта, а именно - дальнего параметрического приема информационных волн различной физической природы, формируемых в воздушной и морской среде, а также донном грунте. Такой эффект может быть достигнут, как будет далее показано за счет формирования рабочих зон нелинейного взаимодействия просветных и информационных волн в областях акустической освещенности, расположенных в поверхностных слоях среды, на оси подводного звукового канала (ПЗК) и вблизи морского дна. Формирование зон освещенности по трассе распространения просветных волн обеспечивается специальным расположением излучающих преобразователей системы мониторинга, а именно: на оси ПЗК, выше и ниже оси ПЗК. При этом, точное размещение излучающих блоков по глубине определяется путем расчетов лучевой структуры просветного поля по специально разработанным программам «Дальность» и «Амплитудно-фазовый фронт [74,128].

Формирование совокупности просветных линий по трассам контролируемой акватории выполняется относительно неподвижного излучающего центра по кругу или по периметру акватории. Именно это обеспечивает получение соизмеримой с пространственным объемом и протяженностью акватории пространственно-развитой просветной параметрической антенны, исключающей недостатки прототипа, а также классических антенн и получение принципиально новых измерительных характеристик.

Большой пространственный объем просветных параметрических антенн, а также их протяженность по контролируемой акватории, (десятки-сотни километров) обеспечивает возможность эффективного приема информационных волн малых амплитуд инфранизкочастотного, дробного и СНЧ диапазонов по всей контролируемой акватории, в том числе волн, поступающих в водную среду из атмосферы и морского дна.

Таким образом, построение протяженных многолучевых просветных параметрических систем на протяженных морских акваториях обеспечивается за счет формирования

многолучевой пространственно-развитой параметрической антенны, обеспечивающей дальний и сверхдальний параметрический прием волн различной физической природы в диапазоне частот сотни – десятки – единицы - доли Герца.

В настоящем разделе представлено решение дальнего (десятки-сотни километров) параметрического приема информационных волн, основанное на закономерностях нелинейной просветной гидроакустики [31,32,99].

В просветной измерительной системе используется три ненаправленных излучателя (преобразователя), которые располагают на оси ПЗК, выше и ниже оси ПЗК. Приемные блоки просветной системы, состоящие из трех ненаправленных преобразователей, располагают в вертикальной плоскости по треугольнику. В каждом приемном блоке измеряют функции корреляции принимаемых просветных сигналов между средним и крайними (верхним и нижним) преобразователями, затем измеряют функции их взаимной корреляции, по которым затем определяют направления приема информационных волн по просветным лучам сверху и снизу с повышенной точностью. Определение углов прихода просветных лучей сверху и снизу тремя приемными блоками обеспечивает наблюдение и контроль всех горизонтов трассы, кроме тех горизонтов, которые попадают в зоны тени, где просветное поле формируется слабыми отраженными от дна и морской поверхности лучами [1,2,36]. При этом пологие лучи, распространяющиеся вдоль оси ПЗК, обеспечивают сплошную засветку пространства на горизонте оси канала. Рассмотренные закономерности формирования пространственной структуры просветного акустического поля использовались при разработке принципов построения и практических путей эксплуатации системы мониторинга полей искусственных и естественных источников атмосферы, океана и земной коры [7,67,74].

Разработки гидроакустических систем мониторинга полей объектов и среды на основе приемных параметрических антенн (ППА) в России, а также в зарубежных странах (преимущественно в США и Японии) интенсивно проводились еще в прошлом столетии [21,22]. В России параметрические антенны разрабатывались и были успешно реализованы акустикой Таганрогского политехнического института, о также другими акустикой, что широко опубликовано в изданиях различного уровня [24,28]. Параметрические антенны и реализующие их радиотехнические системы основаны на использовании естественных нелинейных свойств морской среды. В буксируемых за морскими судами ППА, дополнительно к нелинейным свойствам морской среды используются нелинейные свойства области кильватерного следа судна-носителя. Во всех указанных случаях применялась только высокочастотная акустическая накачка среды, частота которой составляла десятки, чаще сотни кГц. Параметрические антенны расширили возможности приема информационных волн в низкочастотную область, а также повысили чувствительность приема таких волн. При этом дальность приема волн в системах с высокочастотными параметрическими антеннами оставалась незначительной и составляла сотни метров и только в отдельных случаях более одного километра. Основными недостатками параметрических систем с высокочастотными приемными антеннами считаются - ограниченная дальность приема информационных полей и ограниченная возможность измерения их пространственно-временных характеристик.

Принципиальные недостатки известных высокочастотных параметрических антенн, являются следующие. Малый объем рабочей зоны нелинейного взаимодействия волн накачки среды и измеряемых информационных, что особенно ограничивает возможность эффективного приема волн инфразвукового и дробного диапазонов частот, которые формируются процессами, и явлениями в атмосфере, океане и земной коре.



Устранение этих недостатков и достижение новых положительных эффектов может быть достигнуто за счет формирования низкочастотной просветной системы мониторинга, как пространственно-развитой многолучевой параметрической антенны, соизмеримой с объемом и протяженностью контролируемой акватории.

Система обеспечивает дальний и сверхдальний параметрический прием волн различной физической природы (акустических, электромагнитных, гидродинамических), формируемых естественными и искусственными источниками, явлениями и процессами атмосферы, океана и земной коры. Диапазон частот принимаемых волн составляет сотни – десятки – единицы - доли Герца, включая СНЧ колебания движущихся объектов, как целого. Система обеспечивает так же возможность оперативной подстройки режимов работы системы к изменениям условий среды распространения просветных волн, а также к проявлению признаков источников информационных волн.

Радиогидроакустическая система параметрического приема волн, формируемых источниками и явлений атмосферы, океана и земной коры в морской среде включает в себя следующие блоки. Установленные на противоположных границах контролируемой среды излучающий и, как минимум, три приемных акустических преобразователя. Сформированные между ними, три зоны нелинейного взаимодействия просветных и информационных волн (как просветные параметрические антенны). Соединенные с излучающими и приемными преобразователями, соответственно, излучающий тракт системы, включающий в себя последовательно соединенные блоки: формирователя сигналов стабилизированной частоты в диапазоне частот десятки-сотни Герц, усилителя мощности сигналов и акустического преобразователя, как излучателя сигналов подсветки среды. Тракт приема нелинейно преобразованных просветных волн, который включает в себя последовательно соединенные блоки: трехканального полосового усилителя просветных сигналов, преобразователя частотно-временного масштаба в высокочастотную область, узкополосного анализатора спектров, измерителя функций корреляции сигналов между средним и крайними приемными преобразователями, далее блока выделения функции их взаимной корреляции и регистратора. Кроме того, при формировании радиогидроакустической системы мониторинга выполняют следующие факторы, обеспечивающие ее многоканальность, многофункциональность масштабность, а именно.

1. Многоканальную просветную параметрическую систему формируют как комплекс вертикальных многолучевых параметрических антенн, расположенных по кругу или периметру контролируемой акватории через  $45^\circ$  и ориентированных радиально от излучающего центра к периферии, что обеспечивает формирование общей пространственно-развитой параметрической системы мониторинга.

2. Расстояние между акустическими преобразователями приемных блоков, размещенных в вертикальной плоскости, устанавливается в соответствии с корреляционными характеристиками вертикальной структуры просветного акустического поля.

3. Широкомасштабная просветная радиогидроакустическая система может масштабироваться (наращивается) путем объединения измеряемой информации с аналогичных подсистем мониторинга, сформированных на смежных акваториях, в информационно-аналитическом центре с использованием каналов радиосвязи.

Функциональные схемы макетов экспериментальных систем мониторинга полей различной физической природы, прошедших испытания на акваториях Дальневосточных морей приведены на рисунках 1.14, 1.17, 1.20, 3.1, 3.4, 5.2. При проведении морских испытаний макетов экспериментальных систем мониторинг получены положи-

тельные результаты дальнего параметрического приема волн различной физической природы (акустических, электромагнитных и гидродинамических), формируемых источниками и процессам атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот сотни – десятки – единицы – доли Герца [1,2,7].

Работа просветной радиогидроакустической системы освещения обстановки и мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры осуществляется следующим образом. Излучатели подсветки среды и приемные блоки разносят по контролируемой акватории на необходимое расстояние (десятки-сотни километров) и размещают (заглубляют и устанавливают) на оси ПЗК, а также ниже и выше оси ПЗК, что обеспечивает формирование в ней пространственно развитой многолучевой параметрической антенны. Измерение признаков проявления информационных волн атмосферы, донных морских, а также береговых источников проводится параллельно и одновременно, а их идентификация осуществляется по характерным признакам спектров и пространственно временной динамики принимаемых и анализируемых в блоке анализа комплексной информации и окончательно в ИАЦ [7,67,74]. Для донных геофизических волн, например, волн - предвестников сильных землетрясений может также проводится специальная обработка сигналов, например, методом полиспектрального анализа, обеспечивающего динамику пространственно-временных характеристик спектральных составляющих, как характерных информационных признаков зарождения и прохождения сейсмических возмущений земной коры [281].

Создаваемая радиогидроакустическая система может входить в общую Региональную систему освещения морской обстановки, посредством объединения комплексной информации в блоке ИАЦ 21. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность подстройки формируемых в излучающем тракте 1 просветных сигналов с учетом состояния среды распространения просветных волн. Кроме того, это обеспечивает возможность подстройки режимов работы системы мониторинга, как широкомасштабной к изменяющимся условиям среды распространения просветных сигналов, а также к многообразию проявления источников информационных волн.

Основными закономерностями нелинейной просветной гидроакустики, на основе которых проведена разработка просветной системы мониторинга являются: параметрическая модель нелинейной просветной гидроакустики, принципы формирования просветных параметрических антенн в условиях протяженного канала распространения акустических волн, а также нелинейное взаимодействие волн различной физической природы в морской среде.

## **11.2. Формирование просветных параметрических антенн в многолучевом канале распространения акустических волн**

Использование закономерностей многолучевого распространения сигналов по трассам контролируемой акватории обеспечивает достижение принципиально нового эффекта, а именно - дальнего параметрического приема информационных волн различной физической природы, формируемых в воздушной и морской среде, а также донном грунте. Такой эффект может быть достигнут, как будет показано в описании этого технического решения за счет формирования зон акустической освещенности в приповерхностных слоях, на оси подводного звукового канала (ПЗК) и вблизи дна контролируемой морской акватории. Формирование зон освещенности по трассе распростране-

ния просветных волн обеспечивается специальным расположением излучающих преобразователей системы мониторинга в морской среде, а именно: на оси ПЗК, выше и ниже оси ПЗК. При этом, точное размещение излучающих блоков по глубине определяется путем расчетов лучевой структуры просветного поля по специально разработанным программам [74,128].

Формирование совокупности просветных линий по трассам контролируемой акватории выполняется относительно неподвижного излучающего центра по кругу или по периметру акватории. Именно это обеспечивает получение соизмеримой с пространственным объемом и протяженностью акватории пространственно-развитой просветной параметрической антенны, исключающей недостатки прототипа, а также классических антенн и получение принципиально новых измерительных характеристик.

Большой пространственный объем просветных параметрических антенн, а также их протяженность по контролируемой акватории, (десятки-сотни километров) обеспечивает возможность эффективного приема информационных волн малых амплитуд инфранизкочастотного, дробного и СНЧ диапазонов по всей контролируемой акватории, в том числе волн, поступающих в водную среду из атмосферы и морского дна.

Пологие лучи, распространяющиеся вдоль оси ПЗК, обеспечивают сплошную зацветку пространства на горизонте оси канала. Рассмотренные закономерности использовались при разработке радиогидроакустической системы мониторинга источников полей атмосферы, океана и земной коры.

Таким образом, создание в морской среде протяженных многолучевых просветных параметрических систем достигается за счет формирования многолучевой пространственно развитой параметрической антенны, обеспечивающей дальний и сверхдальний параметрический прием волн различной физической природы в диапазоне частот сотни – десятки – единицы - доли Герца.

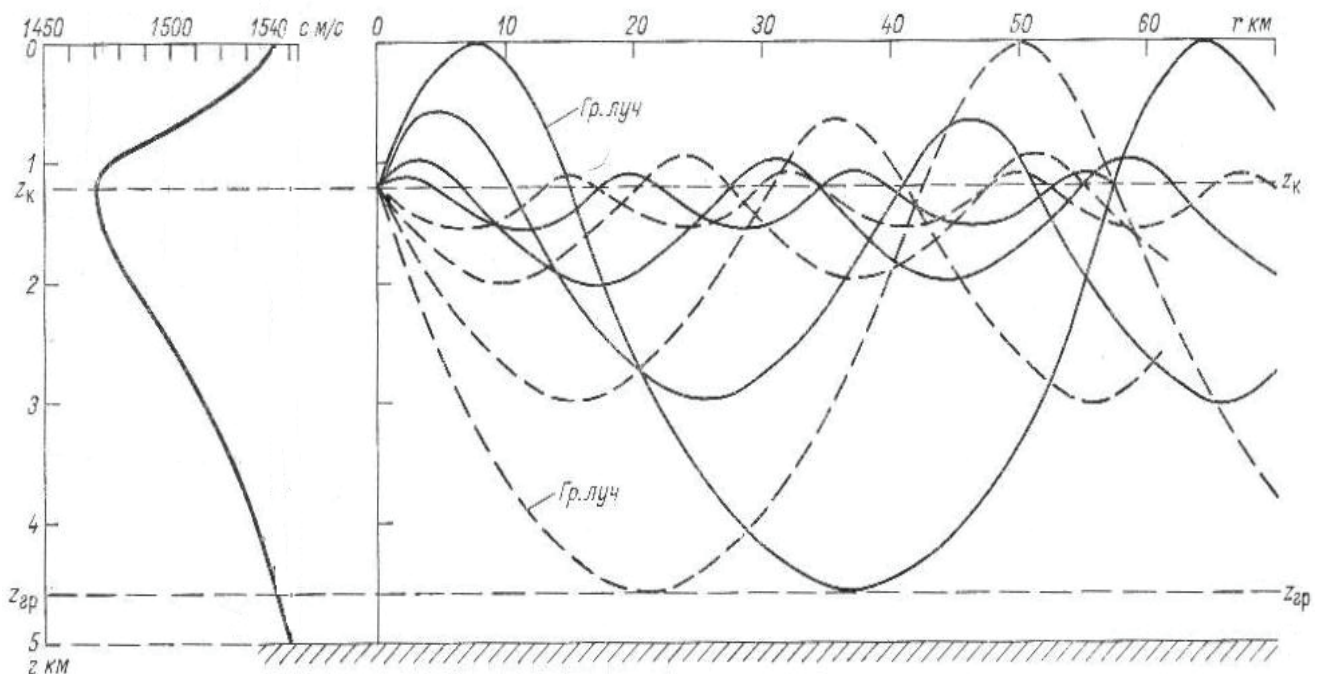


Рис. 11.1. Лучевая структура просветного акустического поля в протяженном канале распространения волн

В просветной измерительной системе используется три ненаправленных излучателя (преобразователя), которые располагают на оси ПЗК, выше и ниже оси ПЗК. Приемные блоки просветной системы, состоящие из трех ненаправленных преобразователей, располагают в вертикальной плоскости по треугольнику. В каждом приемном блоке измеряют функции корреляции принимаемых просветных сигналов между средним и крайними (верхним и нижним) преобразователями, затем измеряют функции их взаимной корреляции, по которым затем определяют направления приема информационных волн по просветным лучам сверху и снизу с повышенной точностью. Определение углов прихода просветных лучей сверху и снизу тремя приемными блоками обеспечивает наблюдение и контроль всех горизонтов трассы, кроме тех горизонтов, которые попадают в зоны тени, где просветное поле формируется слабыми отраженными от дна и морской поверхности лучами [282]. В качестве примера на рисунке 1.11 приведена лучевая структура просветного акустического поля на протяженной трассе с переменными характеристиками среды и ее границ.

### **11.3. Организационные и научно-технические пути создания Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры на основе разработок измерительного поля**

В разделе рассматривается применение стационарного просветного гидроакустического поля в решении задачи мониторинга полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками и явлениями. Приводятся технические разработки по совершенствованию структуры и измерительных технологий измерительного поля.

Берингово, Охотское и Японское моря, а также Северо-Западная часть Тихого океана, омывающая Курильскую островную гряду, относятся к зоне, требующей решения правительством РФ проблемных задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов.

К таким задачам можно отнести:

- интенсивное использование транспортных коммуникации судами и кораблями ВМФ РФ и иностранных государств;
- масштабное океаническое и прибрежное рыболовство;
- нефтяная и газовая добыча углеводородов;
- освещение обстановки, постоянный мониторинг полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земно коры;
- историческое соперничество главных геополитических оппонентов РФ за обладание экономической и военно-морской инициативой в Дальневосточном регионе.

Климатическая, гидродинамическая и геодинамическая аномалии Дальневосточного региона дополнительно усложняют экстремальный характер решения рассматриваемых задач. Аномальная специфика региона в основном проявляется в повышенной периодичности таких природных явлений, как: разрушительные землетрясения, цунами, мощные дождевые и снежные тайфуны, ураганные ветры, изменчивые поверхностные и

глубинные течения, колебания уровня морей и штормовые нагоны, вызывающие разрушительные наводнения.

Разработки научно-технических основ и практических путей формирования Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения и мониторинга полей проводятся с учетом существующих отечественных и известных зарубежных разработок [1-12]. Совокупность перечисленных аномалий, включая и подводные, а также подземные ядерные взрывы должны своевременно обнаруживаться, а также надежно регистрироваться радиотехническими и гидроакустическими средствами наблюдения по их пространственно-временным параметрам и характеристикам [13-20,90].

С появлением на морском шельфе о. Сахалин стационарных технологических сооружений, принадлежащих иностранным владельцам нефтегазовых проектов, возникли дополнительные элементы военно-стратегической угрозы морской экономической зоне РФ. Стационары и обслуживающая их мобильная морская и воздушная инфраструктура насыщены океанологической аппаратурой. В настоящее время нет объективных препятствий тому, чтобы данные приборных измерений, осуществляемых в российских территориальных водах, оперативных зонах действия ВМФ РФ и экономической зоне, не передавались в зарубежные морские ведомства в реальном времени.

При этом, стремление указанными структурами расширить географию и объем морских исследований за пределы разумно обоснованных производственных потребностей или же малообоснованное привлечение к указанным работам иностранных подрядчиков свидетельствуют в пользу допущений о новых элементах военно-стратегической угрозы для РФ.

По этой причине, создаваемая Дальневосточная система освещения и мониторинга морской обстановки (ДСО и ММО) организационно должна быть широко-масштабной, многофункциональной и обеспечивать совокупное решение задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов РФ. В разработке системы должны использоваться, в качестве технологической основы, закономерности и измерительные технологии низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, а в качестве, технической основы, радиотехнические гидроакустические средства морского приборостроения. Такие средства используются в виде быстро разворачиваемых радиогидроакустических комплексов, создаваемых в Федеральном Государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН), Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН [1,2,13-20,90].

Проанализируем построение и использование системы просветного измерительного поля в проведении исследований гидрофизических полей, испытаний разрабатываемых средств морского приборостроения. Проведем обоснование практических путей его оборудования на современном научно-техническом уровне для использования в создаваемой Дальневосточной радиогидроакустической системе освещения и мониторинга полей различной физической природы. Такие поля формируются искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот десятки – единицы килогерц, сотни – десятки – единицы – доли Герца.

Исходя из этого, следует особо отметить, что создание ДСО и ММО в целях интеграции и рационального использования комплексов и средств ведомственного подчинен-

ния предусмотрено Указом и многочисленными Решениями Правительства РФ и имеет долговременные исторические корни. Для этого силами сотрудников ФБГУН СКБ САМИ ДВО РАН в 1986 г. было разработано и оборудовано первое и единственное в Дальневосточном регионе стационарное просветное гидроакустическое поле на трассе о. Сахалин - о. Итуруп, протяженностью 345 километров.

За период с 1986 года по настоящее время, на трассе проведен большой и многосторонний объем испытаний разрабатываемых средств морского приборостроения и морских экспериментов, в том числе и международных, совместно с США в рамках выполнения Договора об ограничении стратегического вооружения. По материалам многолетних научно-технических разработок и проведенных на их основе морских испытаний сформирован банк данных по результатам фундаментальных и прикладных исследований.

К настоящему времени экспериментальное морское поле в плане технического оборудования устарело и полностью вышло из строя, планируется его восстановление на современном научно-техническом уровне.

В течение последующих лет (2014-2018 г.г.) в интересах развития технологических и технических основ создания ДСО и ММО в ФБГУН СКБ САМИ планируется проведение следующих фундаментальных и прикладных научных исследований по решению следующих задач.

1. Создаваемая система освещения обстановки в атмосфере, океане и земной коре, мониторинга их полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями на акваториях МЭЗ ДВР должна быть широкомасштабной радиогидроакустической, что характеризует ее как многофункциональную интегрированную систему, обеспечивающую решение задач морской науки, оборонного и народно-хозяйственного комплексов Государства.

2. Обоснование измерительных технологий нелинейной низкочастотной просветной гидроакустики, применяемой совместно с высокочастотной нелинейной гидроакустикой. В этой связи необходимо отметить, что использование технологий нелинейной просветной гидроакустики обеспечивает дальнейшее обнаружение акустически слабые морских объектов по признакам их полей различной физической природы (акустических, электромагнитных и гидродинамических), а также параметрический прием гидрофизических и геофизических полей среды и морского дна в диапазоне частот сотни-десятки – единицы – доли Герца.

3. Разработка технических путей внедрения низкочастотного просветного метода гидролокации в стационарные, мобильные и быстро разворачиваемые системы мониторинга, освоения и охраны Охотского моря.

4. Обоснование функционального назначения, структуры и принципов работы информационно аналитического центра (ИАИ), обеспечивающего сбор, анализ многоканально измеряемой многофункциональной информации об обстановке и измеряемых полях среды и объектах, формировании команд управления работой отдельных блоков создаваемой системы.

В этой связи, следует заметить, что измерительные технологии низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, как нового научно-технического направления, объединяющего гидрофизику, геофизику и радиофизику, обеспечивают решение задачи дальнего и сверхдальнего параметрического приема волн малых амплитуд различной физической природы, формируемых акустически слабые объектами и источниками на дистанциях, достигающих сотни километров.

Общеизвестно, что современные подводные лодки являются малозумными и слабо отражающими объектами, формирующими характерные акустические, электромагнитные и гидродинамические волны в диапазоне частот сотни – десятки – единицы – доли Герца, которые эффективно принимаются технологиями нелинейной просветной гидроакустики [1,2,20,30-32].

5. Создание макетов пространственно развитых цифровых гидроакустических антенн, а также антенных решеток. Система таких антенных решеток может осуществлять мониторинг и объемное наблюдение пространственно-временных характеристик полей различной физической природы акваторий Охотского и Японского морей с использованием просветной гидроакустической томографии [4,6].

Формирование просветных систем мониторинга, как масштабируемых в пределах акваторий ДСО и ММО на основе разработок информационно аналитического центра (ИАЦ) радиогидроакустических комплексов и модулей космической связи, преимущественно с использованием низкоорбитальной системы «Гонец», созданной в СКБ САМИ ДВО РАН.

Работа ДСО и ММО предполагает включение в ее состав информационно-аналитического центра (ИАЦ), обеспечивающего обобщение, анализ комплексной информации и выдачу команд на управление работой подсистемами на основе технологий ИАЦ. Основные разработки по созданию и использованию ИАЦ для ограниченного объема информации проведены и использовались при испытаниях макетов систем освещения обстановки, мониторинга и полей акваторий ДВР в СКБ САМИ ДВО РАН [7,67,68].

Основываясь на проведенных в последние годы в ДВО РАН (в том числе, выполненных с участием авторов) исследованиях можно сделать следующие выводы:

1. Возможным и наиболее эффективным направлением создания современной ДСО и ММО, как многофункциональной широкомасштабной и интегрированной, является перевод морской деятельности научных, промышленных и оборонных предприятий в Дальневосточном регионе на общую системно-компьютеризованную базу, подобную созданной в последние десятилетия и постоянно совершенствуемой в Военно-Морских Силах США [1,3,7,67,68,250,278].

2. Выполненные в Дальневосточном регионе научно-технические разработки нелинейной просветной гидроакустики и средств морского приборостроения, обеспечивают решение научно-технической задачи создания ДСО и ММО, комплексного мониторинга полей различной природы морских, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и опасными явлениями атмосферы океана и земной коры. [1-7,13-20].

Вариант радиогидроакустической системы освещения и мониторинга, формируемой на основе измерительных технологий просветной гидроакустики и средств морского приборостроения представлен на рисунке 11.2.

В качестве примеров можно привести следующие факты. В 2002 году ФБГУН СКБ САМИ завершило изготовление и испытания нескольких опытных образцов автономной глубоководной донной гидроакустической станции (ГДАС). Эти испытания показали, что ГДАС является уникальным измерительным инструментом в исследовании гидроакустической обстановки в различных районах Мирового океана, а также в комплексных исследованиях пространственно-временных характеристик полей объектов и среды методами акустической томографии [13-19,90].

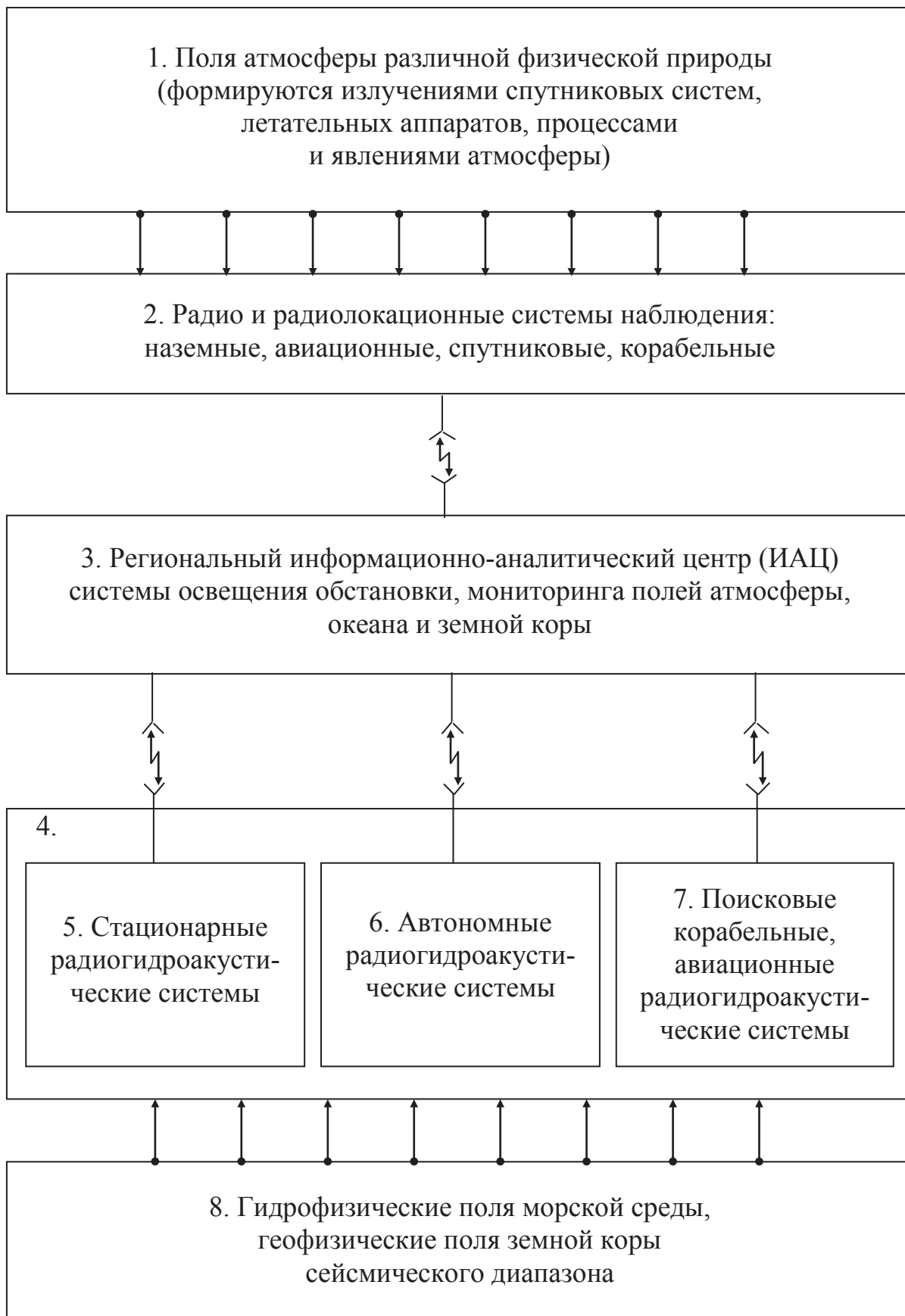


Рис. 11.2. Структура радиогидроакустической системы освещения и мониторинга полей, атмосферы, океана и земной коры



Одновременно с испытаниями были проведены разработки радиогидроакустических автономных средств обмена цифровой информацией от установленных в заданном районе ГДАС по каналам системы спутниковой связи «Гонец». В спутниковую систему радиосвязи включена так же гидроакустическая охранная система, которая нашла свое применение на многочисленных морских инженерно–технических сооружениях и объектах нефтегазовых разработок шельфа о. Сахалин, а так же на других охраняемых от нарушителей и диверсантов объектах.

В настоящее время проводятся консультации с заинтересованными организациями по вопросу, оборудования на современном техническом уровне стационарного гидроакустического поля на трассе о. Сахалин – о. Итуруп. Сохраняя свое основное назначение как научно-исследовательского гидроакустического полигона, оно может быть включено в состав создаваемой ДСО и ММО.

Сотрудники СКБ САМИ выполнили фундаментальные научные исследования по этому направлению. Содержание исследований заключалось в разработке основ и практических путей построения ведомственной системы освещения морской обстановки (СОМО), комплексного мониторинга полей различной физической природы в районе о. Сахалин, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и опасными явлениями атмосферы, океана и земной коры в широком диапазоне частот, сотни – десятки – единицы – доли Герца.

Ведомственная СОМО должна обеспечивать решение задач:

- обеспечение безопасности мореплавания в районе о. Сахалин,
- информационное сопровождение деятельности морских организаций,
- наблюдение за состоянием морских акваторий в интересах экологического мониторинга нефтегазовых проектов, освоение биоресурсов.

Независимо от объема запросов каждого конкретного потребителя создаваемая система должна интегрировать и обрабатывать:

- информацию от различных ведомственных и региональных служб постоянного наблюдения морской обстановки;
- данные гидрометеорологических донесений различных ведомств, флотских диспетчерских радиogramм и других оперативных показателей;
- данные космических наблюдений в радио - и оптическом диапазонах;
- текущую информацию от радиолокационных средств наземного, морского и воздушного базирования в реальном масштабе времени;
- информацию от необслуживаемых гидроакустических аппаратов, стационарных гидроакустических систем, различных ведомств;
- данные о плановых и оперативных заданиях, о дислокации по периодическим радиодонесениям судов и кораблей ВМФ, ФПС;
- данные экологического мониторинга акваторий, сейсмологических и синоптических наблюдений об экологической обстановке и чрезвычайных ситуациях.

## 11.4. Результаты испытаний экспериментальных радиогидроакустических систем мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры

Морские испытания макетов экспериментальных просветных параметрических систем мониторинга проводились в различных районах Дальневосточных морей – Японском, Охотском и Беринговом морях. Наиболее значимые испытания проводились в переходной зоне Охотского и Японского морей, а также на акватории залива Авачинский, п-в Камчатка и в Татарском проливе. Испытания проводились с использованием стационарных донных гидроакустических антенн, стационарных и мобильных, преимущественно забортных, излучателей, а так же с использованием радиогидроакустических средств морского приборостроения, разрабатываемых и создаваемых в ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН, в период с 80-х годов прошлого столетия по настоящее время. Основные результаты морских испытаний макетов системы представлены на рисунках 11.3 – 11.9. В совокупности с рисунками 1.14, 1.17, 1.20, 3.1, 3.4, 5.2, 9.1 приведенными в разделах 1,3,5,9 они подтверждают практическую возможность, создания Радиогидроакустической системы освещения и мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры, но эффективность ее работы в протяженном гидроакустическом канале.

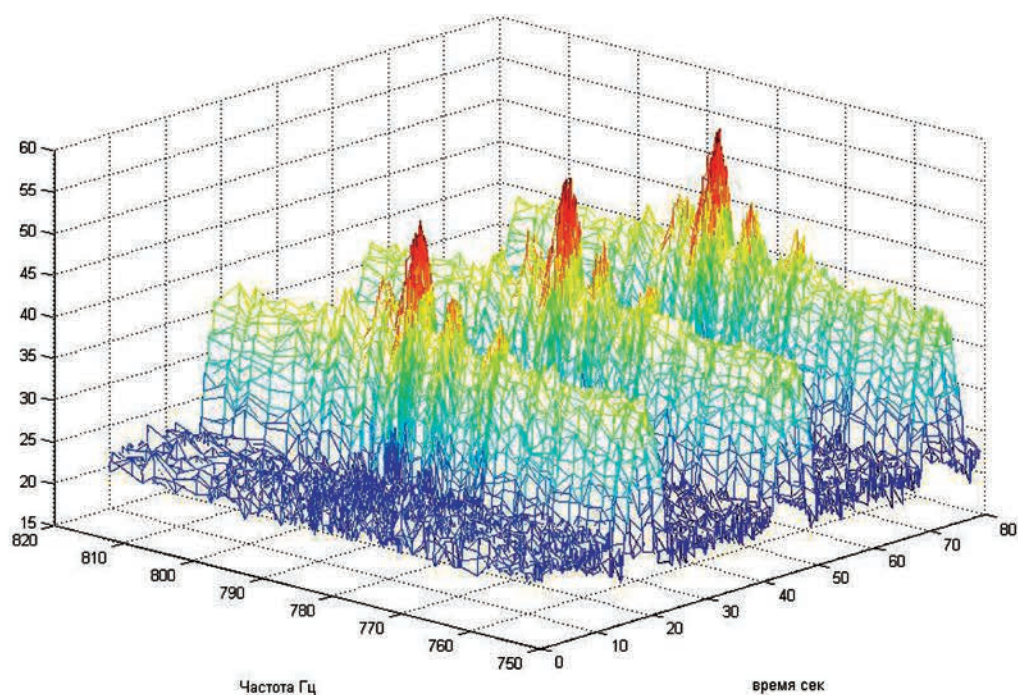


Рис. 11.3.

На рисунке 11.3. представлен спектр сигнала предвестника землетрясений в формате 3D. Сейсмические возмущения в районах Курильской островной гряды регистрировались на измерительном полигоне о. Сахалин. Протяженность трассы составляет около 300 км

На рисунках 11.4, 11.5 представлены спектрограммы шумового излучения атмосферного источника (летательного аппарата).

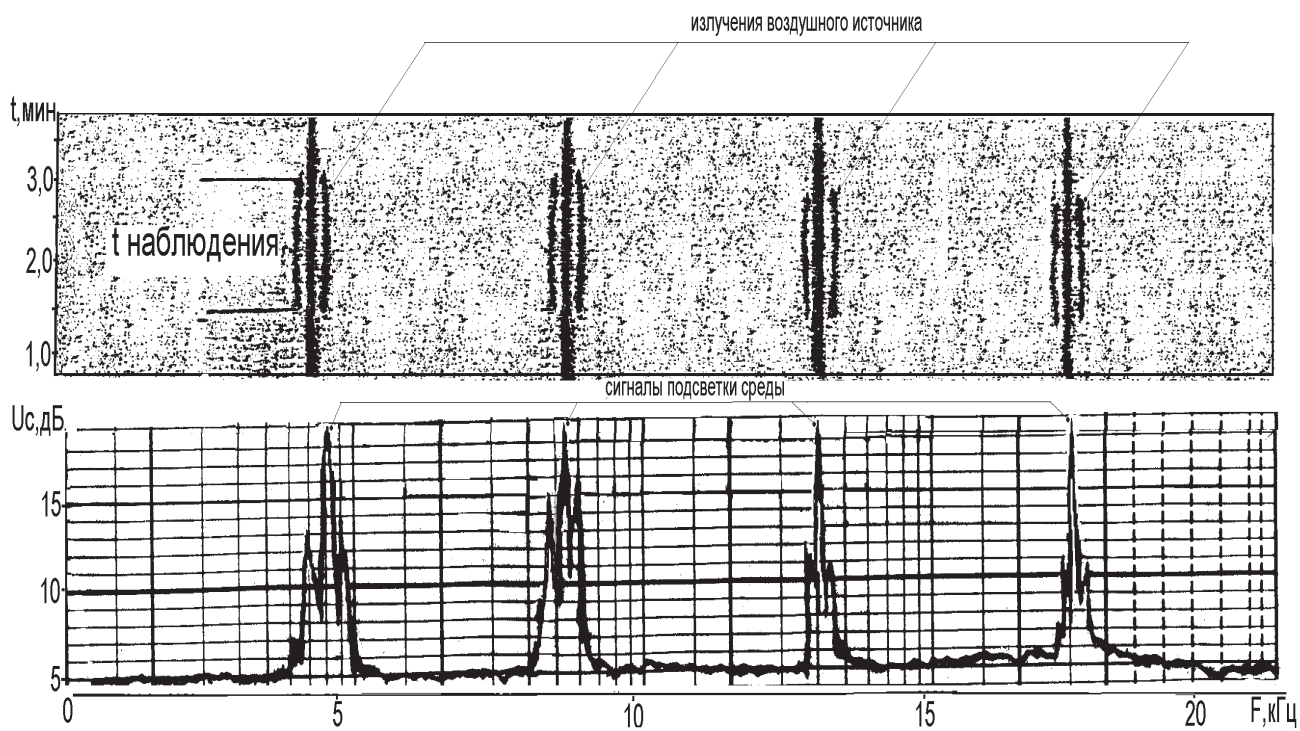


Рис. 11.4

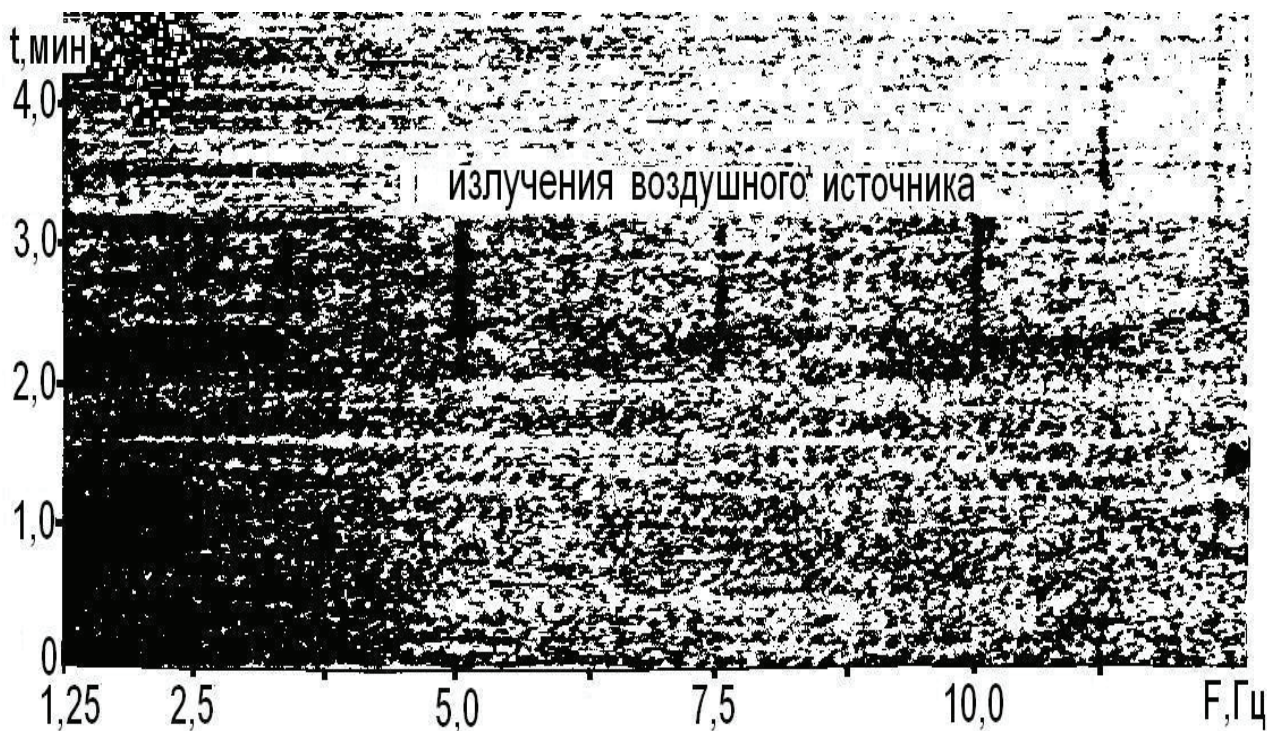


Рис. 11.5

На рисунке 11.6. представлена спектрограмма сейсмических излучений береговых инженерных сооружений на о. Сахалин. Параметрические измерения выполнены на трассе о. Сахалин – береговая линия Приморья (мыс Сосунова), протяженность просветной трассы составляла 310 км.

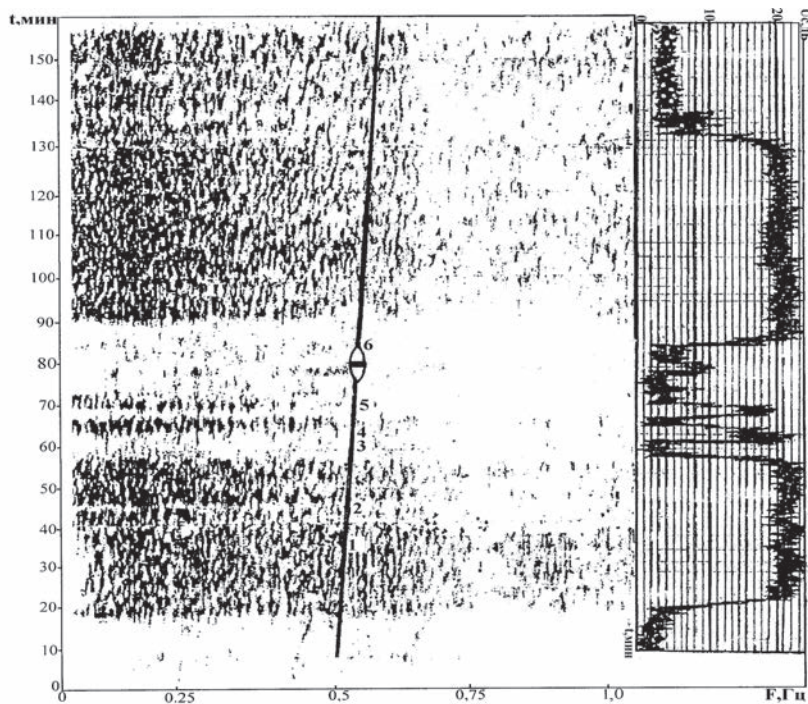


Рис. 11.6.

На рисунке 11.7. представлены атмосферные радиолокационные измерения волнений поверхности моря при наличии и отсутствии подводного объекта. Измерения выполнялись разнесенными в атмосфере радиолокационными станциями.

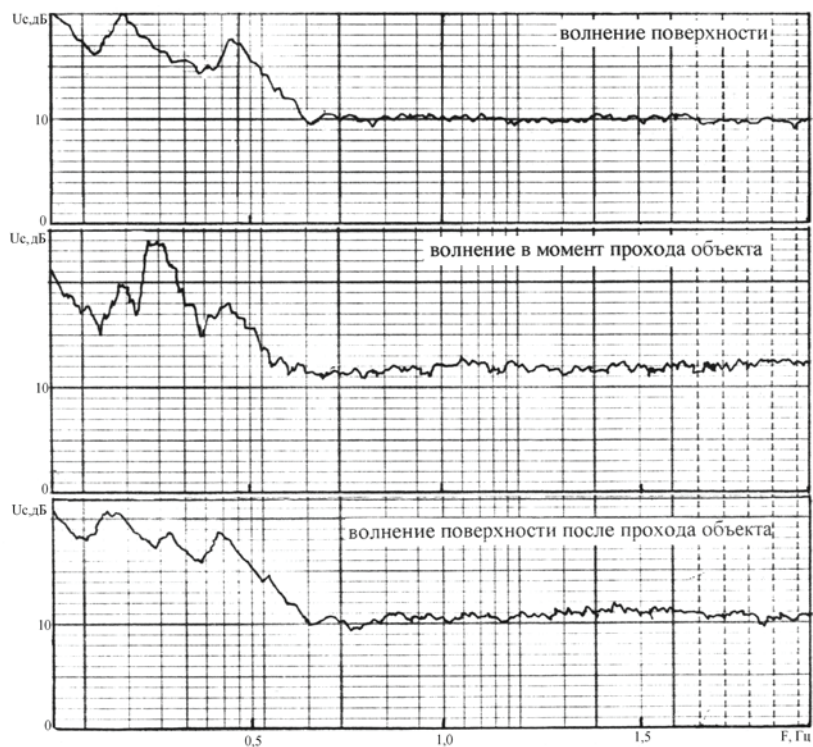


Рис. 11.7

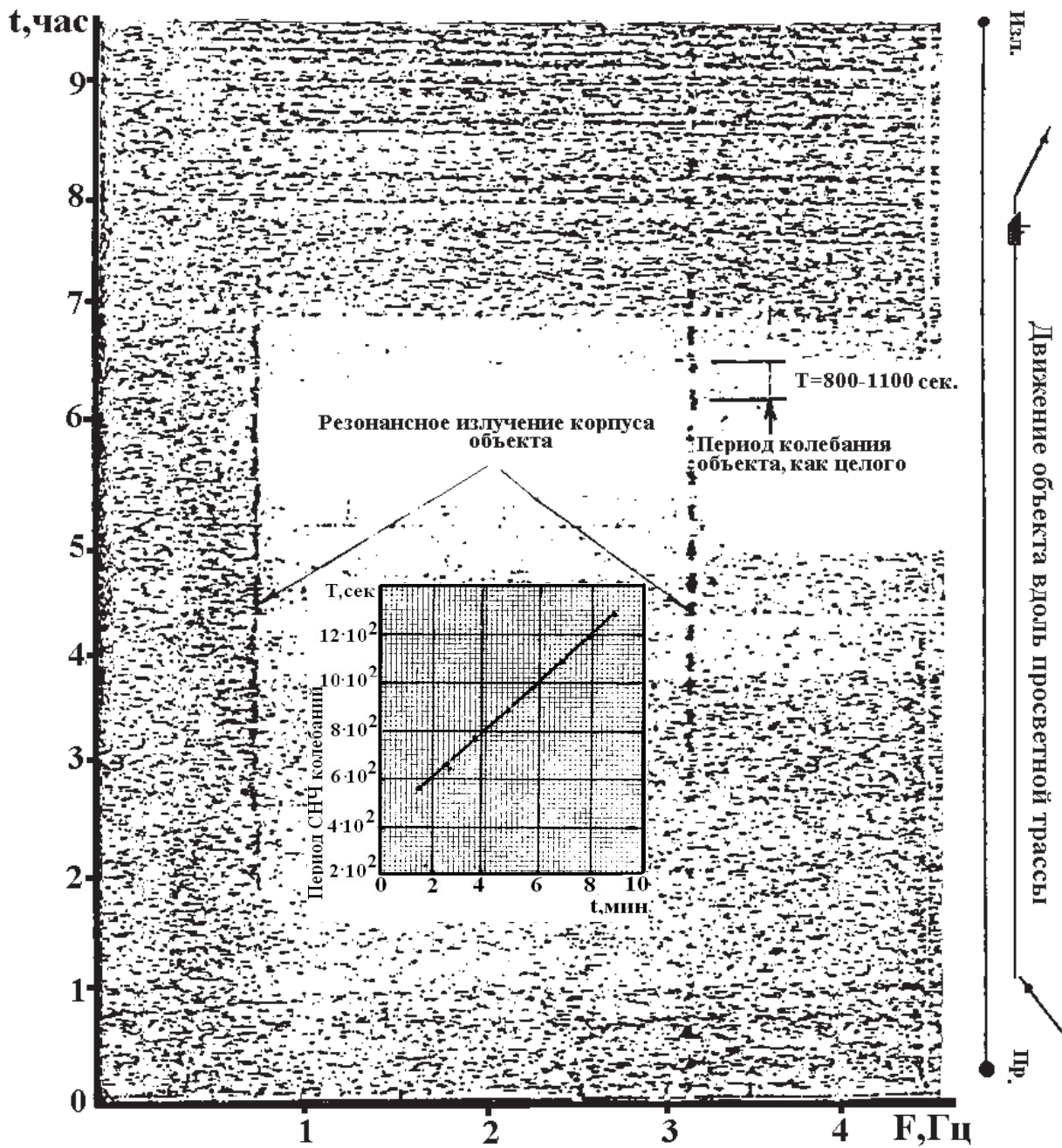
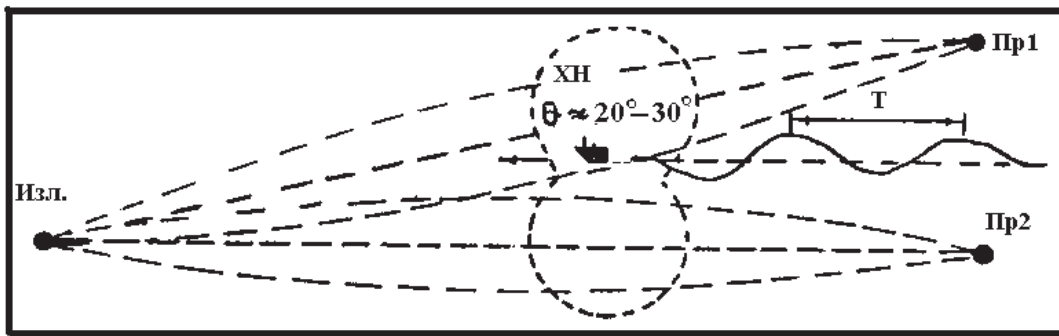


Рис. 11.8

На рисунке 11.8 приведена спектрограмма просветного сигнала, частота 400 Гц, преобразованного гидродинамическими волнами и резонансными излучениями корпуса морского судна, которые, в свою очередь, модулированы СЧЧ колебаниями движущегося судна, как целого. Протяженность просветной трассы составляла 345 километров.

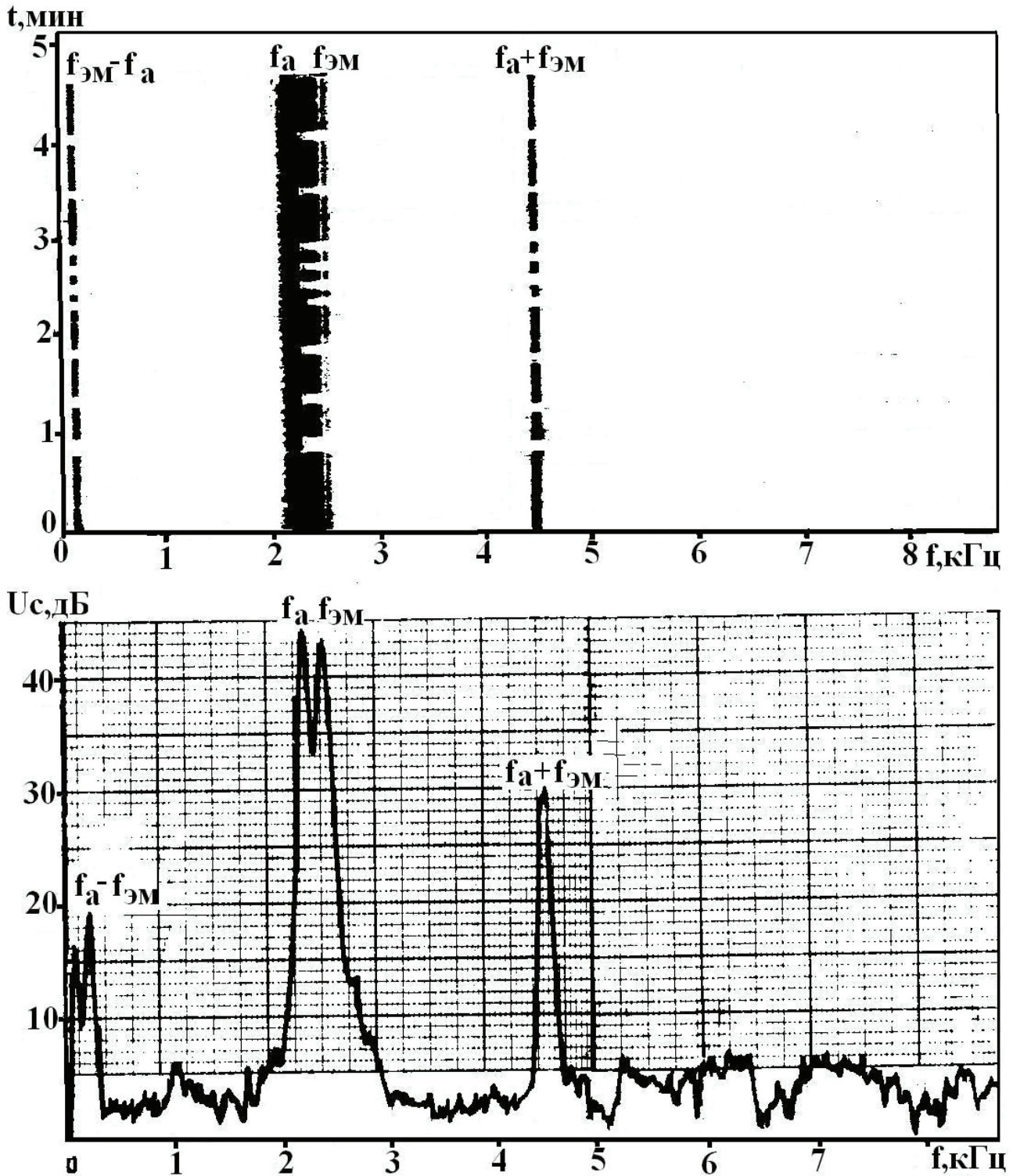


Рис. 11.9

На рисунке 11.19. приведены спектрограмма и спектр сигналов информационных волн, сформированных электромагнитными излучениями забортного излучателя. На которых наблюдаются сигналы суммарной и разностной частоты, как телеграфные посылки сигнала «SOS». Протяженность линий просветной звукоподводной связи составляла 25 и 35 км.

Проведен большой объем теоретических и экспериментальных исследований метода просветной гидроакустики, направленных на разработку научно технических основ формирования и практической эксплуатации Дальневосточной системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы. Система обеспечивает дальний параметрический прием излучений и полей, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот сотни – десятки – единицы – доли Герца на акваториях протяженностью десятки – сотни километров. Научно технические разработки прошли многолетние испытания на акваториях Дальневосточных морей, подтвердили свою эффективность.

К настоящему времени исследованы и могут быть использованы следующие закономерности нелинейного преобразования установившегося просветного поля движущимся объектом и сопутствующими его движению полями различной физической природы (акустическими, электромагнитными, гидродинамическими):

- дифракция просветных сигналов на объекте и их интерференционная структура;
- рассеяние просветных сигналов гидродинамическим кильватерным следом, а также их амплитудная и фазовая модуляция характерными составляющими шумового излучения объекта;
- модуляция низкочастотных сигналов подсветки среды СНЧ колебаниями корпуса движущегося объекта (как целого), а также регулярными гидродинамическими колебаниями водных масс, вовлеченных в движение;
- модуляция и параметрическое преобразование просветных сигналов излучаемым объектом электромагнитным полем;
- пространственно-временная амплитудно-фазовая модуляция установившегося просветного акустического поля, измеряемыми информационными полями среды различной физической природы.

Обнаружение полей объектов и среды методом просветной гидроакустики может быть проведено по всем перечисленным закономерностям. Но наиболее эффективно выделение классификационных признаков полей объектов и среды реализуется по закономерностям нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования просветных и измеряемых информационных волн различной физической природы. На рис. 11.10 приведена структурная схема тракта анализа просветных сигналов, обеспечивающего выделение классификационных признаков объектов и среды, технологиями классической (активной, пассивной, параметрической) и просветной гидроакустики в информационно-аналитическом центре радиогидроакустической системы освещения и мониторинга полей различной физической природы морских акваторий. Представленная схема наглядно представляет многофункциональность измерительных технологий просветной гидроакустики.

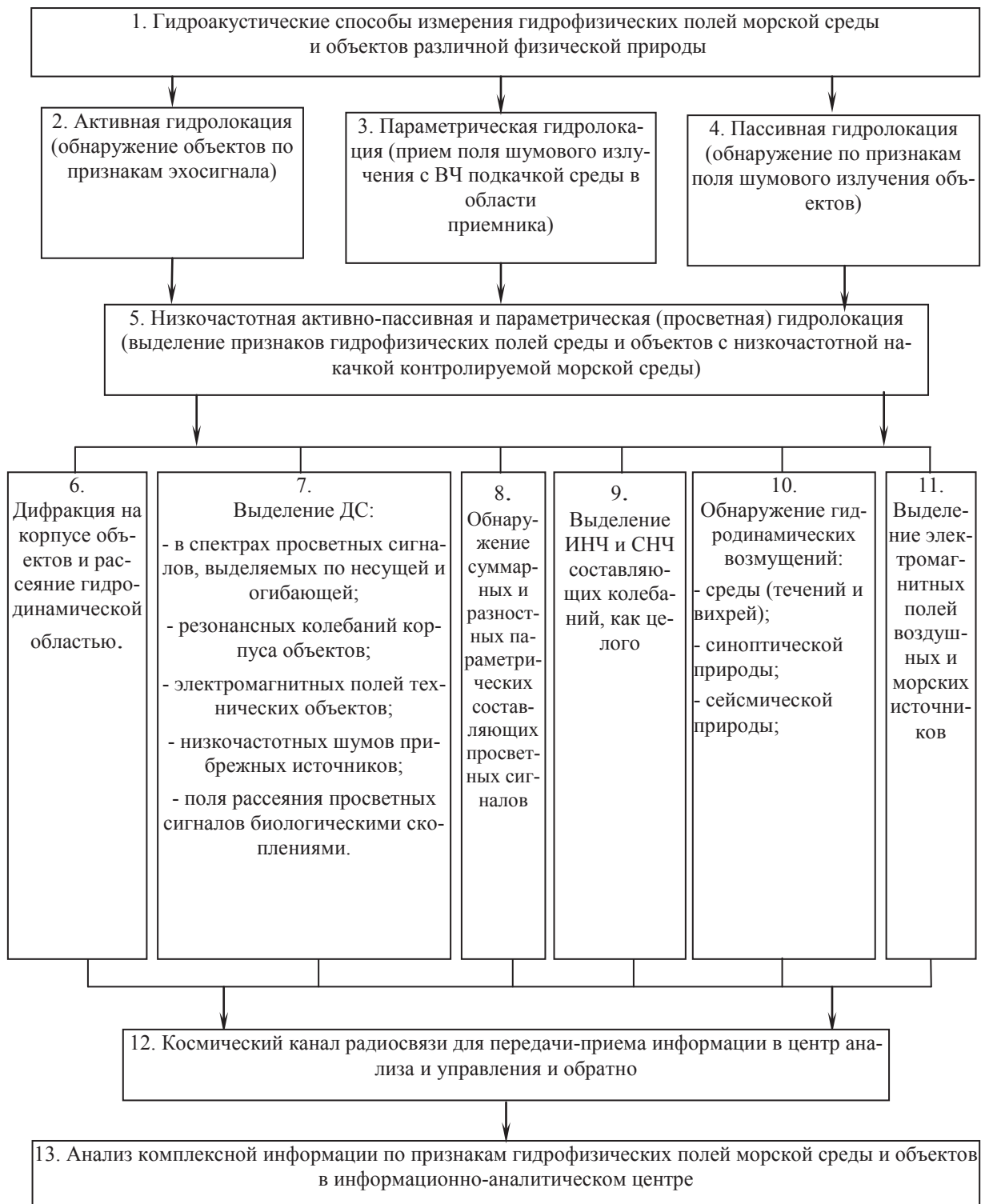


Рис. 11.10. Идентификационные признаки полей объектов и среды, измеряемые технологиями просветной гидроакустики

Измерительные технологии нелинейной просветной гидроакустики включают выполнение следующей последовательности операций [5-8]. Излучатель и приемные блоки гидроакустической системы размещают на противоположных границах акватории, облучают ее низкочастотными акустическими сигналами. Формируют в среде рабочую зону нелинейного взаимодействия просветных и измеряемых волн, как многолучевую параметрическую антенну. Далее преобразованные просветные сигналы принимают и



усиливают в полосе параметрического преобразования, переносят их частотно - временной масштаб в высокочастотную область. Проводят узкополосный спектральный анализ и выделяют верхнюю и (или) нижнюю боковую полосу преобразованных просветных сигналов, по которым с учетом параметрического и частотно-временного преобразования определяют характеристики принимаемых информационных полей объектов и среды [6-8].

### **11.5 . Нелинейная просветная гидроакустика в создании радиогидроакустических систем контроля сейсмической и синоптической обстановки на протяженных морских акваториях**

Практические пути реализации закономерностей и измерительных технологий нелинейной просветной гидроакустики на протяженных акваториях необходимо рассматривать на основе закономерностей многолучевого распространения акустических волн в гидроакустическом канале распространения с переменными характеристиками среды и границ. В этой связи, в измерительной системе необходимо осуществлять пространственно-угловое (по отдельным лучам) или временное (при использовании импульсного излучения) разделение многолучевого сигнала и регистрацию его наиболее энергонесящих приходов. В таком случае, в точке приёма следует выделять только те сигналы, которые взаимодействовали с измеряемыми информационными, сформированными искусственными или естественными источниками сейсмическими или синоптическими процессами морской среды. Снижение демаскирующих факторов и увеличение помехозащищенности просветных систем можно осуществить, используя лучи просветного поля, как пространственно развитые параметрические антенны бегущей волны [1-3]. Просветная система мониторинга, в этом случае, представляет собой пространственную многолучевую параметрическую антенну, обеспечивающую возможность дальнего приема волн малых амплитуд в диапазоне частот десятки – единицы – доли Герца. Такие преимущества просветной антенны необходимы в решении задач надежного приема волн, формируемых сейсмическими и синоптическими процессами и явлениями. Кроме того, такие антенны обеспечивают возможность проведения количественных измерений информационных волн рассматриваемого диапазона частот [7].

Исходя из этого, проведем обоснование требований к направленным свойствам формируемых параметрических антенн. Теоретические оценки возможности разделения многолучевых сигналов показывают, что, если их прием ведется на вертикально или горизонтально развитые антенные системы, размещенные на больших глубинах в стабильных условиях, то лучи, как кластеры, удастся разделить на дистанциях до 500 километров [2,3,7].

Принципы создания параметрической антенны бегущей волны, как бестелесной, основанной на закономерностях нелинейного взаимодействия в морской среде высокочастотных упругих волн накачки с информационными, были разработаны и опубликованы сотрудниками ИПФ РАН в 90-х годах прошлого столетия. Позднее эта идея была реализована отечественными и зарубежными акустиками в создании гидролокаторов принципиально отличающихся по своим измерительным характеристикам относительно классических [8,21,97]. Далее эта идея была существенно доработана Дальневосточными гидроакустиками применительно к ее реализации в низкочастотной просветной гидроакустике, что по настоящее время успешно реализуются в просветных системах

мониторинга геофизических и гидрофизических полей источников и среды различной физической природы в звуковом, инфразвуковом и дробном диапазонах частот. [1-7]. Рассмотрим развитие и реализацию этой идеи в низкочастотном просветном методе гидролокации, объединяющем закономерности преобразования просветного поля излучениями и полями объектов различной физической природы (акустическими, электромагнитными, гидродинамическими), а также пространственными неоднородностями морской среды.

Порядок практической реализации параметрической антенны в условиях многолучевого распространения просветных сигналов на протяженных трассах не требует строго обоснования. В этом случае каждый отдельный акустический луч, вышедший из точки излучения и принятый в точке приема, представляет собой параметрическую антенну бегущей волны. Проведем обоснование возможности использования этих закономерностей в просветных системах гидролокации. Считаем, что сигнал на антенне в вертикальной плоскости формируется двумя кластерами, которые приходят в точку приема сверху, снизу и имеют вид [1,2,7]

$$P \exp(j\omega_0 t) = S(t). \quad (11.1)$$

В соответствии с принципом суперпозиции на антенне формируется сигнал

$$U(t) = S_1(t) + S_2(t), \quad (11.2)$$

где  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  – сигналы первого и второго кластеров, соответственно.

Примем, что  $S_1(t)$ , как опорный сигнал, имеющий наименьшее время распространения. Представители кластеров  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  отличаются углами падения на антенну и, кроме того, относительным временем прихода к антенне. С учетом этого выражение (11.2) представим в виде

$$\begin{aligned} U(t, z) &= a_1 P \exp[j\omega_0 (t - \frac{z}{c} \sin \theta_1)] + a_2 P \exp[j\omega_0 (t - \frac{z}{c} \sin \theta_2 - \tau)] = \\ &= P_1 \exp[j\omega_0 (t - \frac{z}{c} \sin \theta_1)] + P_2 \exp[j\omega_0 (t - \frac{z}{c} \sin \theta_2 - \tau)], \end{aligned} \quad (11.3)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты затухания кластеров;  $\theta_1, \theta_2$  - углы прихода кластеров на антенну;  $\tau$  - относительная временная задержка второго кластера относительно первого;  $z$  - пространственная вертикальная составляющая акустического поля.

Возьмем преобразование Фурье по  $t$  от выражения (11.3)

$$\begin{aligned} V(\omega, z) &= P \frac{\sin[(\omega - \omega_0)0,5T]}{[0,5T(\omega - \omega_0)]} \cdot \\ &\left\{ a_1 \exp(-j\omega_0 \frac{z}{c} \sin \theta_1) + a_2 \exp[-j\omega_0 (\frac{z}{c} \sin \theta_2 + \tau)] \right\}, \end{aligned} \quad (11.4)$$

где выражение (4) можно представить в виде

$$V(\omega, z) = S(\omega) \cdot H(\omega, z), \quad (11.5)$$

где  $S(\omega) = F\{P \exp(j\omega_0 t)\}$  – преобразование Фурье от  $S(t)$ .

$$S(\omega) = P \cdot \frac{\sin[0,5T(\omega - \omega_0)]}{0,5T(\omega - \omega_0)}, \quad (11.6)$$

$$H(\omega, z) = a_1 \exp(-j\omega_0 \frac{z}{c} \sin \theta_0) + a_2 \exp[-j\omega_0 (\frac{z}{c} \sin \theta_2 + \tau)] \quad (11.7)$$

где  $H(\omega, z)$  – частотно-пространственная характеристика канала распространения. Спектральная плотность мощности  $U(t, z)$  находится из выражения

$$|U(\omega, z)|^2 = |S(\omega)|^2 \cdot |H(\omega, z)|^2. \quad (11.8)$$

Как видно из выражения (4),  $|S(\omega)|^2 = P^2 \cdot \frac{\sin^2[0,5T \cdot (\omega - \omega_0)]}{[0,5T(\omega - \omega_0)]^2}$ . Показано, что

$$|H(\omega, z)|^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \varphi, \text{ где } \varphi = \frac{\omega_0}{c} [z(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) - \tau c]. \quad (11.9)$$

В зависимости от величины  $\varphi$   $|H(\omega, z)|^2$  может принимать различные значения. Если  $\varphi = 0, 2\pi$ , то  $|H(\omega, z)|^2_{\min} = (a_1 - a_2)^2$ . В общем случае значение  $V(\omega, z)$  в выражении (11.5) можно считать случайной величиной, равномерно распределенной в интервале от 0 до  $2\pi$ . Поэтому, усредняя (11.9) по  $\varphi$ , получим выражение

$$\overline{|H(\omega, z)|^2} = a_1^2 + a_2^2.$$

Из проведенных рассуждений видно, что спектральная плотность мощности на выходе антенной системы имеет нестабильный характер, зависящий от  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\sin \theta_1$ ,  $\sin \theta_2$  и  $\tau$ , мощность выходного сигнала также будет флюктуировать исходя из того, что

$$P_{\text{вых}} = \int_{-\infty}^{\infty} |V(\omega, z)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 \cdot |H(\omega, z)|^2 d\omega \quad (11.10)$$

Получим спектральную плотность от функции  $V(\omega, z)$  по переменной  $z$ , т.е. частотно-волновой спектр сигнала  $U(t, z)$ . В результате имеем

$$V(\omega, z) = S(\omega) \left\{ a_1 \frac{\sin[0,5L(K_0 \sin \theta_1 - \vartheta)]}{0,5L(K_0 \sin \theta_1 - \vartheta)} + \right. \\ \left. + a_2 \frac{\sin[0,5L(K_0 \sin \theta_2 - \vartheta)]}{0,5L(K_0 \sin \theta_2 - \vartheta)} \exp(-j\omega_0 \tau) \right\} = S(\omega) \cdot H(\omega, \vartheta), \quad (11.11)$$

где  $\vartheta$  – частота;  $L$  – размеры антенной решетки в вертикальной плоскости.

Из выражения (11.11) видно, что на плоскости  $(\omega, z)$ , пространственные и временные значения частоты связаны линейной зависимостью с углами наклона луча к плоскости антенны, определяемыми выражениями  $(K_0 \sin \theta_1)$  и  $(K_0 \sin \theta_2)$ .

Спектр сигнала на выходе антенны будет представлять собой сумму его составляющих, как сигналов кластеров с одинаковой по времени частотой  $\omega_0$  и разными фазовыми членами  $\vartheta_1 = (\beta\omega_0 / c) \sin \theta_1$  и  $\vartheta_2 = (\omega_0 / c) \sin \theta_2$ . Вследствие этого, можно оценить  $\sin \theta_1$  и  $\sin \theta_2$ . Поэтому, рассчитывая  $\tau$  по известной методике, можно оценить  $\tilde{H}(\omega, z)$  и затем найти  $|\tilde{H}(\omega, z)|^2$ . Разделив выражение (6) на выражение  $|\tilde{H}(\omega, z)|^2$ , находим

$$\frac{|V(\omega, z)|^2}{|\tilde{H}(\omega, z)|^2} = |S(\omega)|^2 \cdot \frac{|H(\omega, z)|^2}{|\tilde{H}(\omega, z)|^2} \quad (11.12)$$

Подставляя (12) в (10) получим, что мощность сигнала на выходе антенны определяется интегральным значением спектральной плотности принимаемых сигналов и пространственными параметрами волновода, как канала распространения [1,2,20].

$$P_{\text{вых}} = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 \cdot \frac{|H(\omega, z)|^2}{|\tilde{H}(\omega, z)|^2} d\omega. \quad (11.13)$$

В полученном выражении прямая зависимость характеристик сигналов от параметров среды практически отсутствует. Она учтена в его модуляционных пространственно-частотных характеристиках, отражающих пространственно-волновые параметры канала распространения акустических волн.

Рассмотрим результаты морских испытаний низкочастотной просветной системы, как параметрической антенны бегущей волны. Параметрический прием акустических сигналов «малых амплитуд» в этих системах основан на нелинейном взаимодействии принимаемой низкочастотной волны с интенсивной низкочастотной волной подсветки среды на пути их совместного распространения. Физическая сущность нелинейного взаимодействия просветных волн и формирования параметрических составляющих комбинационных волн суммарной и разностной частоты при их совместном распространении в нелинейной среде заключается во взаимной модуляции фронта одной волны другой, в результате чего, фазовая скорость их распространения взаимно преобразуется. Это приводит к амплитудно-фазовой модуляции, просветной волны, которая может быть выражена через амплитуду или индекс фазовой модуляции. Комплексные амплитуды  $P_{\pm}$  сформированных комбинационных волн суммарной и разностной частот и индекса фазовой модуляции  $\Delta\phi$ , которые для просветных параметрических систем выражаются аналитическими зависимостями [1,2].

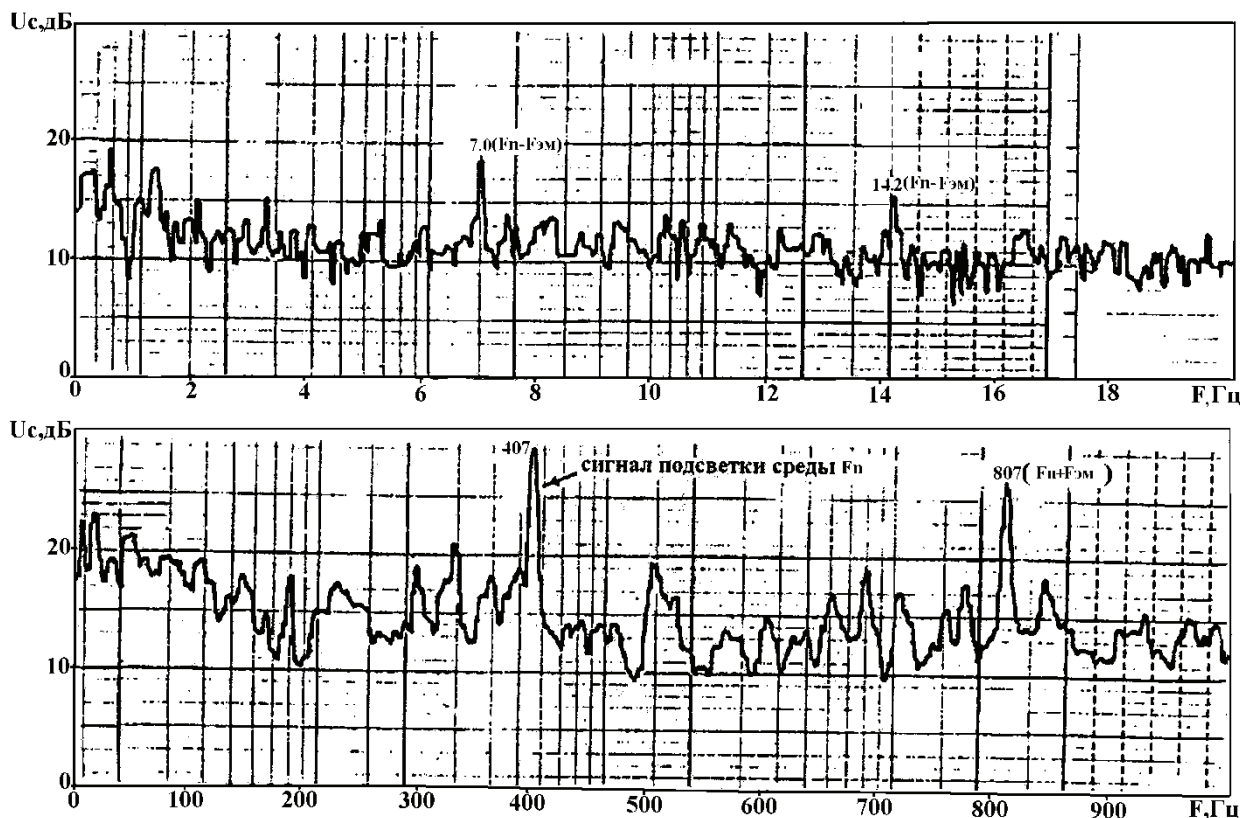


Рис. 11.11. Спектр излучений морского судна.  
 Параметрический прием электромагнитного поля судна  
 на трассе о. Сахалин – о. Итуруп, 345 км

Экспериментальные исследования по реализации просветной параметрической системы, как параметрической, были проведены в Японском, Охотском и Беринговом морях. В эксперименте использовались радиогидроакустические буи (РГБ), связанные по радиоканалу с судном. При анализе принимаемых нелинейно преобразованных просветных сигналов применялась фазовая обработка с использованием их частотно-временного преобразования в высокочастотную область [285, 286]. Пример измерения электромагнитных излучений морского судна на трассе протяженностью 345 км в переходной зоне Охотского и Японского морей приведен на рис. 11.11.

**Регистрация «волн-убийц» в южной части Охотского моря.** В ходе экспедиционных работ в 2010 году СКБ САМИ были проведены исследования по регистрации процессов зарождения и прохождения опасного волнения моря в заливе Анива о. Сахалин. Принято считать, что аномально высокая волна называется «волной убийцей», если ее высота более чем в 2 раза превышает среднюю высоту остальных волн, как показано на рис. 11.12. Изучение длительных записей гидродинамических волн, полученных за весь 2009 год показало, что имеется не менее 100-а выбросов, удовлетворяющих критерию формирования «волн-убийц».

Создаваемая система контроля и мониторинга полей объектов и явлений формируется как радиогидроакустическая и в этой связи в ней используются, как необходимые элементы, радиогидроакустические измерительные комплексы, разрабатываемые и серийно создаваемые в Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН. Экспериментальные образцы макетов систем мониторинга, сформированные на основе радиогидроакустических средств морского приборостроения, прошли испытания в различных районах Дальневосточных морей и подтвер-

дили свою высокую эксплуатационную эффективность и надежность. Особым преимуществом использования радиогидроакустических систем морского приборостроения является возможность их вхождения по каналам радиосвязи, включая космические, в Региональный информационно-аналитический Центр. Это преимущество обеспечивает также практическую возможность формирования системы контроля и мониторинга как масштабируемой из пространственно разнесенных подсистем, размещенных в районах Морской экономической зоны Дальневосточного региона.

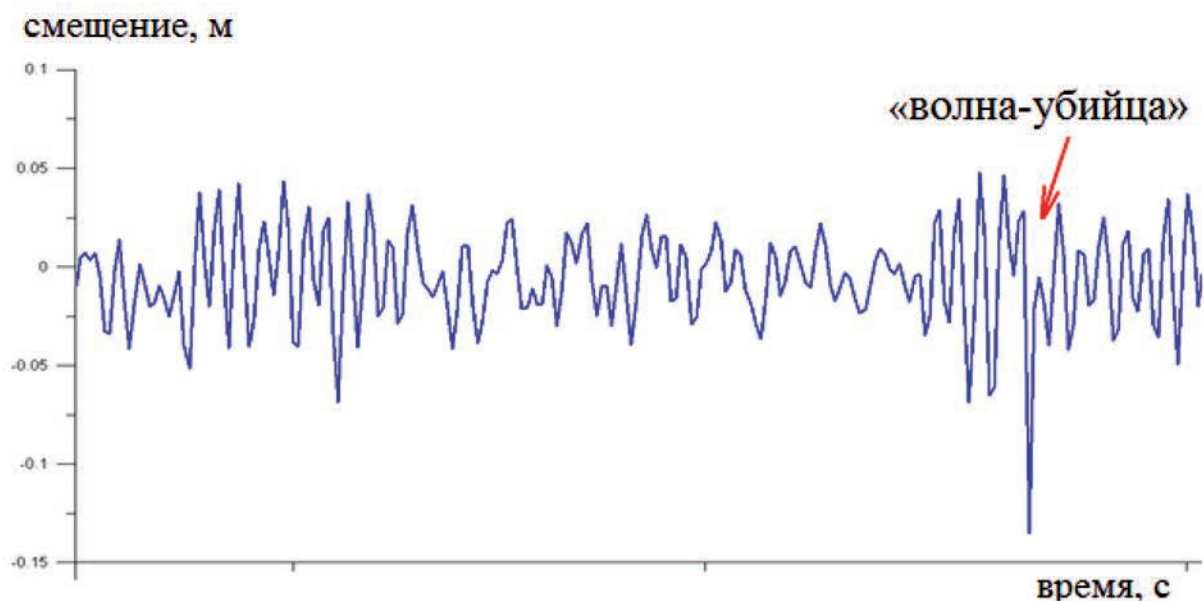


Рис. 11.12. Запись «волны-убийцы» в районе мыса Анива о. Сахалин

Морские эксперименты подтвердили эффективную работу просветной системы, как многолучевой параметрической антенны, соизмеримой с протяженностью контролируемой трассы. Подтверждены высокие измерительные возможности просветной системы на линиях, протяженностью десятки – сотни километров. Просветные параметрические системы обеспечивают дальний прием информационных волн различной физической природы технических и естественных источников процессов и опасных явлений среды в диапазоне частот, охватывающем сотни – десятки - единицы - доли Герца.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями, а также испытаниями научно-технических разработок просветной гидроакустики в морских условиях, обосновано и подтверждено, что она эффективно реализуется на основе закономерностей нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования низкочастотных просветных акустических волн с измеряемыми информационными волнами различной физической природы в морской среде. При этом, пространственно-временная амплитудно-фазовая структура просветного акустического поля модулируется информационными излучениями морских объектов и возбуждаемых неоднородностей морской среды. Научно-технические разработки классической нелинейной акустики и их реализация в гидроакустических системах мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий обусловили необходимость применения нового, уточняющего названия. В этом случае ее целесообразно называть нелинейной просветной гидроакустикой (НЛПГА), в которой используется низкочастотная, (десятки - сотни Герц) подсветка (накачка) контролируемой среды, обеспечивающая дальний параметрический прием

волн различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками морской среды в диапазоне частот сотни – десятки – единицы - доли Герц [20,92,99,113].

Измерительные технологии нелинейной просветной гидроакустики включают выполнение следующей последовательности операций [1,2,20]. Излучатель и приемные блоки гидроакустической системы размещают на противоположных границах акватории, облучают ее низкочастотными акустическими сигналами. Формируют в среде рабочую зону нелинейного взаимодействия просветных и измеряемых волн, как многолучевую параметрическую антенну. Далее преобразованные просветные сигналы принимают и усиливают в полосе параметрического преобразования, переносят их частотно - временной масштаб в высокочастотную область. Проводят узкополосный спектральный анализ и выделяют верхнюю и (или) нижнюю боковую полосу преобразованных просветных сигналов, по которым с учетом параметрического и частотно-временного преобразования определяют характеристики принимаемых информационных полей объектов и среды [7].

Использование операции активной низкочастотной подсветки контролируемой среды (на частотах десятки Герц – сотни Герц) обеспечивает возможность дальнего обнаружения акустически слабозаметных объектов и неоднородностей среды по признакам их полей. При этом низкочастотные просветные сигналы делают метод практически нечувствительным к мелкомасштабным изменениям гидрологических характеристик морской среды. Характеристики полей шумового излучения, а также электромагнитные и гидродинамические поля, в этом случае, измеряются (выделяются) путем спектрального или корреляционного анализа принимаемых нелинейно преобразованных просветных сигналов.

Реализация в просветной гидроакустике закономерностей параметрического приема волн различной физической природы обеспечивает возможность измерения характеристик полей объектов и среды низкочастотного и инфра низкочастотного диапазонов частот антеннами малых волновых размеров. При этом эффективно реализуется возможность дальнего параметрического приема волн «малых амплитуд», что является практически не разрешаемой задачей для классических станций обнаружения объектов по признакам их полей различной физической природы.

Метод низкочастотной просветной гидроакустики практически не зависит от отражающих характеристик объектов и в меньшей степени зависит от уровня сигналов излучаемых ими полей. Он реализуется на низких просветных акустических сигналах, но не требует обязательного применения крупногабаритных направленных приемных антенн, а также сложных трактов формирования, приема и обработки сигналов. Реализующие метод гидроакустические системы могут быть сформированы из существующих штатных гидроакустических изделий и радиотехнических приборов. Рассматриваемые просветные системы мониторинга могут быть созданы на основе средств морского приборостроения, преимущественно, автономных радиогидроакустических комплексов, а также цилиндрических звукопрозрачных антенн, создаваемых в ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН [2,7]. Образцы таких систем, как мобильных и быстро разворачиваемых, прошли испытания и подтвердили высокую эффективность. Экспериментальными исследованиями показано, что просветная параметрическая система мониторинга, сформированная в быстро разворачиваемом (преимущественно корабельном или авиационно-поисковом) вариантах, позволяет решать совокупность задач мониторинга полей различной физической природы атмосферы, океана и земной коры. В совокупности

с авиационными и спутниковыми радиотехническими средствами связи, сбора и обработки информации такая система может быть использована также в интересах прогнозирования землетрясений, обнаружения волн цунами и других опасных явлений [13-18,250 - 278].

В отличие от классических параметрических устройств, просветная система контроля морских акваторий, основанная на реализации закономерностей нелинейной гидроакустики, может быть сформирована как многоканальная широкомасштабная параметрическая с низкочастотной подсветкой (накачкой) контролируемой среды. Параметрическое взаимодействие просветных сигналов, а также преобразование их полями объектов, а также сейсмических и синоптических явлений, происходит на всем пути их совместного распространения в морской среде. В этой связи, давление сформированных комбинационных волн и индекс фазовой модуляции аналогичны классическим, но в этом случае возрастет полезная фазовая модуляция, взаимодействующих волн, что обусловлено усилением взаимодействия волн в протяженном объеме среды с повышенной нелинейностью, как пространственно развитой многолучевой параметрической антенны бегущей волны. Характеристика направленности просветной параметрической антенны для каждого луча определяется длиной просветной волны и протяженностью контролируемой трассы [1,2]. Обоснование закономерностей нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования упругих просветных волн принимаемыми информационными волнами различной физической природы в морской среде проведено на основе уравнений гидродинамики для вязкой теплопроводной среды применительно к их реализации в просветных системах мониторинга полей различной физической природы морских источников [1-7]. Испытания макетов просветных параметрических систем, в решении дальнего параметрического приема акустических и электромагнитных волн морских объектов, а также сейсмических и синоптических явлений проводились на протяженных трассах Японского и Охотского морей. Испытания подтвердили эффективность измерительных технологий нелинейной просветной гидроакустики, а также практические пути их реализации средствами морского приборостроения, разрабатываемыми и создаваемыми в Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН [1,2,7].

В заключение отметим следующее. Низкочастотная просветная гидроакустическая система контроля морской обстановки и мониторинга полей контролируемых акваторий эффективно реализуется как пространственно развитая многолучевая параметрическая антенна, соизмеримая с протяженностью контролируемой среды. Просветная система обеспечивает дальний и сверхдальний параметрический прием гидрофизических волн морских объектов, а также волн сейсмических и синоптических явлений на дистанциях десятки - сотни километров в диапазоне частот, составляющим сотни – десятки – единицы – доли Герца.

Научно-технические разработки нелинейной просветной гидроакустики и их реализация средствами морского приборостроения обеспечивают возможность построения широкомасштабных систем контроля морской обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками процессами и явлениями протяженных морских акваторий.

Макеты экспериментальных радиогидроакустических систем мониторинга полей, излучаемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры, сформированные на основе средств морского приборостроения, были разработаны и испытаны в различных районах Дальневосточного ре-



гиона. Испытания показали эффективность и перспективность дальнейших исследований и разработок нелинейной просветной гидроакустики, как нового научно технического направления, объединяющего гидрофизику, геофизику и радиофизику.

**Заключение по разделу.** Проведен анализ закономерности и измерительные технологии низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, а также научно-технических разработок средств морского приборостроения. Обоснованы практические пути их реализации в создании широкомасштабных радиогидроакустических систем контроля сейсмической и синоптической обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы (акустических, электромагнитных, гидродинамических) на протяженных акваториях. Проведен анализ результатов морских испытаний экспериментальных просветных систем мониторинга, обеспечивших дальний и сверхдальний параметрический прием волн искусственных и естественных источников, сейсмических и синоптических явлений на линиях протяженностью десятки – сотни километров.

Измерительные технологии нелинейной просветной гидроакустики включают выполнение следующей последовательности операций [5-8]. Излучатель и приемные блоки гидроакустической системы размещают на противоположных границах акватории, облучают ее низкочастотными акустическими сигналами. Формируют в среде рабочую зону нелинейного взаимодействия просветных и измеряемых волн, как многолучевую параметрическую антенну. Далее преобразованные просветные сигналы принимают и усиливают в полосе параметрического преобразования, переносят их частотно - временной масштаб в высокочастотную область. Проводят узкополосный спектральный анализ и выделяют верхнюю и (или) нижнюю боковую полосу преобразованных просветных сигналов, по которым с учетом параметрического и частотно-временного преобразования определяют характеристики принимаемых информационных полей объектов и среды [6-8].

## 12. РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН, ОБОРУДОВАННЫЙ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ ОХОТСКОГО И ЯПОНСКОГО МОРЕЙ

### 12.1. Создание и эксплуатации полигона для исследования гидрофизических и геофизических полей морской среды и объектов

Гидроакустический полигон после его восстановления и дооборудования на современном научно-техническом уровне должен стать основным блоком создаваемой Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения и мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры. С созданием полигона связана основная часть экспериментальных исследований и научно-технических разработок в области фундаментальной и прикладной гидрофизики и гидроакустики Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН на базе средств морского приборостроения, разработанных и изготовленных собственными силами. Следует отметить, что практически во всех рассматриваемых далее исследованиях и испытаниях авторы монографии принимали непосредственное участие в разработках методик, подготовке и проведении планируемых работ [1, 2].

**Историческая справка создания гидроакустического полигона** и его основные характеристики. На первом этапе исследований летом 1975 года была введена в эксплуатацию наземная часть гидрофизического стационара на юго-восточном побережье Охотского моря в районе мыса Левенорна. Береговой комплекс оборудовали приемно-излучающей аппаратурой. Для этого были проложены стационарные кабельные трассы приема и излучения акустических сигналов для приема сигналов, распространяющихся в морской среде на коротких дистанциях, составляющих 5-12 километров. На этом этапе исследований разрабатывались теоретические модели распространения акустического сигнала, количественные характеристики его взаимодействия с неоднородностями среды и ее границами в зависимости от сезонных и синоптических условий, т.е. совершенствовались методы акустической томографии океана. Были получены экспериментальные результаты пространственно-временной структуры акустического поля в районах размещения стационарной трассы. Исследования позволили получить основные характеристики среды в интересах обоснования принципов построения и эксплуатации стационарной измерительной трассы в переходной зоне Охотского и Японского морей, протяженностью около 350 километров (рис. 12.1).

**Изменчивость изотерм.** В экспериментах, поставленных в районе гидроакустического стационара (о. Сахалин), вертикальные профили температуры и скорости звука были получены при помощи зонда (ИСЗД). Характер изменчивости изотерм во времени показал, что на выбранном отрезке измерений отсутствует сильное перемешивание изучаемого слоя и сохраняется гидростатическая устойчивость. Крупномасштабные колебания изотерм имеют период, равный действующему в данном районе неправильному суточному приливу.

При анализе данных зондирования удалось добиться разрешения по глубине не меньше 0,3 м. Наиболее вероятными на температурных профилях были ступеньки 2-4 м. С помощью корреляционного анализа оценивалось среднее время жизни  $\tau$  отдельной ступеньки профиля. Предел изменения  $\tau$  составляет 10-50 минут, что соответствует пространственной протяженности слоев 160-900 м.

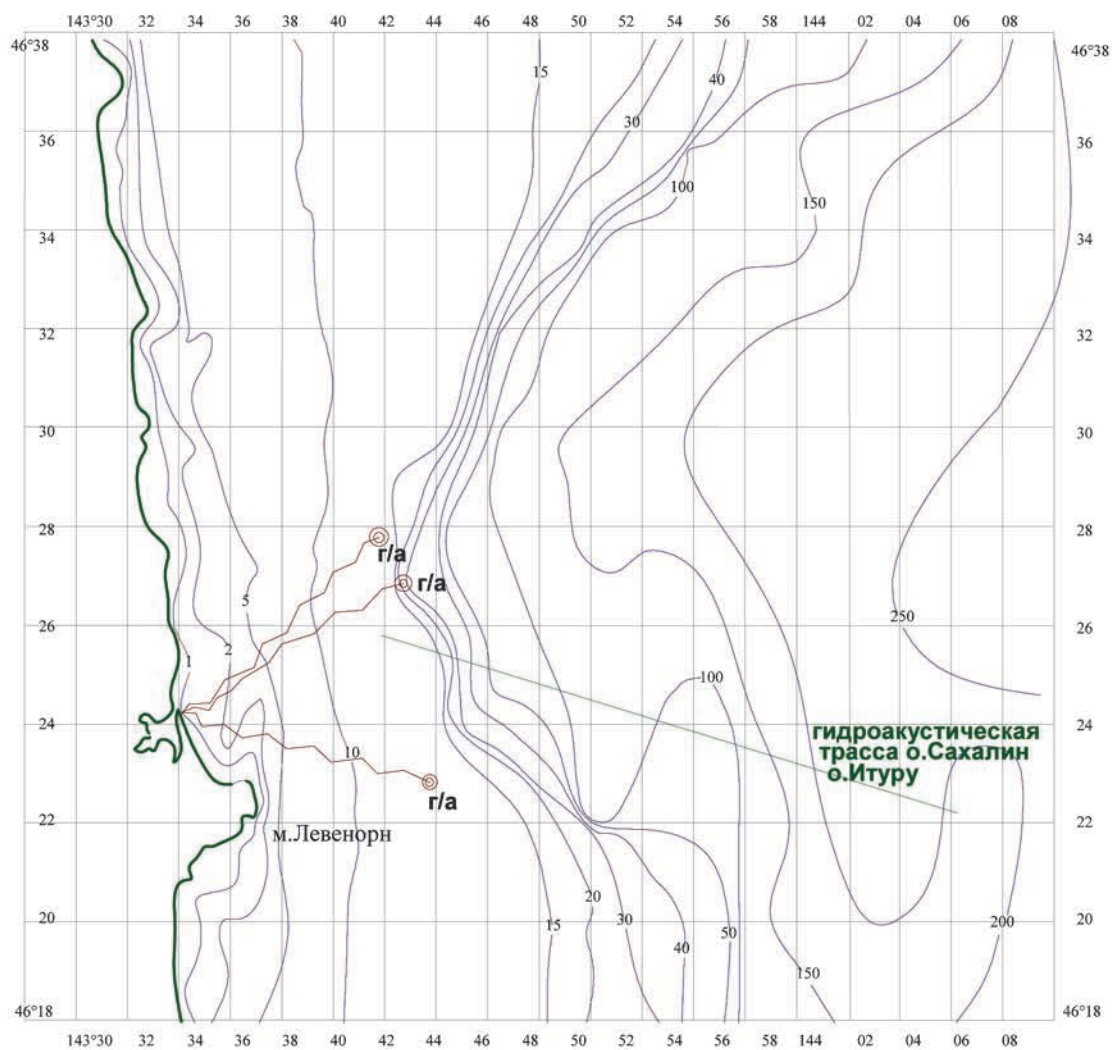


Рис. 12.1. Район оборудования стационарной просветной радиогидроакустической системы мониторинга и контроля морской среды

**Исследование внутренних волн.** Изучение внутренних волн важно как при исследовании динамики вод, так и для практических приложений в акустике океана. Внутренние волны являются одной из причин флюктуации амплитуды и фазы звуковых волн. Наиболее важным, с точки зрения акустики, является исследование короткопериодных внутренних волн с периодами от нескольких минут до нескольких часов, т.к. данные периоды соизмеримы с временем действия гидроакустические приборов. Для получения экспериментальных данных использовались распределенные датчики (РД) температуры на стационарных заякоренных системах. В результате были построены спектры вертикальных смещений термического клина, рассчитаны скорости и направления распространения внутренних волн

Внутренние волны в Охотском море распространяются по направлению к берегу. Наблюдается их дисперсия, когда более длинные волны движутся быстрее коротких. В районе измерений маловероятно ожидать отраженных от берега волн, т.к. условия отражений не выполняются.

Максимум частоты Вайсяля в Охотском море составляет 0,03 рад/с. Длины волн меняются от 138 до 1240 м. Скорости короткопериодных волн с учетом эффекта Доплера составляют 0,2-0,4 м/с, амплитуда внутренних волн с периодом 10 минут – 5 м.

**Исследование по обоснованию дистанционного измерения гидрофизических полей среды и морских объектов.** На втором этапе экспериментальных исследований (1986-2000гг.) был введен в эксплуатацию гидроакустический стационар, оснащенный излучающей аппаратурой, на о. Итуруп. При этом исследования перешли на качественно новую ступень, так как длинная, географически протяженная стационарная трасса (340 км) позволила соотнести закономерности в изменчивости принимаемых акустических сигналов с гидрометеорологической переменчивостью в прилегающих к стационарной трассе районах.

На этом этапе исследований выполнялись эксперименты с привлечением судов обеспечения: гидрологические разрезы вдоль трассы; взрывные трассы, ледовые измерения; прямые измерения спектров волнения, скорости течения и температуры на различных горизонтах.

Экспериментальные исследования второго этапа проводились совместно с американской фирмой SAIC (1994-1995 гг.). По результатам исследований фирме SAIC представлялись научно-технические отчеты. В 1998 году СКБ САМИ ДВО РАН выполнило исследовательскую работу для фирмы SAIC по обработке и интерпретации "исторических" экспериментальных данных, полученных на стационарной гидроакустической трассе, оборудованной в переходной зоне Охотского и Японского морей.

Последующая обработка полученных данных позволила сделать заключение о применимости методов дистанционного акустического зондирования океана для исследования динамических процессов водной толщи и его поверхности.

Получен большой задел в виде необработанных или частично обработанных данных за длительный период экспериментальной деятельности на стационарной трассе, а также данных, относящихся к целевым экспериментам, направленным на получение закономерностей акустической освещенности района исследований от состояния среды распространения и гидрометеорологической обстановки района.

Предлагаемые исследования ставят целью развитие и совершенствование акустических методов дистанционного зондирования юго-восточной зоны Охотского моря для оптимизации системы освещения подводной и надводной обстановки (распознавание типов судов, а также определения их местонахождения) в зоне досягаемости стационарных гидроакустических приемников.

**Исследования по совершенствованию средств морского приборостроения,** разрабатываемых для формирования измерительных трасс и для мониторинга гидрофизических полей среды и объектов. В ходе исследований проработаны вопросы технического обеспечения измерений, выполнены необходимые доработки технических средств измерений и программ их обработки. Внедрена и используется программа теоретического расчета характеристик акустического поля, использующая решения параболических уравнений, что позволило исследовать статистические свойства принимаемых акустических сигналов на стационарной гидроакустической трассе и выполнять анализ этих связей с изменчивостью гидрометеорологической обстановки в районе стационарной гидроакустической трассы.

В рамках фундаментальных исследований океана выполнены основные конструктивные решения построения глубоководной донной автономной станции

(ГДАС) и всплывающего модуля спутниковой системы передачи информации, позволяющие обеспечить автономность работы системы не менее 6...8 месяцев на глубинах до 6 000 м и не менее 40 сеансов спутниковой системы связи с региональным информационным центром. Рассмотрены варианты использования систем спутниковой связи "Гонец" и "Наука-М" для быстрой передачи на региональные информационно аналитические центры. Для решения задачи быстрой передачи информации на региональные информационные центры представляется наиболее целесообразным применение многофункциональной глобальной системы спутниковой связи "Гонец" на базе сети низкоорбитальных космических аппаратов и портативных абонентских терминалов [250,278,280].

Таким образом, сотрудниками СКБ САМИ ДВО РАН, в том числе с участием авторов, выполнен комплекс исследований для дальнейшего проведения опытно-конструкторских работ в области морского научного приборостроения по освоению Мирового океана. Преимущественно для изготовления опытной партии глубоководных гидроакустических станций с автономностью до одного года, а также автономного модуля космической связи (система "Гонец"), работающего по заданной программе. Проведены их лабораторные и натурные испытания. В 2000 году завершена разработка конструкторской документации, изготовлены и сданы опытные образцы автономных глубоководных донных гидроакустических станций, на основе которой могут быть сформированы стационарные мобильные системы мониторинга и контроля морских акваторий.

Перечисленные радиогидроакустические и радиотехнические средства могут быть реализованы при формировании и эксплуатации Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот десятки – единицы килогерц, сотни – десятки – единицы – доли Герца [1-7,13-20,250].

## **12.2. Широкомасштабный акустический эксперимент по измерению гидродинамических возмущений морской среды, сформированных гидрофизическими полями морских судов**

**Условия проведения эксперимента.** При проведении эксперимента непрерывно излучались гармонические сигналы стабильной частоты 400 Гц, которые принимались приемными базами и регистрировались на береговой лабораторной базе СКБ САМИ [1,2,80,121].

Одновременно с наблюдениями гидродинамических возмущений среды были проведены параметрические измерения шумового поля подвижного морского судна, спектрограмма и спектр которого приведены на рисунках 12.2, 12.3.

Результаты экспериментальных исследований наглядно подтверждают возможность применения просветной акустической трассы, как широкомасштабной параметрической системы с низкочастотной подсветкой (накачкой) контролируемой среды [11,2,80].

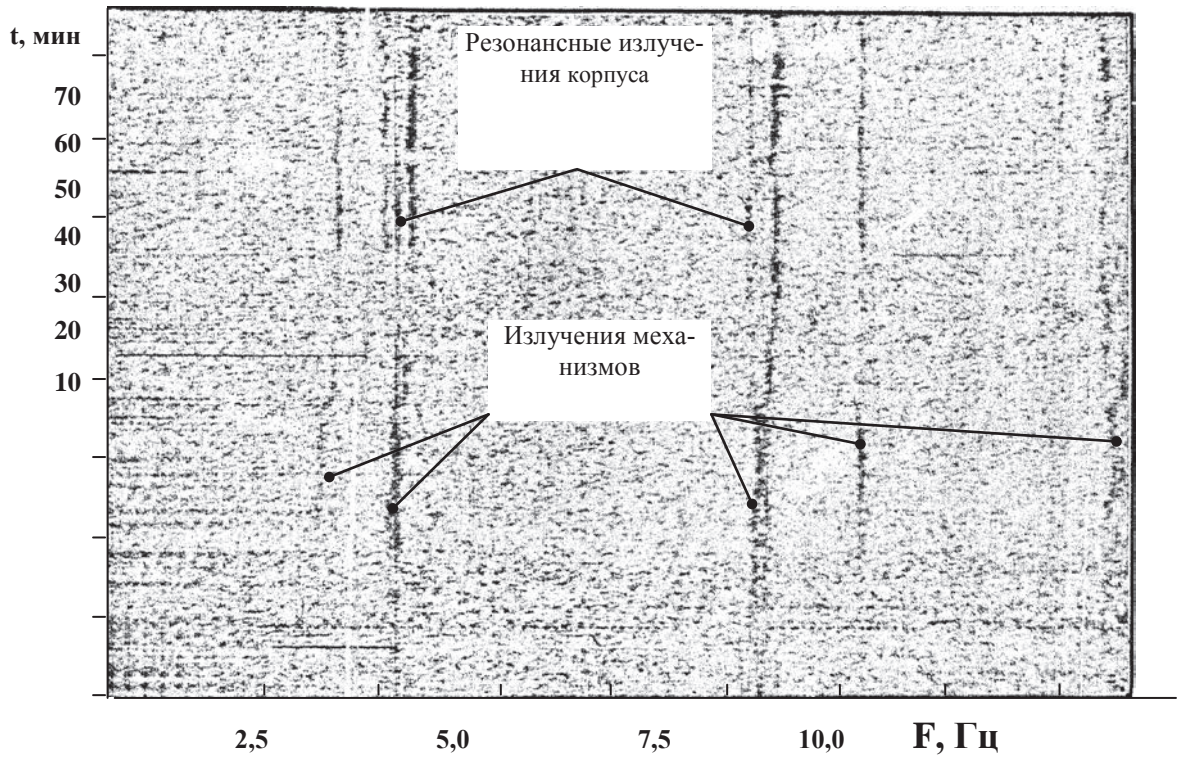


Рис. 12.2. Спектрограмма дискретных составляющих шумового поля морского судна. Измерения методом просветной гидроакустики. Частота – 400 Гц

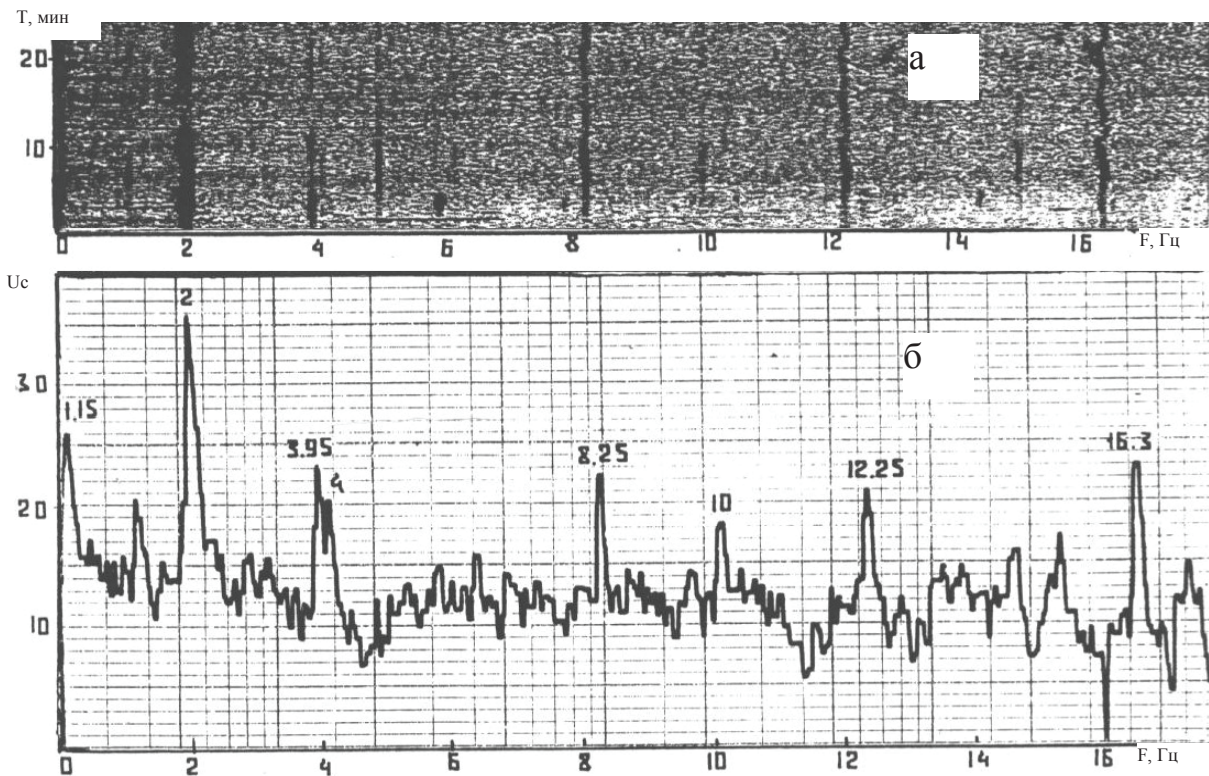


Рис. 12.3. Спектрограмма (а) и спектр (б) «огibaющей» уровня просветного сигнала. Параметрические измерения шумового излучения морского судна

Обработка материалов экспериментальных исследований была проведена исходя из задачи широкомасштабного синоптического наблюдения и на основе измерительных технологий нелинейной просветной гидроакустики. Эксперимент подтвердил возможность дальнего параметрического приема волн различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры [1,7].

### **12.3. Основные тактико-технические требования к просветной системе мониторинга для ее использования как широкомасштабной радиогидроакустической**

Обоснование тактико-технических требований к системе контроля и мониторинга полей различной физической природы, на основе измерительных технологий нелинейной просветной гидроакустики по закономерностям рассеяния и дифракции волн объектами, амплитудной и фазовой модуляции просветных волн информационными, а также нелинейного взаимодействия в морской среде просветных и информационных, рассмотрено в работах [1,2,7]. В эти работы вошли теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в модельных условиях (с использованием экранов и макета объекта), а также в натурных условиях с использованием полей реальных объектов и среды. При обосновании требований, необходимых для создания системы дальнего параметрического приема волн источников и среды применялись существующие (штатные) ГАС, а также специально изготовленные мобильные излучающие и приемные системы. Проведенными исследованиями, было показано, что на данном этапе разработки нелинейной просветной гидроакустики, а также, исходя из технического уровня существующих приемных и излучающих гидроакустических средств, наиболее эффективно может быть реализована стационарная гидроакустическая система, а так же «быстро разворачиваемая» система, сформированная на основе функционально связанных ГДАС [1,2]. Экспериментальными исследованиями и новыми научно-техническими разработками, представленными в работах [1,2,7], требования к стационарной системе контроля полей морских объектов были уточнены и дополнены новыми признаками. Учтены, например, операции по выделению в спектрах огибающей и боковых полосах несущей сигналов подсветки инфра низкочастотных составляющих шумового излучения объектов. Учтена также возможность их регистрации по признакам искажения фронта волны просветных сигналов и появление в искаженной волне дополнительных гармоник. Исходя из перечисленных закономерностей, сопутствующих регистрации объектов методом нелинейной просветной гидроакустики, сформулируем основные тактико-технические требования к системе контроля и мониторинга полей морской среды с учетом их реализации на основе радиогидроакустических средств морского приборостроения, разработанных и изготовленных в СКБ САМИ ДВО РАН.

1. Система освещения обстановки в атмосфере, океане и земной коре, комплексного мониторинга их полей различной физической природы в широком диапазоне частот их формирования и проявления в морской среде, должна быть многофункциональной широкомасштабной и интегрированной и, в этой связи, радиогидроакустической. Система должна обеспечивать совместное решение задач морской науки, оборонного и народнохозяйственного комплексов и, в этой связи, она должна функционировать на основе современных цифровых технологий сбора, анализа многозвенной информации и выработ-

ки управляющий сигналов для автоматизированного управления Региональными подсистемами, включающими стационарные, мобильные гидроакустические и радиотехнические комплексы наблюдения обстановки, и средства радиосвязи. Непосредственным решением этого направления является разработка структуры и принципов действия многофункционального информационно-аналитического центра создаваемой системы.

2. Система контроля среды должна содержать разнесенные на противоположные границы контролируемой среды (акватории) излучающую и приемную базы, формирующие просветные гидроакустические линии (трассы), как просветные параметрические антенны. Излучающая база должна размещаться в центре контролируемой морской акватории и включать: три преобразователя расположенные на оси, ниже и выше оси подводного звукового канала (ПЗК).

3. Приемный и излучающий тракты системы контроля с аппаратурой формирования излучаемых сигналов, а также приема и обработки принимаемых просветных сигналов целесообразно разместить на специально оборудованном береговом (или корабельном) посту или в специально изготовленных изделиях ГДАС, которые размещены по кругу или периметру контролируемой акватории радиально расположены относительно излучающего центра через  $45^{\circ}$ .

4. Излучающий тракт системы контроля должен формировать низкочастотные полигармонические, а также сложные ЛЧМ или ФМ просветные сигналы в диапазоне частот около 0,1-3 кГц и обеспечивать возможность их надежного приема на дистанциях до нескольких сотен километров, что может быть реализовано с использованием излучателей, разработанных СКБ САМИ.

5. Технические параметры излучающей и приемной баз должны обеспечивать возможность длительной постоянной работы их на глубинах не менее 1000 м, соответствующих наиболее вероятным горизонтам движения морских объектов.

6. Приемный тракт системы контроля должен обеспечивать многоканальный прием, усиление и частотную фильтровку принимаемых сигналов с учетом их преобразования полями вероятных объектов и среды.

7. Приемный тракт системы мониторинга должен включать последовательно включенные блоки: полосовых усилителей, измерителей разности фаз, преобразователей частотно-временного масштаба сигналов в высокочастотную область, а так же узкополосных анализаторов спектра и функционально связанных с ними регистраторов спектров.

8. Приемная база стационарной системы контроля должна содержать многоэлементные вертикальную и горизонтальную (придонную) антенны, включающие не менее трех приемников каждая, реализуемые на основе ГДАС и других средств морского приборостроения.

9. Горизонты излучения сигналов подсветки должны выбираться в соответствии с гидролого-акустическими условиями охраняемой акватории, устанавливаться на оси, выше и ниже оси ПЗК и обеспечивать максимальную подсветку всех участков и горизонтов контролируемой акватории.

10. В гидролого-акустических условиях, а также тактических ситуациях, в которых дополнительно к стационарным средствам могут быть использованы ГДАС с многоэлементными антеннами, обеспечивающие возможность применения мобильных корабельных (предпочтительно опускаемых) излучающих и приемных систем, приемное судно должно быть заякорено, излучающее судно может находиться в дрейфе. При наличии специальной многоэлементной приемной системы, ее следует поставить на мел-



ководье (на якорь) и “развязать” от волнения моря и качки корабля. Забортный излучатель или система из трех вертикально разнесенных излучателей в этом случае может буксироваться с глубоководной стороны контролируемой трассы. Излучающая система в зависимости от условий эксперимента находится в дрейфе или буксируется на заданной глубине.

11. Для вхождения радиогидроакустической системы мониторинга и контроля в Единую региональную информационную сеть сбора и анализа информации о морской обстановке, предпочтительно в Региональный информационно аналитический центр (ИАЦ), ее приемная часть включает всплывающий модуль космической связи, работающий по заданной программе и режимам.

Итак, на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также разработок радиогидроакустических средств морского приборостроения СКБ САМИ предложена структура обновленной просветной радиогидроакустической системы для ее установки и постоянной эксплуатации в южной части Охотского моря. Система должна обеспечивать мониторинг полей различной физической природы атмосферы, формируемых естественными и искусственными источниками, процессами и явлениями, атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот десятки – единицы килогерц, сотни – десятки – единицы – доли Герца, включая волны СНЧ колебаний движущихся объектов и неоднородностей среды, как целого.

#### **Выводы по разделу**

Разработаны технологии нелинейной просветной гидроакустики, обеспечивающие дальний и сверхдальний параметрический прием волн различной физической природы, формируемых источниками, и процессами атмосферы и океана. Разработаны экспериментальные просветные системы, с использованием которых измерительные технологии прошли проверку и подтвердили свою эффективность. По результатам теоретических и экспериментальных исследований и расчетов структуры просветного акустического поля проведены разработки технических основ и практических путей создания просветной гидроакустической системы контроля и мониторинга полей атмосферы и океана в переходной зоне Охотского и Японского морей.

На основе научно-технических разработок средств морского приборостроения, преимущественно радиогидроакустических комплексов, а так же систем космической связи, создаваемых ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН, обоснованы принципы построения и эксплуатации системы освещения и мониторинга полей как радиогидроакустической, обеспечивающей ее вхождение в Региональный информационно аналитический центр анализа многофункциональной информации и выработки команд управления.

Разработаны основные технические требования, для создания и постоянной эксплуатации системы мониторинга и контроля в переходной зоне Охотского и Японского морей. Она представляет собой основной блок создаваемой Дальневосточной радиогидроакустической системы комплексного мониторинга полей различной физической природы. Представленные в монографии научно технические разработки нелинейной просветной гидроакустики обобщают результаты многолетних исследований этого направления, выполненных авторами [1,2,5-7], отечественными [8,288,289] и зарубежными гидроакустиками [21,22], а так же конструкторами - разработчиками средств морского приборостроения [1,2,16,90,190,242].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Монография посвящена разработкам научно-технической проблемы – созданию Дальневосточной Радиогидроакустической системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы (акустических, электромагнитных, и гидродинамических), формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и опасными явлениями атмосферы, океана и земной коры. Масштабность и многофункциональность создаваемой системы обеспечивает совокупное решение актуальных задач морской науки, народно-хозяйственного и оборонного комплексов Государства.

Создаваемая система освещения и мониторинга разрабатывается как пространственно развитая радиогидроакустическая и, в этой связи, она формируется на основе закономерностей и измерительных технологий низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, а также научно-технических разработок средств морского приборостроения. В создаваемой радиогидроакустической системе освещения и мониторинга полей используются быстро разворачиваемые радиогидроакустические комплексы, а так же радиотехнических модули космической системы связи (РТМ КСС). Такие средства разрабатываются в Федеральном Государственном бюджетном учреждении науки (ФГБУН) Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН.

Научно-техническая новизна и практическая значимость создаваемой радиогидроакустической системы освещения обстановки и мониторинга полей различной физической природы заключается в том, что она обеспечивает комплексное решение функционально связанных задач. К таким задачам относятся исследования пространственно-временных характеристик полей, формируемых техническими и естественными источниками, процессами и явлениями, атмосферы, океана и земной коры. К решаемым задачам относятся также разработки методов и средств исследования и освоения морских ресурсов, технологий их поиска и контроля в рамках охраны акваторий МЭЗ ДВР. Перечисленные задачи составляют предмет исследований и научно технических разработок, решаемых в рамках настоящей монографии. В этой связи, в монографии проведен анализ известных по зарубежной и отечественной печати научно технических разработок создания и применения системы освещения и мониторинга морских акваторий, на основе которых предложена идея реализации рассматриваемой проблемы на основе закономерностей и измерительных технологий нелинейной просветной гидроакустики и средств морского приборостроения.

Исходя из этого, в монографии проведены научные исследования и технические разработки: закономерностей и технических решений высокочастотной и низкочастотной просветной нелинейной гидроакустики; радиогидроакустических и радиотехнических средств морского приборостроения и сформированных на их основе радиогидроакустических комплексов, а так же быстро разворачиваемых функционально связанных станций и радиотехнических модулей космической системы связи. Монография включает также комплекс технических разработок по исследованию процессов зарождения и прохождения сейсмических процессов и опасных явлений на акваториях Дальневосточных морей (преимущественно в Охотском регионе), обоснованию предложений по разработке методов прогнозирования процессов зарождения и прохождения сильных землетрясений, оповещении населения и береговых инженерных служб об их вступлении.

В монографии проанализированы известные в настоящее время гидроакустические методы и средства измерения характеристики, гидрофизических полей среды, искусственных и естественных источников, процессов и явлений атмосферы, океана и земной коры.

На основе анализа научно-технических разработок выполнено и получено следующие обобщающие результаты:

– обоснованы научно-технические и практические пути применения просветного метода гидролокации по закономерностям: дифракции и интерференции просветных волн, рассеянных объектами, а также их амплитудно-фазовой модуляции и параметрического взаимодействия с измеряемыми волнами в морской среде;

– обоснована и подтверждена морскими испытаниями эффективность просветного метода гидролокации в решении задач дальнего наблюдения пространственно-временных характеристик гидрофизических полей среды и объектов различной физической природы.

– получены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность использования выявленных закономерностей в просветных гидроакустических системах дальнего помехоустойчивого приема информационных волн, измерения характеристик полей объектов и среды различной физической природы (акустических, электромагнитных и гидродинамических), преимущественно с использованием фазового приема и обработки принимаемых просветных сигналов.

При изложении материалов монографии разработано и представлено в главах 1 - 12 следующее.

**1.** Проведано обоснование метода и средств эффективного обнаружения полей акустически слабозаметных объектов и среды, для чего:

– проанализированы преимущества и принципы работы гидроакустической системы мониторинга, сформированной на основе закономерностей нелинейной просветной гидроакустики, как параметрической с низкочастотной подсветкой (накачкой) пространства контролируемой среды;

– рассмотрены общие и отличительные характеристики низкочастотных методов просветной и бистатической гидролокации, показана возможность их совместного применения в пространственно развитых просветных системах контроля морских акваторий;

– обосновано и подтверждено морскими испытаниями, что нелинейная низкочастотная гидроакустика, совместно с высокочастотной (реверберационной) гидроакустикой могут найти широкое применение в геологических исследованиях структуры морского дна, проведении морских спасательных работ, обследовании глубоководных гидротехнических сооружений, а также проведении океанологических работ [1-7].

Результаты многолетних морских испытаний нелинейной просветной гидроакустики по решению задач дальнего параметрического приема полей объектов и среды различной физической природы подтвердили эффективность и опубликованы в работах различного уровня, монографиях, подтверждены патентами на изобретение, что изложено в следующих пунктах.

**2.** Проведен анализ просветной гидроакустики по закономерностям дифракции и интерференции просветных волн, рассеянных объектами, а также их амплитудно-фазовой модуляции и параметрического взаимодействия с измеряемыми информационными волнами в морской среде.

Проанализированы преимущества и особенности работы гидроакустических систем мониторинга как параметрических с низкочастотной подсветкой контролируемой среды, построенных на основе закономерностей нелинейной просветной гидроакустики и стационарных, автономных быстро разворачиваемых, корабельных гидроакустических станций. Обоснованы требования, необходимые для создания просветных гидроакустических систем мониторинга пространственно-временных характеристик полей различной физической природы, формируемых неоднородностями, стихийными явлениями, а также акустически слабозаметными объектами среды и морского дна.

**3.** Экспериментальными исследованиями в модельных и в натуральных условиях подтверждена эффективность нелинейной просветной гидроакустики и реализующих ее систем в решении задач дальнего помехоустойчивого приема и измерения пространственно-временной картины гидрофизических полей морских источников с использованием фазового приема и обработки принимаемых просветных сигналов. Проведено физико-математическое обоснование фазового метода. Представлены результаты обнаружения биологических особей (косяков рыб, крабовых скоплений) по признакам резонансного рассеяния просветных сигналов.

Рассмотрены общие и отличительные характеристики низкочастотных методов просветной и бистатической гидролокации. Обоснована возможность их совместной реализации при организации контроля протяженных морских акваторий. В случае реализации импульсной бистатической гидролокации в системах мониторинга могут быть эффективно использованы методы цифровой обработки, в частности метод Вейвлет - анализа, сопряженный с известными потерями информации, но в допустимых пределах погрешности он является достаточно эффективным инструментом спектральной обработки импульсных сигналов в реальном масштабе времени. Выделение модуляционных и параметрических составляющих в длительных импульсных сигналах бистатической гидролокации возможно, но относительно непрерывных просветных сигналов оно менее эффективно, так как ограничено по времени взаимодействия волн, а также выделения (накопления) информационных волн при обработке.

**4.** Проведен анализ классических методов и средств высокочастотной нелинейной акустики. Результаты их реализации в гидроакустических станциях приема и измерения пространственно-временной структуры гидрофизических полей морской среды показали, что тракты обработки и выделения измеряемых информационных волн обеспечивают повышение чувствительности и направленности параметрического приема волн в широком диапазоне частот, составляющем десятки-сотни герц, но, в целом, эффективность классических параметрических систем остается недостаточной. Прежде всего, это обусловлено применением высокочастотных волн накачки среды, которые исключают существенное увеличение дальности параметрического приема информационных волн. Помехоустойчивость приема сигналов в таких системах также недостаточна, что объясняется низким уровнем формируемых параметрических составляющих (как носителей информационных волн) на фоне интенсивных электрических, вибрационных помех и наводок в приемных трактах станций в рабочем диапазоне частот.

**5.** Рассмотрена физика процессов формирования нелинейных свойств морской среды. Показано, что наличие в морской среде и донных осадках областей фазовых включений приводит к возникновению характерных физических закономерностей, связанных с распространением, рассеянием и нелинейным взаимодействием акустических волн. Интенсивность реверберации высокочастотного непрерывного сигнала накачки в параметрической антенне, нелинейность среды, плотность и скорость звука являются

взаимосвязанными и частотно-зависимыми величинами, которые могут превосходить свои средние значения. Процесс взаимодействия акустических волн в неоднородных средах открывает возможность разработки новых способов излучения и приема низкочастотных акустических сигналов с использованием параметрических антенн. Исходя из современного состояния теории нелинейной гидроакустики, становится очевидной возможность разработки новых эффективных активно-пассивных и параметрических гидролокаторов, использующих информацию, содержащуюся в гидрофизических полях, при исследовании характеристик морской среды.

**6.** Разработаны программы и методики, обеспечивающие возможность обоснованного формирования и эффективной эксплуатации гидроакустических систем мониторинга, сформированных на протяженных морских акваториях с переменными характеристиками среды и границ.

Программа расчета параметров гидроакустического поля, с контролем критериев применимости лучевой теории, с учетом переменного рельефа дна и акустических свойств морского грунта. Программа получила название «Дальность», внедрена и широко используется в практике эксплуатации гидроакустических средств. Отличительной особенностью программы, от ранее разработанных, является то, что в ней горизонтальные неоднородности поля скорости звука по дистанции, представляются набором элементарных одномерно-слоистых задач. Это обеспечивает устойчивую и быструю работу программы в сложных гидрологических условиях, например, по данным измерений скорости звука при вторжении синоптического вихря [74].

С использованием программы «Дальность» проведены расчеты лучевых картин и потерь акустической энергии при распространении звука для случая, когда источники сигналов находятся в глубоководной части волновода, а приемники – на мелководном шельфе. Показано, что при распространении акустических сигналов в шельфовой зоне в результате горизонтальной рефракции происходит пространственное разделение траекторий лучей. Акустическое поле в точке приема формируется сложной совокупностью лучей, при этом границы влияния горизонтальной рефракции на суммарный акустический сигнал становятся протяженными и размытыми [120,123].

Для описания закономерностей формирования лучевой структуры акустических полей предложена методика получения переходной характеристики гидроакустической трассы с использованием импульсных сигналов. Приведен пример практических расчетов переходной характеристики среды на различных расстояниях от источника. Представлена программа для определения местоположения подводного объекта, основанная на известном методе решения обратной лучевой задачи. Проанализирована зависимость углов прихода сигналов на гидроакустическую антенну, на погрешность вычисления координат объекта.

**7.** Многофункциональность и высокая технологичность выполненных и экспериментально подтвержденных в морских условиях разработок нелинейной гидроакустики, обеспечивающих решение актуальных задач гидрофизики и геофизики, свидетельствуют об их инновации и практической готовности к эффективной реализации в системах комплексного мониторинга полей протяженных морских акваторий. Показано, что нелинейная просветная гидроакустика и реализующая ее система мониторинга гидрофизических полей могут найти широкое применение в геологических исследованиях морского дна, проведении морских спасательных работ, обследовании глубоководных инженерных гидротехнических сооружений, а также проведении комплексных океанологических работ [232-234].

Проведены теоретические и экспериментальные исследования, проведены научно-технические разработки способа и гидроакустической системы мобильного параметрического поиска на морском шельфе запасов углеводородов (нефти, газа и газового конденсата). Разработки можно сформулировать в следующем виде:

– обоснована практическая возможность поиска углеводородных залежей на мелководных морских акваториях методами нелинейной акустики;

– на основе разработок низкочастотной просветной и высокочастотной нелинейной гидроакустики предложен способ и мобильная система дальнего параметрического обнаружения и измерения пространственно-временной и спектральной структуры гидрофизических и геофизических полей, формируемых водными и донными морскими источниками в инфразвуковом и дробном диапазонах частот [272,256,276,285,286].

**8.** Рассмотрены основные положения классических высокочастотных методов гидроакустики, а также методов восстановления пространственно-временных характеристик полей объектов и неоднородностей морской среды в формате 3D. Обоснована возможность их практической реализации в просветных гидроакустических системах мониторинга полей морских акваторий. Наиболее помехоустойчивыми зондирующими сигналами являются импульсные посылки с бинарной M - последовательностью. Они обеспечивают повышенную разрешающую способность, как по пространству, так и по радиальной скорости перемещения объекта при восстановлении пространственно-временных (объемных) образов их полей. Такие сигналы реализуются при формировании и излучении (подсветке среды), а также при обработке в приемных трактах (при фильтрации) и последующем восстановлении пространственных образов.

Проведен анализ известных акустических методов построения объемных образов объектов. Для просветных гидроакустических систем мониторинга гидрофизических полей представлен метод выделения в просветных сигналах информационных признаков и построения образов объектов на основе пространственно-временных характеристик фазовых спектров измеряемых информационных полей и алгоритма синхронизации спектральных компонент сигналов. Трехмерное наблюдение пространственно-временных характеристик измеряемых полей в просветных системах мониторинга, может быть реализовано с использованием сложных просветных сигналов, представляющих собой M-последовательность бинарных импульсов.

Обработка принимаемых информационных сигналов является достаточно информативно-емкой и помехоустойчивой, но ее реализация в излучающих и приемных трактах систем мониторинга связана с техническими трудностями. В условиях интенсивных помех среды и нестабильности характеристик океанического канала распространения волн в просветных системах мониторинга может быть реализовано трехмерное наблюдение пространственно-временных характеристик информационных полей, измеряемых параметрическим просветным методом гидролокации, что проверено экспериментально и представлено в данной монографии.

Таким образом, в монографии представлены инновационные разработки нелинейной гидроакустики, включающие: низкочастотную просветную и высокочастотную реверберационную параметрическую гидролокацию, а также низкочастотную просветную томографию пространственно-временных характеристик полей морской среды и объектов в широком диапазоне частот. Определены практические пути формирования просветной многофункциональной гидроакустической системы комплексного мониторинга пространственно-временных характеристик и динамики гидрофизических и геофизических полей протяженных морских акваторий. Измерительная система мониторинга и

контроля морских акваторий обеспечивает реализацию различных вариантов низкочастотной просветной системы дальнего помехоустойчивого параметрического приема «волн малых амплитуд», комплексного мониторинга гидрофизических и геофизических полей объектов, водной среды и морского дна низкочастотного, инфра низкочастотного и дробного диапазонов частот и их наблюдение методом акустической томографии.

Принципиальной новизной и преимуществом просветного метода и реализующей его системы являются большие протяженности обследуемых морских акваторий и широкая масштабность измерительной системы. Эти факторы обусловлены применением низкочастотных (десятки-сотни герц) просветных сигналов.

Макеты экспериментальной просветной системы мониторинга полей морских акваторий были сформированы и реализованы на основе стационарных и быстро разворачиваемых станций, сформированных из автономных средств морского приборостроения.

Разработано и подтверждено авторскими свидетельствами техническое решение, которое обеспечивает определение координат местоположения и пространственную протяженность морских объектов. Оно эффективно объединяет закономерности активно-пассивной и параметрической гидролокации и обеспечивает дальнейшее неконтактное измерение полей акустически слабозаметных объектов и неоднородностей морской среды [1,7,39,41,93] .

Решение задач мониторинга океанских акваторий может быть проведено с использованием акустической томографии разработок просветного метода. Трактами обработки информации в системах акустической томографии, в отличие от классических, измеряется не геометрический образ объектов, а пространственная протяженность спектральных амплитудно-фазовых характеристик их полей различной физической природы в диапазоне частот десятки-единицы-доли герца [3,4].

**9.** Результаты научно-технических разработок средств морского приборостроения. Актуальность, новизна и научно-техническая значимость исследований и конструкторских разработок этого направления, заключается в следующем.

Эффективность применения глубоководных автономных донных станций в решении задач измерения и регистрации гидрофизических и геофизических полей среды и объектов заключается в исключении влияния помех на результат измерения от обеспечивающего корабля и применения в автономном режиме программируемого или управляемого по гидроакустическому каналу связи режима регистрации.

Получение качественно новых данных по гидрофизическим и геофизическим полям среды и объектов достигается объединением группы станций в функционально связанный комплекс. Функциональная связь определяется наличием системы единого времени и связанной с ней системой измерения взаимной дистанции между установленными на дно станциями. Пространственно-развитая система сбора информации позволяет получить данные о пространственно-временной изменчивости среды и пространственных характеристиках первичных (и вторичных) полей объектов, как источников излучения информационных волн. Система ГДАС включает также тракт определения координат расположения станций на морском дне, а также гидроакустический тракт измерения наклонной дальности, сопряженный с системой определения координат корабля ГЛОНАСС - GPS.

В условиях длительной автономной работы особое значение приобретает оперативность доставки информации потребителю. Оснащение станций подсистемой спутниковой связи, работающей в автоматическом режиме, позволяет по заданной программе передать информацию на центральные посты из любой точки Мирового океана. Дальнейшее развитие автономных гидроакустических средств освещения обстановки заключается в оснаще-

нии донных станций пространственно-развитыми, преимущественно цилиндрическими звукопрозрачными антеннами, основанными на цифровых технологиях предварительной обработки, передачи информации в вычислительный блок и передачи результата обработки в формулярном виде на центральный информационно-аналитический комплекс.

Разработаны основы проектирования и создания системы функционально связанных (СФС) гидроакустических донных автономных станций (ГДАС), а также автономных радиотехнических модулей космической связи (АРТМ КС). Разработаны технологии изготовления изделий ГДАС и АРТМ КС, налажено их серийное производство.

На основе СФС ГДАС и АРТМ КС сформирован быстро разворачиваемый измерительный радиогидроакустический комплекс (КИРГАК). Разработаны практические пути реализации комплекса в автономном режиме, а также в качестве модуля создаваемой системы освещения и контроля Морской экономической зоны Дальневосточного Региона (МЭЗ ДВР).

Результаты многолетней и разносторонней эксплуатации разработанных СФС ГДАС и АРТМ КС подтвердили их надежность и высокую эффективность. Исследованиями и испытаниями изделий в различных морских условиях показано, что эксплуатационные технические характеристики разработанных под руководством и при непосредственном участии автора, изделий на технологических линиях СКБ САМИ находятся на уровне известных мировых образцов.

На основе СФС ГДАС и АРТМ КС сформирован быстро разворачиваемый измерительный радиогидроакустический комплекс (КИРГАК). Разработаны практические пути реализации комплекса в автономном режиме, а также в качестве модуля создаваемой системы освещения и контроля Морской экономической зоны Дальневосточного Региона (МЭЗ ДВР).

Созданный КИРГАК обеспечивает непрерывный скрытый контроль характеристик гидроакустических и гидрофизических полей морской среды и объектов, а также возможность их длительной консервации на магнитных носителях с параллельной передачей информации по каналу космической связи в центральный пост (ЦП) сбора и обработки информации.

**10.** На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований проведено обоснование возможностей прогнозирования и упреждающего оповещения населения и специальных служб о вступлении сильных землетрясений. На данном этапе исследований проведено обоснование возможных практических путей прогнозирования сильных землетрясений. Они основаны на большом объеме теоретических и экспериментальных исследований материалов дальневосточных ученых и инженеров в области сейсмических, синоптических и гидродинамических процессов в атмосфере и океане и земной коре, в качестве которых рассматривались [89,90,121,122,126,239-241]:

- внутренние волны, как предвестники сильных землетрясений за время прохождения полного синоптического цикла в переходной зоне Охотского и Японского морей;

- низкочастотные акустические Т-волны, порождаемые землетрясениями, с их последующей регистрацией акустическими системами после разворота на акваториях шельфовых зон;

- низкочастотные электромагнитные волны, возбуждаемые земной поверхностью и фокусируемые в атмосфере;

- параметрический прием акустических, электромагнитных и гидродинамических волн, создаваемых подводными землетрясениями просветными измерительными системами, формируемыми на основе средств морского приборостроения.



- обоснована возможность комплексной регистрации признаков этих колебаний, на основе измерительных технологий низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики.

На основании результатов теоретических исследований и экспериментальных наблюдений поведения сейсмической активности земной коры при воздействии на нее распределенной атмосферной нагрузкой продолжительной длительности было получено решение бигармонического уравнения, описывающего процесс механического изгиба неограниченной по площади земной плиты, сделана попытка оценки толщины ее слоя, вовлекаемой в колебание изгиба земной коры. В этих экспериментах были получены также оценки погрешности расчетной формулы, а также решены методические вопросы, связанные с организацией проводимых измерений.

Использование современных измерительных сенсоров электромагнитных волн, а также приемников электромагнитных волн позволяет значительно повысить надежность и правильность прогнозирования землетрясений и цунами. Теоретически доказано, что вероятность правильного прогноза (определения очага землетрясения и его интенсивности) может превышать величину вероятности 0,95 за 20-30 минут перед прибытием деструктивной упругой волны. Экспериментальные исследования приема электромагнитных волн в пространстве находятся в хорошем соответствии с теоретическими допущениями, сделанными в данной работе

При этом следует подчеркнуть, что решение сложной и актуальной задачи по определению места очага землетрясения и по своевременному оповещению о нем по основным критериям обосновано и разработано, но до настоящего времени практически не реализовано. Обнаружение координат и времени вступления опасных последствий от сильных землетрясений по акустическим измерениям их предвестников также разработано, но, к сожалению, реализуется неэффективно. Перспективным путем реализации этих направлений (прогнозирование и оповещение) может быть разрабатываемое в настоящее время широкомасштабное сейсмоакустическое наблюдение этого явления в создаваемой региональной системе освещения подводной обстановки [2,13,235,236,250,254,272].

Проблема прогнозирования землетрясений может быть успешно выполнена как на экспериментальном, так и на конструкционном уровне в течение следующих лет в рамках разработок Дальневосточной региональной системы освещения морской обстановки, мониторинга гидрофизических и геофизических и радиофизических полей атмосферы, океана и земной коры.

**11.** Проведен анализ закономерности и измерительные технологии низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, а также научно-технических разработок средств морского приборостроения. Обоснованы практические пути их реализации в создании широкомасштабных радиогидроакустических систем контроля сейсмической и синоптической обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы (акустических, электромагнитных, гидродинамических) на протяженных акваториях.

Измерительные технологии нелинейной просветной гидроакустики включают выполнение операций, которые разработаны и изложены в монографиях, а их научная новизна подтверждена патентами на изобретение [1-7,105,118,128,233,234,254-256,280,285-288].

**12.** Разработаны технологии нелинейной просветной гидроакустики, обеспечивающие дальний и сверхдальний параметрический прием волн различной физической природы, формируемых источниками, и процессами атмосферы и океана. Разработаны экс-

периментальные просветные системы, с использованием которых измерительные технологии прошли проверку и подтвердили свою эффективность. Проведены расчеты пространственной структуры просветного акустического поля на трассе о. Сахалин – о. Итуруп протяженностью 350 километров. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований и расчетов структуры просветного акустического поля проведены разработки технических основ и практических путей создания просветной гидроакустической системы контроля и мониторинга потей атмосферы и океана в переходной зоне Охотского и Японского морей.

На основе научно-технических разработок средств морского приборостроения, преимущественно радиогидроакустических комплексов, а так же систем космической связи, создаваемых ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН, обоснованы принципы построения и эксплуатации системы освещения и мониторинга полей как радиогидроакустической, обеспечивающей ее вхождение в Региональный информационно аналитический центр анализа многофункциональной информации и выработки команд управления. Сформулированы основные тактико-технические требования, необходимые для создания и эффективной эксплуатации радиогидроакустической системы мониторинга и контроля акваторий в переходной зоне Охотского и Японского морей. Такая система является основным блоком создаваемой Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей источников и явлений атмосферы, океана и земной коры.

**В монографии представлены инновационные разработки** научно технических основ, практических путей создания и эксплуатации Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы, формируемых источниками, процессами и явлениям атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот десятки - единицы килогерц, сотни – десятки – единицы – доли Герца. При этом, так же надежно измеряются волны СНЧ колебаний движущихся объектов и неоднородностей среды. Научно-технические разработки и измерительные технологии нелинейной просветной гидроакустики являются многофункциональными и обеспечивают решение смежных задач гидрофизики, геофизики и радиофизики. Совокупность выполненных и подтвержденных натурными испытаниями научно-технических разработок обеспечивают возможность практического использования пространственно распределенного информационного поля Земли в решении многофункциональных задач морской науки, оборонного и народно-хозяйственного комплексов.

Радиогидроакустическая система формируется на основе закономерностей и измерительных технологий низкочастотной нелинейной просветной гидроакустики, а также технических характеристик средств морского приборостроения, преимущественно быстро разворачиваемых радиогидроакустических комплексов и радиотехнических модулей космической системы связи, в этой связи, она может масштабироваться в пределах акваторий МЭЗ ДВР.

Новыми научными разработками и техническими решениями, представленными в монографии можно считать следующие.

Разработки технических решений и инновационных измерительных технологий, а также практических путей совместной реализации в создаваемой системе освещения и мониторинга закономерностей нелинейной низкочастотной просветной и высокочастотной гидроакустики.

Разработки общей принципиально новой структуры конструкторских решений в создании радиогидроакустических трактов и блоков СФС ГДАС, применительно к ре-

шению задач комплексного мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий.

Разработки практических путей применения контрольно-измерительных радиогидроакустических комплексов, как модулей Дальневосточной системы освещения и мониторинга полей морских акваторий, обеспечивающих использование космических каналов связи и передачи многоканально измеряемой информации в Региональный информационно-аналитический центр управления подсистемами, распределенными по акваториям МЭЗ ДВР, как блоками системы мониторинга.

Результаты дальнего и сверхдальнего параметрического приема волн различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот сотни – десятки – единицы – доли Герца, включая СНЧ колебания движущихся объектов и неоднородностей среды, как целого.

Научно технические разработки принципов формирования и эксплуатации Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей различной физической природы, формируемых искусственными и естественными источниками, процессами и явлениями атмосферы, океана и земной коры в диапазоне частот составляющим сотни – десятки – единицы – доли Герца, включающим СНЧ колебания движущихся объектов и неоднородностей среды, как целого.

Обобщены и проанализированы материалы зарождения и развития нелинейной акустики зарубежными и отечественными учеными, на основе которых представлены результаты научно-технических разработок нелинейной просветной гидроакустики, как новое научно-техническое направление, обоснованы практические пути их реализации в просветных гидроакустических системах мониторинга полей среды и объектов различной физической природы (акустических, электромагнитных и гидродинамических).

Обоснована практическая возможность совместной реализации научно-технических разработок высокочастотной и низкочастотной (просветной) параметрической гидролокации, а также просветной акустической томографии пространственно временных характеристик информационных полей объектов и среды. Представлены разработки измерительных технологий просветной гидроакустики, обеспечивающие дальний параметрический прием волн различной физической природы, формируемых естественными и искусственными источниками, процессами и явлениями в морской среде. Подтверждена возможность дальнего параметрического приема информационных волн различной физической природы в диапазоне частот, составляющем сотни – десятки – единицы – доли Герца. При этом обеспечивается прием волн, формируемых СНЧ колебаниями движущихся объектов и возбуждаемых неоднородностей среды.

Представленные в монографии результаты исследований и научно-технических разработок нелинейной просветной гидроакустики, а так же радиогидроакустических средств морского приборостроения, выполнялись на Дальнем Востоке, преимущественно авторами монографии, в период с 80-х годов прошлого столетия по настоящее время. Они опубликованы в 7-и монографиях, более 300-х изданиях различного уровня, подтверждены более 50-ю авторскими свидетельствами и патентами на изобретение.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М., Леоненков Р.В. Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды: монография. – Владивосток: ДВО РАН, 2006. – 173 С.
2. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Карачун Л.Э., Халаев Н.Л. Создание и эксплуатация радиогидроакустических систем комплексного мониторинга гидрофизических полей морских акваторий на основе разработок средств морского приборостроения: монография. – Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2012. – 264 С.
3. Стародубцев П.А., Мироненко М.В. и др. Теоретические основы формирования просветных систем и перспективы развития морского приборостроения на Дальнем востоке: монография. – Владивосток: МГУ им. Г.И. Невельского, 2006. – 180 С.
4. Стародубцев П.А. Акустическая томография в процессе обнаружения подводных объектов: монография. – Владивосток: МГУ им. Г.И. Невельского, 2005. – 190 С.
5. Мироненко М.В., Тахтеев В.А., Шевченко Е.В., Карасев В.В., Стародубцев П.А., Пичугин К.А. Дальнее обнаружение слабозаметных неоднородностей морской среды маломощными низкочастотными просветными сигналами: монография. – Владивосток: ТОВМИ им.С.О. Макарова, 2007. – 160 С.
6. Стародубцев П. А., Мироненко М. В., Карасев В. В. и др. Научно-технические пути построения и эксплуатации широкомасштабных систем томографического наблюдения пространственно-временных характеристик гидрофизических полей морской среды: монография. – Владивосток: МГУ им. Г. И. Невельского, 2010. – 273 С.
7. Мироненко М. В., Василенко А. М., Бахарев С. А., Стародубцев П. А., Пятакович В. А. Нелинейная гидроакустика в системах мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий: монография. – Владивосток: ТОВМИ им. С. О. Макарова, – 323 С.
8. Новиков В.К., Руденко О.В., Тимошенко И.И. Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – С.6–12, 203–292.
9. Фарук Хусейн. Конец недосыгаемости // Ньюсайентист. – 1974. – Т. 63, №910. – С.377 – 379.
10. Ляликов А.В. Тенденция развития средств дальнего обнаружения подводных лодок в ВМС США. М.: "Красная звезда". Морской сборник. №12. 1977.– С. 87–98.
11. Демьянович В.В. Как создавалась станция "Агам" в книге "Из истории отечественной гидроакустики". – С– Петербург, Морфизприбор, 1998.– С. 295–315.
12. Мироненко М.В., Шилин В.Я. Изыскание путей создания средств обнаружения малоразмерных и акустически слабозаметных морских объектов. – Владивосток, ДВПИ, сб. тр. ДВНТК, 1976. С. 15-20.
13. Малашенко А.Е., Недорез Ю.И., Таболяков А.А., Храмушин В.Н., Емельяненко В.Ф. Предложения о НИОКР по созданию элементов системы Красный М. Л., Храмушин В.Н. и др. Пути создания системы мониторинга Сахалинской области, г. Ю–Сахалинск. СКБ САМИ ДВО РАН, 2001.– 20 С.
14. Недорез Ю.Н. Концепция устойчивого развития Сахалинской области, г. Ю–Сахалинск. СКБ САМИ ДВО РАН. Изд. "Интилл", 1997.– 32с.
15. Красный М.Л., Храмушин В.Н. Пути создания системы мониторинга Сахалин-й области, г. Ю.-Сахалинск. СКБ САМИ ДВО РАН.1998. – 208 С.
16. Система многофункциональных гидроакустических станций "Миф–2". г. Ю-Сахалинск, СКБ САМИ ДВО РАН, 1990. 115 С.

17. Отчет о НИР "Исследование статистических свойств гидроакустических помех естественного и искусственного происхождения в ближней морской зоне СФ в целях оптимизации системы освещения подводной обстановки", "Спардек", 1 этап, г. Ю-Сахалинск, СКБ САМИ ДВО РАН, 1999 95 С.
18. Малашенко А.Е., Недорез Ю.И., Емельяненко В.Ф. Отчет о НИР «Предложения по созданию системы сейсмоакустического мониторинга». Ю-Сахалинск, СКБ САМИ ДВО РАН, 2002.– 40 С.
19. Система многофункциональных гидроакустических станций "Миф-2". Руководство по эксплуатации ДЖУ 1.000.002РЭ, №122-ф, г. Ю-Сахалинск, СКБ САМИ ДВО РАН, 1991. 55 С.
20. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Таболяков А.А. Измерительные технологии просветного метода гидролокации // Материалы 14 Всероссийской межвузовской НТК, "Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания", т.1, Владивосток, ТОВМИ, 2002, С. 84-88.
21. Урик Р.Д. Нелинейные явления в гидролокаторе // Основы гидроакустики, пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – С. 101 – 106.
22. Универсальный ультразвуковой гидролокатор с сигналом накачки: пат. 3,870.988 США / Д. Тернер. – 1975.
23. Мироненко М.В. Разработка нетрадиционного метода измерения полей морских объектов, основанного на подсветке среды акустическими сигналами: сб. ст. ТОВВМУ им. С.О. Макарова. – вып. 12. – Владивосток, 1987. – С. 120–125.
24. Полякова А.Л., Силиверстова О.Ю. О параметрическом излучателе с пузырьками газа в среде // Акустический журнал. – 1980. – Т. 26, № 5. – С. 783–787.
25. Кобелев А.М., Сутин А.М. Генерация звука разностной частоты в жидкости с пузырьками газа // Акустический журнал. – 1980. – Т. 26, № 6. – С. 860 – 865.
26. Калачев А.И., Островский Д.В. Исследования поля параметрического излучателя // Акустический журнал. – 1983. – Т. 29, № 3. – С. 406.
27. Назаров В.Е., Сутин А.М. Характеристики параметрического излучателя звука с пузырьковым слоем в дальней зоне // Акустический журнал. – 1984. – Т. 30, № 6. – С. 803–807.
28. Самойлов Л.К. Электронное управление характеристиками направленности антенн // Библиотека инженера – гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1987. – 280 С.
29. Акустические свойства кильватерного следа // Физические основы подводной акустики: пер. с англ.; под ред. В.И. Масищева. – М.: Сов. радио, 1955. – С. 593–732.
30. Мироненко М.В., Василенко А.М., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э. Технологии активно-пассивного и параметрического метода гидролокации: сб. тр. Нижегородской акустической конференции. – Нижний Новгород, 2002. – С. 67–70.
31. Мироненко М.В. Разработка метода обнаружения акустически слабозаметных морских объектов, основанного на подсветке морской среды акустическими сигналами // Сборник статей ТОВВМУ им. С.О. Макарова, вып. 12, Владивосток, 1987, С. 120-125.
32. Мироненко М.В., Короченцев В.И. Закономерности взаимодействия упругих и электромагнитных волн в морской воде // Международный симпозиум «Подводные технологии – 2000». – Япония, Токио. – 2000. – май. – С. 105–109.
33. Мироненко М.В., Василенко А.М., Карачун Л.Э., Таболяков А.А. Пространственная амплитудно-фазовая структура поля низкочастотных акустических волн в протяженном

акустическом волноводе с переменными характеристиками среды и ее границ: сб. тр. 14-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 146–151.

34. Мироненко М.В., Петроченко С.П., Минаев Д.Д. Измерительные технологии акустического просветного метода гидролокации в решении задач мониторинга морских акваторий: сб. тр. 12-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 359–364.

35. Флатте С.М., Тапперт Р.Д. Расчет влияния внутренних волн на передачу звука в океане // JASA. – 1975. – Т. 58, № 6. – С. 1151–1157.

36. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Мир, 1973.

37. Донской Д.М., Зверев В.А., Калачев В.И. Параметрическая селекция звуковых лучей // Акустический журнал, 1983. – т. 29, №2.-С. 181-185.

38. Зверев В.А. Обращение волнового фронта для снижения влияния многолучевости на результат активной локации // Акустический журнал. – 2003. – Т. 9, № 6. – С. 814–819.

39. Определение координат источника звуковых волн (ДОЛАН): А. С. 007613618 РФ / А.М. Василенко, В.Н. Долгих, А.Е. Бородин; опубл. – 24.08.2007.

40. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Советское радио, 1972. – С. 12–17.

41. Мироненко М.В., Клименко Н.А., Рокотов С.П. К вопросу акустического контроля размеров экранов дифракционным способом: Сб. докл. 4-й Дальневосточной акуст. конф. «Распространение акустических волн». – Владивосток: ДВПИ, 1986. – С. 142–144.

42. Мироненко М.В., Таболяков А.А., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Прогнозирование сильных землетрясений по измерениям характеристик предвестников: сб. тр. 13-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2003. С. 7–71.

43. Шилин В.Я., Мироненко М.В. Расчет характеристик звуковых полей // Дальневосточный акустический сборник. – Владивосток: ДВПИ, 1975. – С. 78–87.

44. Мироненко М.В., Пономарев В.В., Чудаков А.И. Дальнее обнаружение и классификация морских биологических скоплений: сб. докл.-в Международной конференции «Проблемы конверсий и оборонных технологий». – С.-Пб.: Морфизприбор, 1996. – С. 16–18.

45. Малашенко А.Е. Аппаратура измерения взаимной дистанции в составе автономных донных гидроакустических средств // VI Международная НТК АПЭП. – Новосибирск, 2002. – С. 25–27.

46. Мироненко М.В., Чудаков А.И., Черкашин Ю.В. Пространственно-временная обработка просветных сигналов в системах мониторинга морской среды с использованием АНПА // Третья всероссийская НТК «Технические проблемы освоения мирового океана». – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН. – 2009. – 22 – 25 сентября. – С. 191–195.

47. Савельев И.В. Дифракция // Курс физики. – М.: Наука, 1971. – Т. 3. – С. 284–319.

48. Отражение звука от подводных лодок и кораблей // Физические основы подводной акустики: пер. с англ.; под ред. В.И. Мясищева. – М.: Сов. радио, 1955. – С. 481–592.

49. Сташкевич А.П. Сила цели // Акустика моря. – Л.: Судостроение, 1966. – С. 325–331.

50. Янке Э., Эльде Ф., Леш Ф. Спец. функции, таблицы, формулы. – М.: Наука, 1967. – 120 С.

51. Лепендин Л.Ф. Рассеяние волн // Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – С. 248–314.

52. Мироненко М.В. Исследование возможности обнаружения подводных объектов дифракционным способом в условиях мелководья: Сб. тр. ДВ НТК. – Владивосток, 1977. – № 15. – С. 50–54.

53. Мироненко М.В., Шилин В.Я. Некоторые результаты исследования дифракционного поля в гидроакустическом бассейне // Дальневосточный акустический сборник. – Владивосток, 1975. – Вып. 1. – С. 130–134.

54. Скучик Е. Основы акустики. – М.: Мир, 1976. – Т. 1. – С. 200–203.
55. Мироненко М.В. Результаты модельных экспериментальных исследований возможности обнаружения подводных объектов методом разнесенного излучения-приема сигналов: сб. тр. ДВ НТК. – Владивосток, 1979. – № 17. – С. 72–77.
56. Мироненко М.В. Исследование практических возможностей обнаружения подводных объектов, как акустических экранов в условиях мелко-водья с использованием разнесенного излучения-приема: сб. тр. ДВ НТК. – Владивосток, 1980. – № 18. – С. 17–20.
57. Мироненко М.В. Результаты обнаружения подводных тел дифракционным способом в условиях мелководья: сб. тр. ДВ НТК. – Владивосток, 1981. – № 19. – С. 68–72.
58. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1973. – 184 С.
59. Ольшевский В.В. Статистические свойства морской реверберации. – М.: Наука, 1966. – 202 С.
60. Толстой И., Клей К.С. Акустика океана: пер. с англ.; под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Мир, 1969. – 302 С.
61. Урик Р.Д. Шум, излучаемый кораблем, подводной лодкой и торпедой // Основы гидроакустики: пер. с английского. – Л.: Судостроение, 1978. – С. 342–268.
62. Росс Д. Шумы: Источники, излучение, ослабление // Подводная акустика и обработка сигналов: пер. с англ.; под ред. Ю.Ю. Житковского. – М.: Мир, 1985. – С. 9–31.
63. Александров И.А. О физической природе звука вращения гребного винта в режиме кавитации // Акустический журнал. – 1962. – Т. 8, № 4. – С. 34.
64. Блохинцев Д.И. Рассеяние звука в турбулентном потоке // Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – С. 70–77.
65. Калашников Ю.Н., Зайцева Ю.С. О существовании газовых пузырьков в тяжелой жидкости со свободной поверхностью: сб. НТО Судпрома. – Л., 1971. – С. 79–82.
66. Нулейман Г.Г., Сорокина А.И., Агафонов Е.А. Экспериментальные исследования размеров воздушных пузырьков в кильватерных струях надводных кораблей // Военная радиоэлектроника. Наука. – 1962. – № 15. – С. 151–156.
67. Петухов В.И. Проблемы создания информационно-аналитической системы мониторинга гидролого-акустической обстановки в океане // Информационные технологии. – 1998 – № 9. – С. 31–33.
68. Петухов В.И. Методы автоматизированного районирования для геофизических приложений // Информационные технологии. – 1998. – № 11. – С. 32–35.
69. Васильев Л.А. Теневые методы. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
70. Tappert F.D., Smith K.B. The University of Miami Parabolic Equation. Model Version 1.1. // Marine Physical Laboratory Scripps Institution of Oceanography University of California, San Diego, 1994. – 96 С.
71. Вагин А.В. Расчет лучевых картин, суммарного звукового поля, его угловой, временной, фазовой и энергетической структуры в двумерно-неоднородной среде: отчет о НИР / АКИН. – М., 1974.
72. Кудрявцев В.И. Промысловая гидроакустика. Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1972. – С. 15–112.
73. Кудрявцев В.И. Использование эффектов нелинейной акустики // Промысловая гидроакустика и рыболокация. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – С. 288–294.
74. А.М. Василенко, В.Э. Малиновский, Д.А. Алюшин. Программа расчета и анализа параметров гидроакустического поля «Дальность». А.С.№ 2003611941 РФ, опублик. 2003.

75. Гущин В.В., Заславский Ю.М. Параметрический приемник с управляемой диаграммой направленности // *Акустический журнал*. – Т. 16, № 2, 1979. – С. 245–251.
76. Новиков Б.К., Тарасов В.И. Тимошенко В.И. Формирование характеристик параметрического излучателя вблизи отражающей границы // *Акустический журнал*. – Т. 29, № 2, 1983. – С. 240–246.
77. Мироненко М.В. К вопросу формирования в нелинейной водной среде параметрических сигналов разностной частоты // *Акустические антенны и преобразователи*. – Владивосток: ДВГУ, 1988. – № 10. – С. 15–19.
78. Карачун Л.Э., Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Таболяков А.А. Исследование характеристик внутренних волн океана с использованием зонда из пространственно распределенных датчиков температуры: сб. тр. 13-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2003. – Т – 4. – С. 157–159.
79. Карачун Л.Э., Малашенко А.Е., Таболяков А.А., Василенко А.М. Получение аналитического и графического отображения передаточной характеристики гидроакустического канала с использованием импульсных сигналов: сб. тр. 13-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2003. – Т – 4. – С. 60–62.
80. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Широкомасштабный акустический эксперимент по измерению характеристик гидродинамических возмущений морской среды, сформированных синоптическими процессами: сб. тр. 14-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 560–564.
81. Мироненко М.В., Бобков А.И., Малашенко А.Е., Таболяков А.А. Совместная реализация низкочастотных методов прозвучивания и бистатической гидролокации в системах мониторинга и контроля протяженных морских акваторий: сб. тр. 14-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 411–415.
82. Мироненко М.В., Таболяков А.А., Василенко А.М., Карачун Л.Э. Экспериментальные исследования пространственной амплитудно – фазовой структуры дифракционного звукового поля за экранами и объектами, обоснование метода дистанционной гидроакустической размеромерии: сб. 14-й сес. РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 419–423.
83. Мироненко М.В., Долгих В.Н., Таболяков А.А., Карачун Л.Э. Реализация низкочастотного прозвучивания метода гидролокации в условиях мелководья с использованием случайных антенн: сб. тр. 14-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 415–419.
84. Урик Р.Д. Отражение и рассеяние звука гидроакустическими целями // *Основы гидроакустики*: пер. англ. – Л.: Судостроение, 1978. С. 334.
85. Черкашин Ю.В., Мироненко М.В., Кречетов Д.Г., Таболяков А.А. Квази оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки вторичных полей морских объектов в условиях многолучевого распространения гидролокационных сигналов: сб. тр. 14-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 509–512.
86. Мироненко М.В., Киян Ю.В., Таболяков А.А., Чудаков А.И. Способы и устройства направленного параметрического излучения и приема низкочастотных акустических волн антеннами малых волновых размеров: сб. тр. 15-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – С. 199–203.
87. Мироненко М.В., Киян Ю.В., Малашенко А.Е., Таболяков А.А. Измерение гидродинамических возмущений среды многоканальными прозвучивающими системами // 46-я Всероссийская межвузовская НТК. – Т. 1. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2003. – С. 117–121.
88. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Таболяков А.А. Карачун Л.Э. Аналитическое представление и графическое отображение импульсной передаточной характеристики



гидроакустического волновода // 46-я Всероссийская межвузовская НТК. – Т. 1. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». – Влад-ок: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2003. – С. 124–128.

89. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Таболяков А.А. Карачун Л.Э. Исследование внутренних волн океана пространственно распределенными датчиками температуры // 46-я Всероссийская межвузовская НТК. – Т. 1. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2003. – С. 121–124.

90. Карачун Л.Э., Малашенко А.Е., Таболяков А.А. Автономный радиогидроакустический комплекс измерения гидрофизических полей морской среды // 47-я Всероссийская межвузовская НТК. – Т. 1. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2004. – С. 88–90.

91. Карачун Л.Э., Малашенко А.Е., Василенко А.М. Импульсная передаточная характеристика гидроакустического волновода и ее реализация в решении задачи «Обратного фазового фронта волны» // 47-я Всероссийская межвузовская НТК. – Т. 1. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2004. С. 98–100.

92. Карачун Л.Э., Таболяков А.А., Василенко А.М. Обоснование и реализация параметрической модели низкочастотного просветного метода гидролокации // 47-я Всероссийская межвузовская НТК. – Т. 1. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2004. – С. 101–103.

93. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Василенко А.М., Таболяков А.А. Дистанционная гидроакустическая размеромерия профилей подводных объектов // 47-я Всероссийская межвузовская НТК. – Т. 1. «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания». – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2004. – С. 107–109.

94. Подводная акустика: пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – С. 325–246.

95. Устройство для приема инфранизкочастотных колебаний: А. С.№ 422197 СССР / В.А. Зверев, И.А. Калачев; 1982.

96. Мироненко М.В., Мироненко А.М. Метод дальнего параметрического приема акустических волн низкочастотного и инфра низкочастотного диапазонов: сб. тр. 11-й сес. РАО. – М.: ГЕОС, 2001. – Т. 2. – С. 222–225.

97. Зверев В.А. Как зарождалась идея акустической параметрической антенны // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45, № 5. – С. 685–692.

98. Мироненко М.В., Пономарев В.В., Чудаков А.И. Проблемы гидролокации, перспективы ее развития: сб. тр. 11-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 11–14.

99. Мироненко М.В., Короченцев В.И. Взаимодействие упругих и электромагнитных волн: сб. тр. 11-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, –2001. – С. 303–306.

100. Турмов Г.П., Короченцев В.И., Городецкая Е.Ф. и др. Передача информации из воздушной среды в морскую и обратно: тр. международного симпозиума «Подводные технологии – 2000». – Япония, Токио, 2000. – май. – С. 110–115.

101. Турмов Г.П., Мироненко М.В., Короченцев В.И. Гидроакустическая система мониторинга морских акваторий: сб. ст. ПМРЭВ ВТ ВМФ. – Владивосток: ТОВВМУ, 1999. – № 21. – С. 47–60.

102. Долгих В.Н., Бородин А.Е. Высокопроизводительный метод корреляционной обработки информации в пространственном фильтре акустических сигналов: сб. тр. XI сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2000. – Т. 2. – С. 22–25.

103. Мироненко М.В., Петроченко С.П., Минаев Д.Д., Таболяков А.А. Измерительные технологии просветного метода гидролокации в решении задач мониторинга морских ак-

ваторий: сб. тр. XII сессии РАО, IX школы семинара Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2002. С. 359–364.

104. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Шостак С.В., Мироненко Т.А. Помехоустойчивость приема информации при реализации просветного метода гидролокации морских акваторий: сб. тр. XII сессии РАО, IX школы семинара Л.М. Бреховских. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 381–386.

105. Способ параметрического приема упругих волн в морской среде (4 варианта): пат. 2158029 РФ / В.И. Короченцев, М.В. Мироненко; опубл. 20.11.2000.

106. Мироненко М.В., Короченцев В.И., Василенко А.М. Бестелесная параметрическая акустическая антенна в низкочастотных просветных системах мониторинга: сб. тр. 12-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2002. С. 69–72.

107. Мироненко М.В., Короченцев В.И., Киян Ю.В., Василенко А.М. Измерение характеристик гидродинамических возмущений морской среды многоканальными системами контроля: сб. тр. 13-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 135–138.

108. Роберт Дж. Урик. Глубоководная цепочка гидрофонов: пат. 398222 США.

109. Митько В.Б., Евтютов А.П., Гушин С.Г. // Гидроакустические средства связи и наблюдения. – Л.: Судостроение, 1982. – 200 С.

110. Черкашин Ю.В., Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Кречетов Д.Г. Оптимальная обработка сигналов активной гидролокации в трактах гидроакустических станций, включающих многоэлементные случайные антенны: сб. тр. 15-й сессии РАО. – М., ГЕОС, 2004. – Т. 2. – С. 195–199.

111. Westervelt P.J. Parametric acoustic array. – J. Acous. Soc. Amer, 1963. – V. № 4. – С. 532–537.

112. Мироненко М.В. Результаты теоретических и экспериментальных исследований пространственной амплитудно-фазовой структуры поля низкочастотной подсветки среды: сб. ст. – Владивосток: ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 1985. – Вып. 2. – С. 26–31.

113. Мироненко М.В., Минаев Д.Д. Закономерности параметрического взаимодействия волн различной физической природы в морской среде и их реализации в разработках систем дальней звукоподводной связи: сб. ст. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 1986. – Вып. 3. – С. 82–87.

114. Пауэрс Дж., Лондри Дж., Уэйд Г. Восстановление изображений по фазовым и амплитудным голограммам: Акустическая голография: пер. с англ.; ред. В.Г. Прохорова. Л.: Судостроение, 1975. С. 132–145.

115. Пестряков В.Б. Фазовое обнаружение. Фазовые радиотехнические системы. – М.: Сов. Радио, 1958. – С. 308–352.

116. Харкевич А.А. Влияние вида модуляции. Борьба с помехами. – М.: Радиосвязь, 1965. – С. 50–60.

117. Тихонов В.И. Различие сигналов со случайными амплитудой и фазой. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радиосвязь, 1963. – С. 123–140.

118. Способ передачи упругой волны в морской среде (варианты): пат. 2158029 РФ / В.И. Короченцев, М.В. Мироненко И.Н. Сургаев; опубл. 20.11.2000.

119. Шостак С.В., Мироненко М.В., Сургаев И.Н. Амплитудно-фазовая модуляция акустических волн при их взаимодействии в морской среде: сб. ст. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2001. – Вып. 22 – С. 82–88.

120. Василенко А.М., Карачун Л.Э., Табожков А.А. Моделирование пространственной амплитудно-фазовой структуры акустического поля в океаническом волноводе // Пробле-

мы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб. ст. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О.Макарова, 2004. – Вып. 49. – С. 25–29.

121. Василенко А.М., Карачун Л.Э., Таболяков А.А. Акустические измерения гидродинамических возмущений морской среды, сформированных атмосферными синоптическими процессами // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб. ст. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2005. – Вып. 51. – С. 59–61.

122. Таболяков А.А., Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Карачун Л.Э. Сейсмоакустический мониторинг Охотоморского региона с обоснованием метода прогнозирования сильных землетрясений: сб. тр. международной научной конференции «Научные мосты между Северной Америкой и Российским Дальним Востоком». – Владивосток: Дальнаука, 2004. – Сентябрь. – С. 24 – 25.

123. Карачун Л.Э., Таболяков А.А., Мироненко М.В., Василенко А.М. Исследование закономерностей горизонтальной рефракции акустических волн в шельфовой зоне островов Охотского моря: сб. тр. международной научной конференции «Научные мосты между Северной Америкой и Дальним Востоком России». – Владивосток: Дальнаука, 2004. – Сентябрь. – С. 43 – 45.

124. Таболяков А.А., Карачун Л.Э., Мироненко М.В., Чудаков А.И. Акустический мониторинг поведения морских животных в Юго-западной части Охотского моря: сб. тр. международной научной конференции «Научные мосты между Северной Америкой и Российским Дальним Востоком». – Владивосток: Дальнаука, 2004. С. 66, 67.

125. Мироненко М.В., Короченцев В.И., Малашенко А.Е., Василенко А.М. Нелинейное взаимодействие акустических и электромагнитных волн в проводящей морской среде, реализация закономерностей взаимодействия в томографических системах мониторинга морских акваторий: 15-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2004. – Т. 2. – С. 176–180.

126. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Киян Ю.В. Применение метода гидролокации на просвет в системах морского монитинга // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. – Ю.-Сахалинск: Сах. кн. изд-во, 2005. – Вып. 1. – С. 114–124.

127. Мироненко М.В., Василенко А.М., Карачун Л.Э., Таболяков А.А. Оценка помехоустойчивости приема информации при реализации просветного метода гидролокации // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. – Ю.-Сахалинск: Сах. кн. изд-во, 2005. – Вып. 1. – С. 135–139.

128. Амплитудно-фазовая структура акустического поля в протяженном океаническом волноводе с переменными характеристиками среды («Амплитудно-фазовый фронт»): а. с. 2004611325 РФ / Л.Э. Карачун, М.В. Мироненко, А.М. Василенко, А.А. Таболяков. 29.03.2004.

129. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Таболяков А.А., Чудаков А.И. Физико-математические основы и практические пути реализации параметрических акустических антенн в системах мониторинга морских акваторий: сб. тез. Докл. на международной конференции. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – С. 25.

130. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. – М.: Мир, 1983. – Т. 1.

131. Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974.

132. Акуличев В.А., Буланов В.А. и др. Распределение пузырьков и акустическая нелинейность приповерхностного слоя моря // Сибирское отделение РАН. – 1992. – Вып. 105. – С. 75–80.

133. Способ формирования направленного излучения низкочастотных сигналов: пат. 2096807 РФ / С.А. Бахарев, В.А. Буланов. 1994.
134. Способ обнаружения низкочастотных гидроакустических излучений: пат. 2096808 РФ / С.А. Бахарев. 1995.
135. Способ высоконаправленного излучения и приема широкополосных гидроакустических сигналов: пат. 2247409 РФ / С.А. Бахарев. 2003.
136. Бахарев С.А. Способ снижения уровня собственных помех в ППА // Измерительная техника. – М.: Госстандарт, 1995. – № 10. – С. 49–51.
137. Бахарев С.А. Повышение помехоустойчивости параметрического приемника звука // Измерительная техника. – М.: Госстандарт, 1997. – № 6. – С. 50–52.
138. Berktey H.O., Al-Temimi S.A. Parametric acoustic receiving arrays // JASA. – 1970. – Vol. 2. – № 13. – P. 67–88.
139. Berktey H.O., Muir T.G. Arrays of parametric receiving // JASA. – 1973. – Vol. 53. – № 5. – P.1377–1383.
140. Боббер Р. Гидроакустические измерения. – М.: Мир, 1974.
141. Буланов В.А., Полоничка В.Д. Эффективность параметрического преобразования акустических волн в приповерхностном слое моря, содержащем газовые пузырьки // Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 1990. – 37 С.
142. Буланов В.А. Акустика микронеоднородных жидкостей и методы акустической спектроскопии: дис. д-ра физ.-мат. наук. – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 1997.
143. Голдбери Т., Мюир Т. Обработка сигналов в нелинейной гидроакустике // Подводная акустика. – М.: Мир, 1984.
144. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука, 1966.
145. Кузнецов О.Л., Петухов А.В., Зорькин Л.Н и др. Физико-химические основы прямых поисков залежей нефти и газа. – М.: Недра, 1986.
146. Мюир Т. Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков // Подводная акустика. – М.: Мир, 1984.
147. Мясников Л.И., Мясникова Е.Н., Щучинский Я.М. Новые методы измерений в подводной акустике и радиотехнике. – Л.: Судостроение, 1978.
148. Управляемая параметрическая антенная решетка: пат. 3.882.444 США / Т.М. Робертсон, 1975.
149. Параметрический гидролокатор с гибридной несущей: пат. 3.870.988 США / В. Тернер, 1975.
150. Стародубцев П.А., Мироненко М.В. Становление метода гидролокации на проливном Дальнем Востоке // История науки и техники. – 2003. – № 5. – С. 9–14.
151. Стародубцев П.А. Концепция становления и перспективы развития проливной гидролокации // Техническая эксплуатация флота. Пути совершенствования: Сб. докл. рег. научно-практ. конф. «Море-2003». – Владивосток: МГУ имени адм. Г.И. Невельского, 2003. С. 104–108.
152. Багрянцева Н.А., Плахов Д.Д. Дифракция сферической звуковой волны на бесконечной цилиндрической оболочке // Акустический журнал. – 1974. – Т. 20. – № 5. – С. 673–679.
153. Коровин А.Н. Дифракция звука на широком экране // Акустический журнал. – 1976. – Т. 12. – № 4. – С. 40–45.
154. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Лукьянов М. М., Бахарев С.А. Основные характеристики гидроакустических методов обнаружения и классификации морских объ-

ектов // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб.ст. – Владивосток: МО РФ, ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 1997. – Вып. 14. – С. 45–52.

155. Стародубцев П.А., Мироненко М.В. Теоретическое обоснование основных направлений разработки математической модели формирования томографических образов подводных объектов. – СПб., 2002. – 128 С. – Деп. в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова 05.02.2002, № ДР-3842.

156. Мироненко М.В., Прядко В.В. О возможности использования метода низкочастотной гидроакустической подсветки среды для обнаружения воздушных целей // Научно-технический сборник. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 1989. – С. 24–28.

157. Стародубцев П.А., Бахарев С.А. Параметрический приёмник как элемент модуля системы подводного наблюдения // 38-я Межвузовская НТК: сб. докл. – Владивосток: ТОВВМУ, 1996. – Т. 3. С. 7–11.

158. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Юденко Н.Я. Параметрическая томография морских акваторий с низкочастотной подсветкой среды // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб. стат. – Владивосток: МО РФ, ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2001. – Вып. 32. – С. 276–281.

159. Стародубцев П.А. Результаты проведения натурных и экспериментальных исследований по основным элементам системы томографического мониторинга океанской среды. – СПб., 2002. – 117 С. – Деп. в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова 25.11.2002, № ДР-3877.

160. Гончаров В.В., Куртепов В.М. Успехи и проблемы акустической томографии океана // Акустические волны в океане; ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева. – М.: Наука, 1987. – С. 15–24.

161. Гончаров В.В., Куртепов В.М. Численные эксперименты по томографии океана // Акустика океанской среды; ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреева. – М.: Наука, 1989. – С. 107–115.

162. Стародубцев П.А., Мироненко М.В. Представление результатов обнаружения подводных объектов низкочастотным просветным методом в форме томографических образов. – СПб., 2001. – 64 С. – Деп. в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова 13.06.2001, № ДР-3811.

163. Бадажков Д.В. Сравнение некоторых алгоритмов трехмерной томографической реконструкции в задачах со спиральной траекторией источника излучения // 5-я Международная конференция «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии (РОАИ 5-2000)». – Самара, 2000. – 16–22 октября. – Том 3. – С. 454–457.

164. Касьянова С.Н., Трофимов О.Е. Формулы обращения для томографической реконструкции при использовании плоского детектора. Автометрия. – 2000. – № 3. – С. 32–45.

165. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Григорьев В.В. Акустическая голография и возможность ее применения в низкочастотной гидроакустической томографии океанской среды // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб. ст. – Владивосток: ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 1998. – Вып. 19. – С. 131–137.

166. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография: пер. с англ. под ред. Э.В. Житковской и Р.Ю. Поповой. – М.: Мир, 1980. – 580 с.

167. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография: пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 686 С.

168. Ломан А.В., Вайгельт Г.П. Восстановление изображений в астрономической интерферометрии // Оптические телескопы будущего: пер. с англ; под ред. В.П. Щеглова. – М.: Мир, 1981. – 397 С.
169. Стародубцев П.А. Теоретические и экспериментальные исследования возможности применения просветных сигналов в гидроакустической томографии. – СПб., 2003. – Ч. 2. – 120 С. – Деп. в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова 09.10.2003, № ДР-3909.
170. Стародубцев П.А., Стародубцев Е.П. Математическое обоснование параметров зондирующих сигналов для реализации бистатической локации в низкочастотной томографии // Электронный журнал «Радиоэлектроники». – 2003. – № 1. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/contents.html>.
171. Морозов В.А. О реставрации изображений с гарантированной точностью // Численный анализ на Фортране. М.: МГУ, 1979. С. 39–52.
172. Нежевенко Е.С., Спектор Б.И. Оптическое нелинейное преобразование изображений // Автометрия. – 1975. – № 3. – С. 98–103.
173. Троицкий И.Н. Статистическая теория томографии. – М.: Радио и связь, 1989. 265 С.
174. Троицкий И.Н. Компьютерная томографии. – М.: Знание, 1988. – 150 С.
175. Реконструктивная и вычислительная томография // ТИИЭР (Темат. выпуск). – 1983. – Т. 1, № 3.
176. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Петраченко С.П., Мироненко Т.А. Низкочастотная томографическая система мониторинга и контроля широкомасштабных морских акваторий // сб. докл. 9-й научной школы-семинара академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», 12-я сессией РАО. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 378–385.
177. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Василенко А.М. Обоснование теоретических подходов восстановления ореола подводных морских объектов при мониторинге акваторий методом низкочастотной томографии // 45-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция ДВО АН ВШ. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2002. – С. 145–148.
178. Стародубцев П.А., Мироненко М.В. Метод низкочастотной гидроакустической томографии и измерительная система контроля морских акваторий // Научный и общественно-политический журнал Президиума ДВО РАН «Вестник ДВО РАН». Владивосток. – Дальнаука, 2003. – № 1. С. 36–41.
179. Стародубцев П.А., Мироненко М.В. Метод и стационарная томографическая система мониторинга характеристик протяженных глубоководных морских акваторий // Региональная конференция по судовой радиоэлектронике: Владивосток: ДВГМА, 1998. – Ч. 3. – С. 141–148.
180. Стародубцев П.А. Математическое обоснование параметров сигналов бистатической локации для реализации низкочастотной томографии в гидроакустике // Проблемы транспорта Дальнего Востока: сб. матер. 5-й межд. Научно – практическая конференция – Владивосток: МГУ имени адмирала Г.И. Невельского, 2003. – С. 41–55.
181. Новые направления разработок низкочастотных гидроакустических излучателей // Гидроакустика за 20 лет: пер. с англ; под ред. Ю.Ф. Тарасюка. – Л.: Судостроение, 1975. – С. 161–166.
182. Стародубцев П.А., Шостак С.В., Богданов В.И. Об одном свойстве двумерного преобразования Фурье // 38-я Всерос. межвуз. научно-техн. конф.: Владивосток: МО РФ, ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 1995. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 193–197.

183. Стародубцев П.А., Богданов В.И. Метод восстановления линейного частотного модулированного сигнала // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ.: сб. ст. – Владивосток: МО РФ, ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 1995. – Вып. 6. – С. 69–71.
184. Стародубцев П.А. Теоретические и экспериментальные исследования возможности применения просветных сигналов в гидроакустической томографии // Проблемы транспорта Дальнего Востока: сб. матер. 5-й межд. научно-практ. конф. 1–3 октября 2003 г. – Владивосток: Россия, Дальневосточное отделение Российской академии транспорта; Администрация Приморского края; Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, 2003. – С. 346–356.
185. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 264 С.
186. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 С.
187. Клаудер, Прайс и др. Теория и расчет импульсных РЛС с частотной модуляцией // Зарубежная радиоэлектроника, 1961. – № 1.
188. Корн Г. А. Моделирование случайных процессов на аналоговых и аналого-цифровых машинах. – М.: Мир, 1968. – 316 С.
189. Стародубцев П.А. Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований рассеяния звуковых волн на стационарной трассе о. Сахалин – о. Итуруп // Наука делает мир лучшим: сб. матер. рег. научно-техн. конф. 19–20 ноября 2003 г. – Владивосток: Россия, МГУ им. адмирала Г.И. Невельского, 2003. – С. 11–14.
190. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Василенко А.М. Теоретические основы и перспективы развития морского приборостроения на Дальнем Востоке. – СПб., 2003. – 241 С. – Деп. в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова 16.05.03, № ДР-3893.
191. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Недорез Ю.И. Морское приборостроение для комплексного мониторинга Мирового океана // Экологические системы и приборы. Раздел «Экологический мониторинг». – 2003. – № 7. – С. 3–12.
192. Кейпон Дж. Пространственно-временной анализ с высоким разрешением // ТИИЭР. – Т. 57, № 8. – 1969. – С. 69–79.
193. Крон Б., Шерман Ч. Функции пространственной корреляции для различных моделей шума // Некоторые проблемы обнаружения сигнала, маскируемого флюктуационной помехой. – М.: Сов. радио, 1965. – С. 114–117.
194. Бархатов А.Н. Моделирование распространения звука в море. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 56 С.
195. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 296 С.
196. Бьерне Л. Неоднородности и нестабильность распространения звука под водой // Подводная акустика и обработка сигналов / под ред. Л. Бьерне; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – С. 32–42.
197. Вестон Д.Г. Рассеяние на неоднородностях // Подводная акустика и обработка сигналов / под ред. Л. Бьерне; пер. англ. – М.: Мир, 1985. – С. 95–115.
198. Стародубцев П.А. Теоретические и экспериментальные исследования возможности применения просветных сигналов в гидроакустической томографии. – С.Пб. 2003 – Ч. 1. – 263 С. – Деп. в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова 02.07.2003, № ДР-3899.
199. Горская Н.С., Раевский М.А. О многократном рассеянии низко-частотных акустических волн на поверхностном волнении // Акустический журнал – 1986. – Т. 32. – С. 165–171.

200. Горская Н.С., Раевский М.А. О связи статистических характеристик зондирующих акустических волн с параметрами ветрового волнения // *Акустический журнал* – 1987. – Т. 33, Вып. 3. – С. 463–468.
201. Клячкин В. И. О характеристических функционалах некоторых гидроакустических полей: тр. школы-семинара // 2-я Всесоюзная школа-семинар по гидроакустике. Новосибирск: Наука, 1971. С. 61–91.
202. Клещев А.А., Шейба Л.С. Рассеяние звуковой волны идеальными вытянутыми сфероидами // *Акустический журнал*. – 1970г. – Т. 26, № 2. – С. 264–268.
203. Стародубцев П.А., Василенко А.М. Обоснование теоретических предпосылок восстановления ореола подводных объектов при обработке информации в трактах гидроакустических систем мониторинга и контроля морских акваторий: сб. тр. XIII сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 710.
204. Стародубцев П.А. Результаты численного моделирования процесса получения томографического изображения ореола морского объекта с использованием алгоритма свертки и обратной проекции // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки (RU)*. / Южно-Российский государственный технический университет. – Новочеркасск, 2003. – С. 88–99.
205. Стародубцев П.А., Пичугин К.А., Василенко А.М. Применение сверточных методов обработки информации при построении томографических изображений полей морских объектов // 46-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания» / Дальневосточное отделение МАН ВШ. – Владивосток: ТОВМИ имени С.О. Макарова, 2003. – С. 185–188.
206. Стародубцев П.А. К вопросу автоматизации процесса распознавания подводных объектов в гидроакустической томографии // *Автометрия / Российская академия наук. Сибирское отделение*. – 2003. – Т. 39. – № 6. – С. 78–86.
207. Стародубцев П.А. Автоматизация процесса и синтеза изображений подводных объектов по отфильтрованным проекциям // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки (RU)*. / Южно-Российский государственный технический университет. – 2003. – № 3. – С. 21–24.
208. Стародубцев П.А., Стародубцев Е.П. Низкочастотная акустическая томография движущейся возмущенной области подводных объектов по методу согласованной невязимности / *Электронный журнал «Исследовано в России»*. – 2003 г. – С. 1314–1324.
209. Стародубцев П.А., Василенко А.М. Метод согласованной невязимности в низкочастотной акустической томографии: сб. тр. XIII сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 708–709.
210. Годин О.А., Михин Д.Ю., Мохов А.В. Акустическая томография океанских течений по методу согласованной невязимности // *Акустический журнал*. – 1996. – Т. 42, № 4. – С. 501–509.
211. Norton S. J. Tomographic reconstruction of two-dimensional vector fields: application to flow imaging // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1988. – V. 97. – P. 162–168.
212. Norton S. J. Reconstructing stratified fluid flow from reciprocal scattering measurements // *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991. – V. 89. – P. 2567–2572.
213. Андреева И.Б. и др. Акустические свойства плотных скоплений пелагических животных в океане // *Акустический журнал*. – 1994. – М. – Т. 40, № 1. – С. 9–16.
214. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Поляков Н.Ф. Дальнейшее обнаружение косяков рыбы и скоплений морских организмов быстро разворачиваемыми просветными систе-



мами // Региональная конференция по судовой радиоэлектронике: сб. ст. – Владивосток: ДВГМА, 1997. – Ч. 2. – С. 111–117.

215. Стародубцев П.А. Применение просветных акустических сигналов для обнаружения морских биологических объектов // Проблемы транспорта Дальнего Востока: сб. докл. 5-й межд. научно-практ. конф. – Владивосток: МГУ адм. Г.И. Невельского. – 2003. – С. 113–124.

216. Стародубцев П.А. Низкочастотный просветный метод в решении задач освоения биологических запасов и мониторинга морских акваторий // Проблемы транспорта Дальнего Востока: сб.матер. 5-й межд. научно-практ. конф. МГУ им. адм. Г.И. Невельского. – 2003. – С. 78–80.

217. Стародубцев П.А. Измерительные технологии акустического просветного метода гидролокации в решении задач мониторинга и освоения запасов морских акваторий // Инновации в рыбопереработке: сб. докл. региональн. науч. конф. – Владивосток: ДВГАЭУ, 2003. – С. 15–22.

218. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Бахарев С.А. Проблемы разработки метода низкочастотной акустической томографии морской среды и нетрадиционные пути их решения // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. – Владивосток: МО РФ, ТОВВМУ имени С.О. Макарова, 1998. – Вып. 16. – С. 17–21.

219. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Мироненко А.М. Метод низкочастотной гидроакустической томографии и измерительная система контроля морских акваторий: сб. тр. 11-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 7–10.

220. Стародубцев П.А. Измерительная система контроля морских акваторий на основе низкочастотной гидроакустической томографии // Инновации. Раздел «Биржа технологий и контактов». – 2003. – № 1. – С. 89–91.

221. Стародубцев П.А. Некогерентный процесс обработки гидроакустических сигналов в многоканальных просветных системах контроля морских акваторий // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки (RU) / Южно-Российский государственный технический университет. – 2003. – С. 33–36.

222. Стародубцев П.А. Некоторые теоретические подходы к процессу распознавания морских объектов в низкочастотной гидроакустической томографии // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб. ст. – Владивосток: МО РФ, ТОВМИ имени С.О. Макарова, 2003. – Вып. 44. – С. 135–143.

223. Стародубцев П.А. Распознавание морских объектов в низкочастотной гидроакустической томографии // Известия высших учебных заведений (вузов). Северо-Кавказский регион. Технические науки (RU) / Южно-Российский государственный технический университет. – 2003. – № 4. – С. 23–31.

224. Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Стародубцев Е.П. Стратегия разработки морской системы освещения обстановки в целях обеспечения экологической и экономической безопасности Дальневосточного региона // Экологические системы и приборы. – 2003. – № 12. – С. 15–21.

225. Гусев В.Г., Лоскутова Г.В. Об использовании алгоритма двумерного быстрого преобразования Фурье для обработки информации от линейной антенной решетки // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 12. – С. 2362–2366.

226. Кислов В.Я. и др. Корреляционные свойства шумоподобных сигналов, генерируемых системами с динамическим хаосом // Радиотехника и электроника. – 1997. – Том 42, № 11. – С. 1341–1349.

227. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртепов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И. Акустическая томография океана. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1997. – 254 С.
228. Распространение звука во флюктуирующем океане / под ред. Флатте; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 334 С.
229. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1985.
230. Булатов В.Н. Метод оценки погрешности определения фазового спектра кусочно-аппроксимированного сигнала // Вестник ОГУ. – 1999. – № 2. – С. 84–88.
231. Антенны / Научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Антенная секция. – М.: Связь, 1979. Вып. 27.
232. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Карачун Л.Э., Чудаков А.И. Гидроакустическая система прямого поиска залежей углеводородов на акваториях морского шельфа // II Всероссийская научно-техническая конференция «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана». – Новосибирск, 2012. – С. 187–194.
233. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Способ поиска месторождений углеводородов на морском шельфе. Пат. РФ. №2503036 от 27.12. 2013, СКБ САМИ ДВО РАН.
234. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Система поиска морских месторождений углеводородов. Пат. РФ. №2503977 от 10. 01.2014, СКБ САМИ ДВО РАН.
235. Короченцев В.И. Использование сверхдлинных электромагнитных волн и волн гравитационной природы для определения местопроисхождения цунами и землетрясений. / Материалы Всероссийской акустической конференции, декабрь, 1997.//Владивосток, Дальнаука, 1998. С. 214-221.
236. Короченцев В.И. Метод прогнозирования землетрясений. Применение этих методов в Японии. Издательский дом «Недра». 311 с. 1984.
237. Авербах В.С., Гердюков Н.Н., Диденкулов И.Н. и др. Исследование генерации сейсмических взрывных источников // Сборник Трудов II сессии РАО, М.:-ГЕОС. Т.2.2001. С. 64-84.
238. Ринемак Т. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1979.
239. Белавин Ю.С., Кадыков И.Ф., Соловьев С.Л.. Регистрация фаз Т в сигналах землетрясений в Северо-западной части Тихого океана. – М.: Вулканология и сейсмология, №1, 1980. С. 60-69..
240. Максимов Г.А., Меркулов М.Е. Разделение взрывов и землетрясений по различию энергии между различными типами волн // Сборник трудов II сессии РАО, М.:-ГЕОС. Т.2.2001. С.78-80.
241. Максимов Г.А. Распределение энергии между различными типами волн, излучаемых при подземном взрыве в однородной среде // Физика земли. 1996.№11. С. 31-48.
242. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Стародубцев П.А., Недорез Ю.И. Морское приборостроение комплексного мониторинга Мирового океана // Экологический мониторинг. "Экологические системы и приборы". – М.: ООО Научтехиздат, №7, 2003. С. 3-6.
243. Мироненко М.В., Стародубцев П.А. Стратегия разработки системы освещения морских акваторий в целях обеспечения экономической и экологической обстановки в ДВ регионе // Экологические системы и приборы. – М.: ООО Научтехиздат №12, 2003. С.12 – 21 .

244. Таболяков А.А., Малашенко, Мироненко М.В., Карачун Л.Э. Сейсмоакустический мониторинг Охотского региона с обоснованием метода прогнозирования // сильных землетрясений // Сборник трудов международной научной конференции, Владивосток, Дальнаука, 2004, С24-25.

245. Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана / Владивосток. ДВО РАН, 2005. – 192 С.

246. У Тон Иль, Таболяков А.А., Храмушин В.Н. Методические разработки прогноза сильных землетрясений гидроакустическими методами (использование сейсмогидроакустической локации местоположения очагов землетрясений) // журнал "Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана", вып.1, г. Владивосток, ДВО РАН. 2005, С.49-59.

247. Недорез Ю.И., Киян А.Е., Малашенко А.Е. Построение Дальневосточной системы наблюдения за морской обстановкой. //Журнал "Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана", вып.1, г. Владивосток, ДВО РАН, 2005. С.8-19.

248. Таболяков А.А., Карачун Л.Э., Мироненко М.В. Прогнозирование сильных землетрясений на основе измерения параметров акустических и сейсмических волн их предвестников // Материалы 24 Всероссийской межвузовской технической конференции "Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания", г. Владивосток, ТОВМИ, ДВО МАН ВШ, № 1, 2002. С. 155-158.

249. Мироненко М.В., Таболяков А.А., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Прогнозирование сильных землетрясений по измерениям их предвестников // Сборник трудов 13 сессии РАО. – М.: ГЕОС, т.2, 2003. С. 70-71.

250. Недорез Ю.И., Малашенко А.Е. Разработка интегрированной системы информационного сопровождения // журнал Вестник ДВО РАН № 1(113), 2004. С.11-14.

251. Батюшкин Г.Н, Генерация волн изгиба в неограниченной плите при воздействии импульсной нагрузки // Труды Всероссийского симпозиума «Сейсмоакустика переходных зон» . Дальнаука, ДВО РАН, Владивосток, 2004. С.67-64.

252. Долгих Г.И., Долгих С.Г. Лазерный нанобарограф и его измерение при излучении баро-деформационного воздействия. Физика Земли, №8, Дальнаука, ДВО РАН. Владивосток, 2011. С. 82-90.

253. Мироненко М.В, Таболяков А.А., Малашенко А.Е, Широкомас-штабный акустический мониторинг сейсмической обстановки в северо-западной части Тихого океана // Доклады на международной конференции «Научные мосты между Северной Америкой и Российским Дальним Востоком» (Сборник тезисов докладов). Владивосток: Дальнаука, 2004.-С. 25-27.

254. Малашенко А.Е., Перунов В.В., Карачун Л.Э., Малашенко А.А. Способ определения предвестника сильных землетрясений. Пат. RU 2 395 821 С2 от 244.04.2008.

255. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Корытко А.С. Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде. Пат. № 2 474 793 С1 от 15.06.2011.

256. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Корытко А.С. Гидроакустическая система параметрического приема волн различной физической природы в морской среде. Пат. RU 2 472 116 С1 от 15.06.2011.

257. Корченцев В.И., Городецкая Е.Ф., Никифоров Н.Ф., Золотарев А.В. Акустический и магнитный зонд для прогнозирования атмосферных возмущений и подземных землетрясений материалы международного симпозиума 15-17 апреля 1998 г. Токио, Япония, С.322-326.

258. Мироненко М.В., Долгих В.Н., Малашенко А.Е., Василенко А.М. Реализация просветного метода гидролокации с использованием случайных антенн в условиях мелководья // Юбилейный научно-технический сборник СКБ САМИ ДВО РАН, г. Ю-Сахалинск, 2003. С. 90-95.

259. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Киян Ю.В., Таболяков А.А. Просветный метод гидролокации, как новое научно-техническое направление гидроакустики // Научно-технич. сборник СКБ САМИ ДВО РАН, Ю-Сахалинск, 2003. С. 86-90.

260. Мироненко М.В., Долгих В.Н., Малашенко А.Е., Василенко А.М. Совместная реализация просветного метода гидролокации и случайных антенн на измерительном гидроакустическом полигоне // Научно-тех-ский сборник ТОВМИ, вып.39, 2003, Владивосток. С.22-30.

261. Мироненко М.В., Короченцев В.И., Малашенко А.Е. Закономерности взаимодействия упругих и электромагнитных волн в морской среде и их реализация в задачах прикладной гидроакустики // Юбилейный научно-технический сборник в/ч 90720, г. Владивосток, 2003. С. 36-40.

262. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Василенко А.М., Таболяков А.А. Параметрическая модель и реализация низкочастотного просветного метода гидролокации в условиях протяженного океанического волновода / 4 Всероссийский симпозиум "Сейсмоакустика переходных зон", Владивосток, ДВГУ, 2005. С. 206-210.

263. Малашенко А.Е., Недорез Ю.И., Таболяков А.А., Храмушин В.Н., Емельяненко В.Ф. Элементы системы освещения морской обстановки. Ю.Сахалинск, СКБ САМИ ДВО РАН, 2002.– 30 С.

264. Малашенко А.Е. Измерение дистанции между автономными донными гидроакустическими станциями в сети гидроакустической телеметрии // Международная НТК "Информатика и проблемы телекоммуникаций", Новосибирск, 25-26 апреля 2002. С. 135-138.

265. Малашенко А. Е. Оценка временной структуры сигналов и точности измерения взаимной дистанции между объектами в сети гидроакустической телеметрии / Новосибирск, Международная НТК АПЭП – 2002. С. 130-134.

266. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Шостак С.В. Некогерентная обработка гидроакустических сигналов в многоканальных просветных системах контроля морских акваторий // Научно-технический сборник ТОВМИ, вып.37, 2002, Владивосток, С. 56-60.

267. Шостак С.В., Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Сургаев И.Н. Обработка информации в многоканальных гидроакустических просветных системах // Сборник трудов 13 сессии РАО, т.2., ГЕОС, август 2003, С.28-32.

268. Карачун Л.Э., Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Таболяков А.А. Исследования характеристик внутренних волн океана с использованием пространственно-распределенных датчиков температуры // Сборник трудов 13 сессии РАО, т.2., ГЕОС, август 2003, С. 37-40.

269. Мироненко М.В., Киян Ю.В., Малашенко А.Е., Карчков А.В. Принципы формирования системы мониторинга и контроля Дальневосточного Региона / Научно-технический сборник ТОВМИ, вып.39, 2003, Владивосток, С.31-38.

270. Малашенко А.Е., Карчков А.В., Мироненко М.В., Василенко А.М. Оценка помехоустойчивости сигналов при обнаружении морских целей просветным методом гидролокации // Н.Тех. сборник ТОВМИ, вып.39, 2003, Владивосток, С.42-46.

271. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Недорез Ю.И., Стародубцев П.А. Морское приборостроение СКБ САМИ ДВО РАН для комплексного мониторинга Мирового океана // Журн. " Экологические системы и приборы". – М.: №7, 2010. С.90-94.

272. Мироненко М. В., Малашенко А.Е., Василенко А. М. Обоснование методических предпосылок и практических путей создания Региональной ДВ системы прогнозирования сильных землетрясений / Предварительный отчет о НИР, Владивосток, ТОВВМИ им. С. О. Макарова, 2006, 56 С.

273. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Научно-технические разработки просветной гидролокации в системах мониторинга полей различной физической природы // Датчики и системы. 2013. № 6. С. 34-37.

274. Малашенко А. Е., Мироненко М. В., Василенко А. М., Леоненков Р. В. Дальний параметрический прием и передача информационных волн в просветных гидроакустических системах контроля морских акваторий // Датчики и системы. 2013. № 11. С. 56-60.

275. М.В. Мироненко, А.М. Василенко, В.А. Пятакович. Основные разработки теории и практики нелинейной гидроакустики // Материалы 56-й Всероссийской научной конференции. Том V. Проблемы тактики военно-морского флота, военной истории, геополитики и военно-морской географии: сборник научных статей. – Владивосток: Филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н.Г. Кузнецова» (г. Владивосток), 201. С. 61-65.

276. М.В. Мироненко, А.М. Василенко, В.А. Пятакович, А.Е. Мала-шенко. Системы мониторинга морских акваторий на основе существующих и перспективных радиотехнических средств // Материалы 56-й Всероссийской научной конференции. Том V. Проблемы тактики военно-морского флота, военной истории, геополитики и военно-морской географии: сборник научных статей. – Владивосток: Филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н.Г. Кузнецова» 2013. – С. 21-25.

277. Л.Э.Карачун, М.В.Мироненко, С.В.Шостак. Научно-технические разработки нелинейной просветной гидроакустики и средств морского приборостроения в системах контроля и мониторинга полей морских акваторий

278. М.В. Мироненко, В.Я. Шилин. Результаты экспериментальных исследований структуры просветного гидроакустического поля за акустическими экранами // Тезисы докладов 22-й научной конференции. – Владивосток, 1975. – С. 158-160.

279. М.В. Мироненко, Карачун Л.Э., А.М. Василенко, В.А. Пятакович. Промышленное рыболовство на основе просветной гидролокации и средств морского приборостроения. С. 283-288.280.

280. М.В. Мироненко, А.Е. Малашенко, Л.Э. Карачун, А.С. Корытко. Способ передачи информационных волн в морской среде. Пат. RU № 2472236 С1. от 15.06.2011.

281. Бочков Г.Н., Горохов К.В. Полиспектральный анализ и синтез сигналов. Учебно-методический материал. Программа повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения информации и их применения». Нижний Новгород, 2007, 113 С.

282. Андреева И.Б. Физические основы распространения звука в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. 150 С.

283. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде: патент РФ № 2453930 от 20.06.2013.

284. Мироненко М.В. Физико-математические основы метода «гидролокации на просвет» // Сб. статей Всероссийской межвузовской НТК. – Владивосток. – ТОВВМУ им. С.О.Макарова, Вып.3, 1996. С. 88-92.

285. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде: патент РФ № 2452041 С1 от 11.10.2010.
286. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Способ параметрического приема волн различной физической природы в морской среде: патент РФ № 2452040 С1 от 11.10.2010.
287. Мироненко М.В., Карачун Л.Э., Василенко А.М., Пащенко А.Ю. Закономерности и измерительные технологии нелинейной просветной гидроакустики. // М. «1-я Всероссийская акустическая конференция, Акустика океана. 2014. С. 155-159.
288. А.М.Василенко, Л.Э.Карачун, М.В.Мироненко, Пащенко А.Ю., Информационно – аналитический комплекс радиогидроакустической системы контроля морской обстановки, мониторинга полей различной физической природы. // С.П-рг. 12-я Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2014. – С. 180-185.
289. Новиков В.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации // Л. «Судоостроение». 1990. 256 С.
290. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю. и др. Акустическая томография океана // Н. Новгород. 1997. 255С. 1. Перспективные телекоммуникационные технологии / под редакцией Л.Д. Реймана и Л.Е. Варакина/ – 2001 г.
291. CDMA: прошлое, настоящее, будущее /под редакцией Л.Е. Варакина и Ю.С. Шинова и др./ – 2003 г.
292. Вопросы орбитального построения для Российской региональной системы персональной спутниковой связи. – 2000 г.
293. Отчёт по НИР ФГУП «НИИР» – Основные положения Концепции российской персональной спутниковой связи (НИР «РСПСС») – 2000 г.
294. Системы спутниковой связи – основы структурно-параметрической теории и эффективность / А.И. Аболищ под общей редакцией Ю.Б. Зубарева/ – 2004 г.
295. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович, – 2005 г.
296. Концепция комплексной безопасности сил и средств флота / Постановление Президента РФ от 30 сентября 2008 года №731.-М.,2008.-49 С.
297. Ставская Н.Р. Философские вопросы развития современной науки: социологические и методологические проблемы интеграции наук. – М.: Высшая школа, 1974. – 246 С.
298. О Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года / Распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2010 года №2205-р. – М., 46 С.
299. ФЗ «О безопасности» №390-ФЗ от 28 декабря 2010 года.
300. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Институт стратегической стабильности РАН. – М.: «Красная звезда», 2005.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ</b>	
1.1. Обзор методов гидролокации полей морских объектов.....	19
1.2. Пространственная структура поля, рассеянного на акустических экранах.....	21
1.3. Сравнительный анализ характеристик классических параметрических приемоизлучающих средств и просветной системы гидролокации.....	30
1.4. Нелинейное взаимодействие волн различной физической природы в морской среде.....	35
1.5. Фазовая обработка сигналов в просветных параметрических системах мониторинга гидрофизических полей.....	37
1.6. Использование закономерностей взаимодействия акустических и электромагнитных волн в параметрических системах.....	41
1.7. Результаты морских испытаний макетов параметрических систем. Рекомендации по формированию стационарной просветной системы мониторинга гидрофизических полей.....	45
1.8. Акустический мониторинг биологических запасов просветными гидроакустическими системами.....	49
1.9. Просветная параметрическая система комплексного мониторинга гидрофизических морских полей с применением фазового метода приема и обработки сигналов.....	55
1.10. Совместная реализация низкочастотных методов просветной и бистатической гидролокации в системах мониторинга протяженных морских акваторий.....	59
<b>2. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ РЕВЕРБЕРАЦИОННАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ГИДРОЛОКАЦИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ</b>	
2.1. Параметрическая приемная антенна классического типа.....	63
2.2. Параметрическая приемная антенна локационного типа.....	68
2.3. Обработка гидроакустических сигналов в трактах ГАС с параметрическими приемными антеннами.....	71
2.4. Методы повышения эффективности параметрических приемных антенн.....	75
<b>3. РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ПРИЕМНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ</b>	
3.1. Реверберация при непрерывном излучении высокочастотного сигнала накачки.....	78
3.2. Нелинейность морской среды и ее влияние на эффективность параметрических приемных антенн.....	80
3.3. Физико-математическая модель реверберационной параметрической приемной антенны.....	83

3.4. Методы повышения эффективности применения реверберационной приемной параметрической антенны.....	90
<b>4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН</b>	
4.1. Общая методика проведения исследований.....	99
4.2. Результаты исследований характеристик реверберации морской среды при непрерывном излучении высокочастотного сигнала.....	100
4.3. Экспериментальная оценка влияния гидрофизических характеристик среды на эффективность нелинейного взаимодействия волн.....	107
4.4. Направленность и помехоустойчивость параметрических приемных антенн.....	113
4.5. Дальность действия гидроакустического средства с реверберационной приемной параметрической антенной.....	123
<b>5. МОНИТОРИНГ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ИСТОЧНИКОВ МОРСКОГО ДНА</b>	
5.1. История морской геофизики в России.....	128
5.2. Направления совершенствования морской сейсморазведки.....	131
5.3. Способ и параметрическая система приема геофизических полей источников морского дна.....	135
<b>6. ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН</b>	
6.1. Информационно-аналитическая система расчета параметров гидроакустического поля.....	144
6.2. Влияние вихря на формирование структуры акустического поля и условия приема сигналов.....	152
6.3. Импульсная передаточная характеристика среды и ее реализация в решении задачи «обращенного фазового фронта волны».....	156
6.4. Оценка погрешности координат источника путем решения обратной лучевой задачи.....	158
6.5. Горизонтальная рефракция акустических волн в шельфовой зоне.....	162
6.6. Амплитудно-фазовая структура акустического поля в протяженном океанском волноводе с переменными характеристиками среды.....	167
<b>7. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ В ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОСВЕТНЫХ СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА</b>	
7.1. Выбор характеристик зондирующих сигналов.....	172
7.2. Рассеяние акустических волн при распространении в океанском волноводе.....	185
<b>8. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОСВЕТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ И СРЕДЫ</b>	
8.1. Основные понятия и определения акустической томографии.....	193
8.2. Особенности решения задач активно-пассивной томографии.....	194



8.3. Методы акустической томографии.....	199
8.3.1. Обобщенные характеристики методов реконструкции пространственных образов мелкомасштабных неоднородностей морской среды.....	201
8.3.2. Дифракционные методы акустической томографии.....	205
8.4. Дифракционные методы томографии в однородной безграничной морской среде.....	206
8.5. Особенности дифракционных методов акустической томографии неоднородностей поля скорости звука в океанском волноводе.....	209
8.6. Квазидифракционный метод реконструкции возмущений морской среды, сформированных движущимся подводным объектом.....	215
8.6.1. Специфика перебора проекций в квазидифракционном методе.....	221
8.6.2. Обратная свертка совокупности просветных сигналов, принятых на горизонтально разнесенные приемные элементы измерительной томографической системы.....	222
8.6.3. Разделение пространственно-частотных спектров возмущений морской среды путем расчета их энергетических спектров.....	226
8.6.4. Измерение и реализация фазового спектра сигналов в просветных томографических системах.....	235
8.6.5. Оценка погрешности определения фазового спектра.....	237
8.6.6. Совокупность информационных признаков построения томографических образов с использованием рассеянного просветного акустического поля.....	245
8.7. Просветный метод гидролокации в решении задач томографического контроля характеристик полей морской среды.....	252

## **9. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПУТЕЙ ПОСТРОЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

9.1. Историческая справка о сейсмических исследованиях на акваториях Дальневосточных морей.....	258
9.2. Широкомасштабные наблюдения синоптических и сейсмических процессов морской среды на просветном поле.....	260
9.3. Исследования закономерностей зарождения и прохождения землетрясений с использованием гидроакустических средств.....	262
9.4. Наблюдение сейсмических полей и прогнозирование землетрясений с использованием донных гидроакустических систем.....	270
9.5. Экспериментальные исследования в рамках задач Министерства по чрезвычайным ситуациям.....	271
9.6. Методические предпосылки прогнозирования сильных землетрясений по измерениям их предвестников.....	273
9.7. Анализ материалов, экспериментальных исследований сейсмической обстановки в южной части Охотского моря.....	275
9.8. Регистрация сигналов землетрясений донными станциями, оснащенными акустическими приемниками.....	278

9.9. Прогнозирование времени вступления опасных явлений по измерениям электромагнитных волн, формируемых в очаге землетрясения.....	285
9.10. Прогнозирование сильных землетрясений по признакам проявления электромагнитных волн в атмосфере.....	291

**10. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, ИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕАЛИЗАЦИЯ В СОЗДАНИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПОЛЕЙ АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА И ЗЕМНОЙ КОРЫ**

10.1. Глубоководные донные автономные станции в системе мониторинга полей морских акваторий.....	294
10.2. Метрологическое обеспечение систем ГДАС серии «МОНИТОР».....	309
10.3. Звукопрозрачная приемная гидроакустическая антенна, ее технические и измерительные характеристики и результаты испытаний.....	313
10.4. Структура, схемные и конструктивные решения создания автономного радиотехнического модуля космической связи.....	321

**11. ФОРМИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРОСВЕТНОЙ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПРОТЯЖЕННОМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН**

11.1. Анализ разработок в создании параметрических акустических систем.....	334
11.2. Формирование просветных параметрических антенн в многолучевом канале распространения акустических волн.....	337
11.3. Организационные и научно-технические пути создания Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения обстановки, комплексного мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры на основе разработок измерительного поля.....	339
11.4. Результаты испытаний экспериментальных радиогидроакустических систем мониторинга полей атмосферы, океана и земной коры.....	345
11.5. Нелинейная просветная гидроакустика в создании радиогидроакустических систем контроля сейсмической и синоптической обстановки на протяженных морских акваториях.....	352

**12. РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН, ОБОРУДОВАННЫЙ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ ОХОТСКОГО И ЯПОНСКОГО МОРЕЙ**

12.1. Создание и эксплуатации полигона для исследования гидрофизических и геофизических полей морской среды и объектов.....	361
---	-----

12.2. Широкомасштабный акустический эксперимент по измерению гидродинамических возмущений морской среды, сформированных гидрофизическими полями морских судов.....	364
12.3. Основные тактико-технические требования к просветной системе мониторинга для ее использования как широкомасштабной радиогидроакустической.....	366
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>369</b>
<b>СПИСОК ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>379</b>

Научное издание

**Мироненко** Михаил Владимирович  
**Малашенко** Анатолий Емельянович  
**Василенко** Анна Михайловна и др.

**НЕЛИНЕЙНАЯ ПРОСВЕТНАЯ ГИДРОАКУСТИКА  
И СРЕДСТВА МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
В СОЗДАНИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ  
РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА  
И ЗЕМНОЙ КОРЫ, МОНИТОРИНГА ИХ ПОЛЕЙ  
РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ**

*Монография*

В авторской редакции  
Дизайн и верстка *Е.А. Прудкогляд*

Подписано в печать 09.10.2014  
Формат 60x84/8. Усл. печ. л. 46,97. Уч.-изд. л. 39,01  
Тираж 500 экз. Заказ

Издательство Дальневосточного университета  
690091, г. Владивосток, ул. Фонтанная, 47

Отпечатано в типографии  
Дирекции публикационной деятельности ДВФУ  
690990, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10.