

КУДРЯВЦЕВ В.И.

**ГИДРОАКУСТИКА
РЫБОХОЗЯЙСТВЕННАЯ**

**МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО ВНИРО
2018**

УДК 681.883 : 639.2/3
К88

Рецензенты: д.б.н. **Бизиков В.А.**, д.т.н. **Кручинин О.Н.**, д.т.н. **Кузнецов Ю.А.**

Кудрявцев В.И.

К88 Гидроакустика рыбохозяйственная. — М.: Изд-во ВНИРО, 2018. — 460 с.

ISBN 978-5-85382-470-6

Рассматриваются вопросы построения устройств и приборов рыбохозяйственной гидроакустики и их применение.

УДК 681.883 : 639.2/3

ISBN 978-5-85382-470-6

© Издательство ВНИРО, 2018
© ФГБНУ «ВНИРО», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ	7
Глава 1. Акустические колебания	7
1.1. Свойства акустических колебаний в водной среде	7
1.2. Общие принципы распространения акустических колебаний в однородных и неоднородных средах.	10
1.3. Физические величины, характеризующие акустическую волну.	12
1.4. Скорость звука в воде.	17
1.5. Потери при распространении звука в водной среде	19
Глава 2. Основные явления, связанные с распространением акустических волн	30
2.1. Суперпозиция акустических колебаний.	30
2.3. Прохождение акустических волн через промежуточный слой	37
2.4. Дифракция акустических волн. Зона акустической тени	40
Глава 3. Распространение акустических колебаний в море	41
3.1. Рефракция акустических волн	41
3.2. Подводный звуковой канал	46
3.3. Фактор аномалии	46
3.4. Эффект Доплера.	47
Глава 4. Рассеяние звука рыбой и обнаружение эхосигналов от промысловых объектов . .	50
4.1. Характеристики отражательных свойств морских животных	50
4.2. Рассеяние звука единичными объектами	52
4.3. Рассеяние акустических колебаний скоплениями водных биологических объектов . .	67
РАЗДЕЛ 2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ, РАБОТЫ, УСТРОЙСТВО, РАБОТА И ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ	73
Глава 5. Гидроакустические преобразователи	77
5.1. Направленное действие акустических преобразователей	79
5.2. Коэффициент осевой концентрации или коэффициент направленности гидроакустических преобразователей.	87
Глава 6. Гидроакустические антенны	89
6.1. Электронное управление положением характеристик направленности гидроакустических антенн.	96
6.2. Регулирование характеристики направленности	109

Глава 7. Реверберация моря	118
Глава 8. Шумовые помехи	125
Глава 9. Уравнения гидроакустической локационной аппаратуры.	129
9.1. Методы измерения силы цели.	135
9.2. Обнаружение сигнала в шумах и реверберации, порог обнаружения	136
Глава 10. Основные типы технических средств рыбохозяйственной гидроакустики	143
10.1. Средства рыбохозяйственной гидроакустики активной эхолокации	143
10.2. Типичные совокупности эхосигналов, наблюдаемых на экранах дисплеев средств рыбохозяйственной гидроакустики.	145
10.3. Основные типы рыбохозяйственной эхолокационной аппаратуры.	150
10.4. Рыбопоисковые приборы вертикальной активной локации	150
10.5. Рыбопоисковые гидролокаторы	154
10.6. Эхолокаторы с буксируемыми антеннами	169
10.7. Основные тактико-технические параметры и характеристики эхолокационной аппаратуры горизонтального и вертикального действия	171
10.8. Принципы построения и работы устройств и способов повышения эффективности рыбопоисковой эхолокационной аппаратуры	193
10.9. Использование сложных сигналов	205
10.10. Гидроакустическая эхолокационная аппаратура бокового и траверзного обзора	212
10.11. Рыбоэхолокаторы с радиоканалами передачи гидроакустической эхолокационной информации	221
10.12. Телеметрическая аппаратура контроля параметров орудий рыболовства и обстановки в зоне их действия	225
10.13. Доплеровские гидроакустические системы активной локации.	252
10.14. Гидроакустические системы распознавания и классификации дна	253
10.15. Гидроакустические средства пассивной локации гидробионтов.	256
10.16. Биотелеметрические гидроакустические системы	258
10.17. Гидроакустические средства управления поведением гидробионтов	260
РАЗДЕЛ 3.	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ	263
Глава 11. Применение гидроакустической рыбоэхолокационной аппаратуры при поиске рыбы	263
11.1. Формы распределения промысловых объектов и их регистрация гидроакустическими приборами.	264
11.2. Поиск рыбы при вертикальном лоцировании	273
11.3. Поиск рыбы при горизонтальном и наклонном лоцировании	290
11.4. Возможности дальнего обнаружения	316
Глава 12. Использование средств рыбохозяйственной гидроакустики при облове обнаруженных скоплений	325
12.1. Применение гидроакустической аппаратуры при облове рыбы кошельковыми неводами	325

Глава 13. Применение технических средств и методов гидроакустики при рыбохозяйственных исследованиях.	337
13.1. Гидроакустическая количественная оценка состояния запасов рыб и других гидробионтов	337
13.2. Калибровка гидроакустической аппаратуры при количественной оценке	340
13.2.1. Калибровка с помощью образцовой цели	342
13.3. Гидроакустические съемки.	351
13.4. Совершенствование гидроакустического метода количественной оценки промысловых объектов	374
13.5. Гидроакустическая размерная классификация рыб и других водных объектов .	374
13.6. Гидроакустическая видовая оценка рыб и других водных объектов	377
13.7. Перспективные направления применения гидроакустики при оценке состояния запасов промысловых рыб и других объектов лова.	412
13.8. Использование гидроакустической информации промысловых судов	412
13.9. Применение современной (многоканальной) гидроакустической аппаратуры и программ обработки эхосигналов (эхограмм).	418
13.10. Использование (применение) современных средств гидроакустики при ихтиологических и других рыбохозяйственных исследованиях.	431
Заключение	436
Литература	437

ВВЕДЕНИЕ

Гидроакустика рыбохозяйственная – наиболее обширное по масштабам практического использования направление гидроакустики, охватывающее вопросы (проблемы) применения подводной акустики и ее технических средств для широкого круга задач рыбной отрасли. В настоящее время выпускается и все более широко применяется при решении самых различных вопросов рыбного хозяйства и промышленного рыболовства весьма обширная номенклатура гидроакустической аппаратуры.

Первые исследования по использованию гидроакустики для обнаружения рыбы, выполненные в первой половине прошлого века, способствовали началу развития указанного направления. Более широкое его совершенствование происходило в 50–60-е гг. и постоянно продолжается.

Как и в других областях, бурное развитие в последние десятилетия микроэлектроники и связанных с этим, соответственно, средств отображения, накопления и хранения гидроакустической информации привело к серьезным совершенствованиям в рыбохозяйственной гидроакустике, в том числе к значительному облегчению её оперативного восприятия и оценки пользователем.

Использовавшиеся десятилетиями так называемые самопишущие регистраторы-самописцы с записью отметок эхосигналов на бумажных носителях ушли в прошлое – заменены электронными дисплейными системами визуализации акустической информации с ее запоминанием и сохранением.

Современная рыбохозяйственная аппаратура и системы стали более сложными в техническом отношении, но и более информативными. На рыбопромысловых судах устанавливается все большее количество различных типов гидроакустических средств обеспечения эффективного лова и качественных исследований. Однако подготовка судоводителей рыболовных судов, специалистов промышленного рыболовства и студентов учебных заведений проводится по устаревшей учебной литературе.

В то же время максимальный эффект от применения гидроакустической техники может быть получен лишь при знании и понимании физических основ ее действия, принципов построения, устройства и работы различных типов аппаратуры, ее узлов и блоков, влияния характеристик среды, в которой распространяются акустические колебания, на ее практические возможности при различных условиях использования, учете акустических параметров водной среды в районе ее работы как во время промысла объектов лова, так и при рыбохозяйственных исследованиях.

В работе выполнен анализ современного состояния средств рыбохозяйственной гидроакустики, их возможностей в реальных условиях промыслового применения, при самых различных исследовательских работах в рыбном хозяйстве. Монография является естественным продолжением подготовленных мною и выпущенных в 70-х гг. монографий по рыбной акустике «Телеметрическая аппаратура контроля параметров орудий промысла», «Промысловая гидроакустика и рыболокация», «Использование гидроакустики в рыбном хозяйстве».

Она включает три раздела: «Физические основы современной рыбохозяйственной гидроакустики», «Принципы построения, работы, устройство, работа и характеристики средств рыбохозяйственной гидроакустической аппаратуры», «Использование средств рыбохозяйственной гидроакустики» и тринадцать глав.

При подготовке монографии основное внимание уделялось изложению наиболее полезной для пользователей аппаратуры физической сущности происходящих процессов и явлений без использования сложного математического аппарата.

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

ГЛАВА 1. АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

1.1. СВОЙСТВА АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Акустические колебания в воде, как и в любой другой среде, по своей природе являются механическими колебаниями. Соответственно, акустическая волна в воде — это процесс распространения в ней механических возмущений. Распространение акустических колебаний становится возможным благодаря наличию упругих связей между частицами среды. Только упругая среда может быть носителем акустических колебаний. Невозмущенному, стационарному, равновесному состоянию любого вещества соответствует некоторая средняя плотность частиц, зависящая как от свойств этого вещества, так и от внешних условий, в частности, от давления.

Воде, как всякой жидкости, частично присущи свойства газа и твердого тела. В жидкости в отличие от газообразной среды молекулы расположены близко друг к другу. В газах межмолекулярное расстояние в несколько раз превышает размеры молекулы. Молекулы невозмущенной жидкости находятся в термодинамическом равновесии, в случае нарушения которого они приходят в колебательное движение и перемещаются относительно положения покоя на расстояние порядка размера молекулы.

При распространении акустической волны характер передачи колебательного движения от частицы к частице среды имеет свои особенности в связи с особенностями упругих связей между частицами различных по физическим свойствам сред. Так, в газах и жидкостях практически отсутствуют упругие связи между частицами при сдвиге слоев частиц одних относительно других (отсутствуют упругие деформации сдвига), но четко прослеживаются упругие связи при сближении или удалении слоев частиц (упругие деформации сжатия-растяжения). Из этого следует, что в жидкостях и газах могут распространяться такие акустические волны, при которых колебания частиц происходят вдоль направления распространения волны.

Как известно, жидкости свойственно внутреннее давление, обусловленное тем, что молекулы, расположенные у ее поверхности, испытывают большее притяжение со стороны соседних родственных молекул, чем со стороны молекул газа, граничащего с жидкостью.

Под влиянием этих сил притяжения верхний слой молекул смещается внутрь, вызывая тем самым появление упругих сил (сил отталкивания), уравнивающих силы притяжения. Силы отталкивания для воды составляют приблизительно 1 717 000 кПа. Наличием такого большого внутреннего давления и объясняется малая сжимаемость воды, на которую, однако, существенно влияют растворенные в воде соли.

Плотность жидких и твердых тел очень мало меняется при изменении давления, т. к. их внутренние упругие силы весьма стойко сопротивляются внешнему воздействию, стремящемуся уменьшить или увеличить объем, занимаемый массой вещества. Это сопротивление настолько велико, что жидкости (в т. ч. воду) и твердые тела можно считать несжимаемыми. Это упрощает решение многих механических задач. Однако даже очень малые изменения плотности жидких и твердых сред, обусловленные изменением давления, в акустике и, соответственно, в гидроакустике, играют первостепенную роль

и ими пренебрегать нельзя, так как в противном случае будет потеряно само явление — распространение акустических колебаний.

В жидкостях практически единственной формой упругих сил являются силы объемной упругости. Количественной мерой упругих сил являются модули упругости. В частности, упругость водной среды характеризуется модулем объемной упругости E , представляющим собой коэффициент пропорциональности между величиной всесторонне действующего внешнего давления p и относительного изменения объема $V/\Delta V$.

$$E = pV/\Delta V \quad (1.1)$$

Величина, обратная модулю объемной упругости, называется коэффициентом сжимаемости $k = 1/E$, характеризующим относительное изменение объема среды, приходящееся на единицу приращения давления. Если приращение давления положительное (мгновенное давление возросло), то приращение объема должно быть отрицательным (мгновенный объем уменьшается). При распространении акустических волн малой амплитуды их давление пропорционально относительному изменению плотности среды. Чем меньше коэффициент сжимаемости (чем более упруга среда), тем большее акустическое значение соответствует заданному относительному изменению плотности среды.

В стационарном состоянии все элементы водной среды находятся под некоторым постоянным давлением, называемым статическим (в воде — гидростатическим). У ее поверхности статическое давление равно атмосферному; оно возрастает по мере увеличения глубины, т. к. к атмосферному давлению добавляется гидростатическое давление вышележащих слоев воды. Давление слоя воды толщиной 10 м примерно равно атмосферному и, следовательно, на глубине порядка 2 км статическое давление в 200 раз больше атмосферного.

Если внешняя сила вызвала сжатие одного из элементов (слоев) упругой среды (воды) и, соответственно, смещение его частиц¹ (из которых состоит элемент), приведшее к небольшому увеличению плотности, то в этом элементе появилось малое избыточное давление. Благодаря силам упругости смещение частиц, а, следовательно, и давление с некоторым запозданием (вследствие инерционности, свойственной частицам упругой среды) будут переданы следующему соседнему элементу среды. Упругие силы, возникшие при деформации соседнего элемента, остановят частицы в исходном элементе, которые вернутся в первоначальное невозмущенное состояние. В результате окажется, что исходный элемент вернулся в исходное недеформированное состояние, а следующий, соседний элемент сжался. Аналогично возбуждаются последующие элементы, а возбужденные ранее возвращаются к исходному состоянию равновесия. Возмущение распространяется в среде, последовательно проходя участки, все более и более удаленные от начальной точки.

Возбуждение акустического колебания в водной среде может быть выполнено различными способами. В наиболее распространенном случае в воду в качестве источника акустических колебаний помещается твердое тело, поверхность которого совершает механические колебания чаще всего вследствие периодической деформации. Колебания поверхности твердого тела периодически вызывают в окружающей среде сгущения и разрежения, т. е. малые изменения плотности и давления. Состояния сгущения и разрежения последовательно передаются от одного слоя среды к другому. Такой процесс называется распространением акустической волны или акустической волной, а давление, избыточное по отношению к статическому (независимо от знака), — акустическим давлением. В большинстве случаев акустическое давление много меньше статического, поэтому акустическую волну можно рассматривать как малое возмущение. Если акустическое давление

¹ Частица среды — это любой мысленно выделенный участок среды, малый по сравнению с расстоянием, на котором состояние среды существенно изменяется (например, по сравнению с длиной волны акустических колебаний).

по величине приближается к статическому, то процесс существенно усложняется, имеет место нелинейное взаимодействие акустических волн. Проводились работы по использованию эффектов нелинейной гидроакустики при решении рыбохозяйственных задач. Были получены положительные результаты при натурных испытаниях опытного образца параметрического тракта аппаратуры «Пескарь» по обнаружению рыбы в мелководных водоемах (в т. ч. благодаря практическому отсутствию боковых лепестков) [Тимошенко, Кудрявцев, 1981; Сидько и др. 1987; Kudryavtsev, Tarasov, Timoshenko, 1987; Кудрявцев, 2013].

При распространении акустической волны в воде из-за отсутствия сдвиговой упругости смещение частиц происходит только вдоль линии распространения волны (такая волна называется продольной). При этом различают два совершенно разных явления: движение частиц среды в волне и перемещение самой упругой волны в среде. Первое явление – это движение частиц как материальных точек; второе – передача (переход) возмущенного состояния среды с одних частиц на другие. Так, величина смещения и скорость частицы в волне зависят от силы акустических колебаний. Эти величины в акустической волне, как правило, очень малы².

После прохождения волны каждая частица практически остается в исходном положении. Волна же удаляется по среде от места возникновения, скорость ее велика и зависит не от силы акустических колебаний, а от свойств среды. Чем больше упругость среды, тем выше упругие напряжения, возникающие в среде при данной деформации, и чем быстрее передается возмущение от частицы к частице, тем больше скорость акустических колебаний. Чем больше плотность, тем медленнее частицы приобретают скорость при действии данных упругих напряжений, тем меньше скорость акустических колебаний. Акустические волны отсутствуют, если сила, действующая на среду, постоянна. При распространении волн в упругой среде отдельные частицы ее не перемещаются в пространстве вместе с волнами, а только колеблются около своих положений равновесия. Среда, участвующая в колебательном процессе, в целом остается неподвижной. Пространство, в котором распространяются акустические волны, называется акустическим полем. Колебания частиц материальной среды можно уподобить колебаниям поплавка на поверхности воды – поплавок колеблется вверх-вниз, но не перемещается вместе с волной, которая постепенно удаляется. При отсутствии препятствий волна может распространяться сколь угодно далеко, а частицы среды будут оставаться на одном и том же месте, совершая колебания в определенном порядке – каждая частица отстает в своем движении от соседней. Именно последовательность таких движений и образует волновое движение.

Скорость, с которой частица колеблется в акустическом поле относительно положения своего равновесия называется колебательной скоростью, скорость передачи колебательного состояния в среде – скоростью распространения волны, а положение колеблющейся частицы по отношению к положению ее равновесия – фазой колебания. Поверхность, обладающая тем свойством, что все частицы, расположенные на ней, имеют одинаковые фазы колебаний, является волновой поверхностью. Ее форма зависит от свойств источника колебаний (его конфигурации, типа колебаний и т. п.) и от характера среды, в которой распространяются эти колебания (неоднородная, однородная, безграничная, ограниченная различными препятствиями и т. д.). Геометрическое место точек, до которых к некоторому моменту дошло колебание, называется фронтом волны и является частным случаем волновой поверхности, направления, по которым распространяются акустические колебания от их источника, – акустическими лучами.

² Представляет интерес величина колебательных смещений, необходимых для создания определенных интенсивностей акустических колебаний. Амплитуда смещения, превышающая длину волны видимого света только примерно в 3 раза, создает довольно большую интенсивность. Малая интенсивность соответствует смещениям, меньшим, чем межатомные расстояния.

В изотропной среде, обладающей одинаковыми свойствами во всех направлениях, эти лучи перпендикулярны к волновым поверхностям.

Расстояние, на которое распространяется волна за время, соответствующее одному периоду колебания T , называется длиной волны λ .

1.2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ОДНОРОДНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Скорость, с которой происходит передача колебательного движения от частицы к частице среды или возмущенного состояния от точки к точке среды, называется скоростью распространения акустической волны. В однородной изотропной среде акустические волны распространяются прямолинейно и с постоянной скоростью c , не зависящей от направления распространения. В поглощающей среде она является комплекс-

ной величиной c^* и для жидкости может быть записана как $c^* = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$, действительная

часть скорости определяется действительной частью модуля объемной упругости K :

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (1.2)$$

где ρ — равновесное (среднее) значение плотности среды.

Формула (1.2) справедлива при условии, что избыточное давление p является небольшим (малым) по сравнению со статическим давлением. Величину c приближенно можно считать независимой ни от амплитуды акустических колебаний, ни от частоты. Для морской воды коэффициент сжимаемости составляет примерно $4,4 \cdot 10^{-10}$ м·с²/кг, а плотность ее в среднем равна 1000 кг/м³. Поэтому и скорость акустических колебаний в морской воде равна 1500 м/с. В зависимости от температуры, давления и др. она может быть на несколько десятков метров в секунду больше или меньше. В воздухе при температуре 0 °С и нормальном давлении коэффициент сжимаемости равен $6,5 \cdot 10^{-6}$ мс²/кг, а плотность воздуха около 1,29 кг/м³. Поэтому скорость звука в воздухе равна 340 м/с.

Можно привести еще некоторые значения скоростей распространения акустических колебаний: сталь — 5850 м/с ($r_0 = 7800$ кг/м³), алюминий — 6260 (при $r_0 = 2700$), лед — 3980 (при $r_0 = 900$), вода пресная — 1485 (при T °С = 20, $r_0 = 1485$), вода морская — 1516 (при T °С = 20, $r_0 = 1021$), спирт — 1123 (при T °С = 20, $r_0 = 792$), кислород — 328 (при T °С = 20, $r_0 = 1,33$).

Акустические колебания могут быть периодическими и непериодическими. Два или несколько колебаний, имеющих одинаковый период, могут различаться между собой фазами колебаний; в таких случаях говорят, что данное колебание имеет сдвиг фазы относительно другого или других колебаний.

При изменении расстояния r на длину волны фаза процесса изменяется на 2π , так как $\varphi = 2\pi r/\lambda$.

Величина $2\pi/\lambda = \omega/c = k$ называется волновым числом, которое равно сдвигу фаз на единицу расстояния. Коэффициент k имеет размерность м⁻¹ и является строго определенным для данной волны с численным значением, целиком определяемым длиной волны. Он указывает на число длин волн, которое укладывается по длине окружности единичного радиуса. В физическом смысле о волновом числе можно говорить как о величине, численное значение которой дает приращение фазы волны, приходящееся на единицу пройденного волной расстояния. Волновое число можно рассматривать и как функцию круговой частоты и скорости акустических колебаний.

Самым простым типом акустической волны является плоская волна, которая может быть создана колеблющейся поверхностью бесконечно больших размеров и распространяется только в одном направлении. Лучи плоской волны всегда идут параллельно

друг другу, ее волновые поверхности — это плоскости, перпендикулярные лучам. В реальных ситуациях с реальными источниками колебаний волна никогда не бывает плоской и на больших расстояниях от любого источника акустические волны можно рассматривать как расходящиеся из одной точки.

В изотропной среде скорость звука одинакова во всех точках и, следовательно, передний фронт акустической волны, волновой фронт, представляет собой участок сферической поверхности. Радиус r этих поверхностей будет равен ct , где t — время, прошедшее с начала излучения. Также сферическими будут и другие волновые поверхности, т. е. поверхности с одинаковой фазой волны. Волна, расходящаяся из одной точки в однородной среде, называется сферической независимо от величины угла ϕ , в котором она распространяется. В любой изотропной среде акустические лучи и волновые поверхности взаимно перпендикулярны. В частном случае, когда размеры излучателя малы в сравнении с длиной волны создаваемых им акустических колебаний, акустическое поле излучается равномерно во все стороны. Такой источник звука называется ненаправленным. Волновой фронт и волновые поверхности в поле такого источника являются полными сферами.

При теоретическом рассмотрении акустических задач для упрощения вычислений широко используется понятие плоской волны: на большом расстоянии от источника всегда можно выделить небольшой участок, на котором приближенно можно считать волну плоской. В общем случае при этом должны выполняться следующие условия: длина участка Δr вдоль направления распространения волны должна быть много меньше расстояния r от источника; угол, под которым виден этот участок из точки излучения, должен быть мал; если заменить сферические волновые поверхности, ограничивающие этот участок, плоскими, то разность набега фаз по любым лучам должна оставаться много меньшей 2π . Во многих случаях третье требование, вообще говоря, не является существенным.

В толще морской воды скорость звука не остается неизменной, т. к. изменяются и плотность среды, и ее упругие свойства. Вследствие этого характер распространения волн оказывается значительно более сложным, чем в однородных средах. Скорость звука в океане существенным образом изменяется с глубиной и это приводит к искривлению акустических лучей, к рефракции акустического поля. Сложный состав, характерный для океанической среды, — поверхность, толща воды, слои дна с разными акустическими свойствами — приводят к возникновению отраженных и преломленных волн на границах с резким изменением скорости звука. Кроме того, поверхность океана (моря) и его дно не являются идеальными, плоскими границами раздела. На поверхности есть волны, на дне — хребты, холмы и много мелких неровностей и возвышенностей, которые могут существенным образом искажать акустические поля, нарушать фазовые соотношения, рассеивать часть энергии по другим направлениям и пр. Аналогичное влияние оказывают и акустические неоднородности, заключенные в толще воды и дна. Эти особенности затрудняют оценку акустического поля вдали от источника. Наиболее точное и надежное решение может быть получено методами волновой акустики, учитывающими информацию как об амплитудах, так и о фазах акустических колебаний. Однако волновые расчеты почти всегда требуют использования сложного математического аппарата, в ряде случаев очень громоздкого. Кроме того, недостаточность сведений об истинных характеристиках среды часто сводит на нет преимущества строгих математических методов. В связи с этим для большого круга задач практической гидроакустики используются приближенные упрощенные методы расчета. Важнейшим из них является метод лучевой акустики (аналогичный методу геометрической оптики), в котором не принимается во внимание информация о фазе, содержащаяся в акустической волне. Как правило, он позволяет получить правильную картину явления во всех тех случаях, когда размеры неоднородностей много больше длины волны и когда на длине акустической волны не происходит заметных изменений характеристик среды (скорости звука, плотности и пр.).

1.3. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ АКУСТИЧЕСКУЮ ВОЛНУ

При распространении акустической волны в среде возникают и перемещаются локальные изменения плотности и давления, вызванные колебательным движением ее частиц. Наряду с частотой или связанными с ней периодом и длиной волны эти изменения плотности и давления, а также параметры колебательного движения частиц (смещение из положения равновесия, скорость смещения) являются теми физическими величинами, которые характеризуют волну.

Смещение ξ — это отклонение частицы от равновесного положения. Скорость v смещения частицы из этого положения в акустике принято называть *колебательной* скоростью. Локальное изменение давления в среде, вызванное акустическим процессом, называется *акустическим* давлением, т. е. разностью между мгновенным давлением p^* в среде и статическим (равновесным) давлением p_0 , $p = p^* - p_0$.

Локальное изменение плотности среды, вызванное акустической волной, называется *акустической плотностью* ρ , а именно, разностью между

$$\rho = \rho^* - \rho_0.$$

В местах сжатий среды, где $p^* > p_0$ и $\rho^* > \rho_0$, акустические давление и плотность будут положительными ($p > 0$ и $\rho > 0$), а в местах разрежений среды, где $p^* < p_0$ и $\rho^* < \rho_0$, акустические давление и плотность будут отрицательными ($p < 0$ и $\rho < 0$).

Указанные величины (ξ , v , ρ , p) имеют переменный, колебательный характер. Обычно они изменяются по синусоидальному или близкому к нему закону, принимая то минимальные (нулевые), то максимальные значения. Максимальные за половину периода значения физической величины, характеризующие волну, называются *амплитудой*, и обозначаются, соответственно, ξ_m , v_m , ρ_m , p_m и т. д.

Среднеквадратическое за период значение колебательной величины называется *действующим* или *эффективным* значением. Связь между действующими и амплитудными значениями колебательных величин проста, когда они изменяются по гармоническому закону: по закону функций синуса или косинуса с неизменной амплитудой. В этом случае действующее значение всегда в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного.

Такие величины, характеризующие волну, как смещение частиц, колебательная скорость, акустическая плотность, акустическая мощность, частота, длина волны, имеют единицы измерения, ничем не отличающиеся от единиц измерения подобных величин в физике и технике.

Основной количественной характеристикой звукового поля является величина акустического давления. При проверке и испытаниях практически любой аппаратуры рыбохозяйственной гидроакустики непосредственно регистрируемой величиной также является акустическое давление. Акустическое или избыточное давление в среде, вызванное акустическими волнами, мало и обычно накладывается на значительно большее статическое давление. Акустическое давление выражается в паскалях (Па), а также в десятичных долях (мПа — миллипаскаль, мкПа — микропаскаль) и десятичных кратных (гкПа — гектопаскаль, кПа — килопаскаль, МПа — мегапаскаль). $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ — давление, вызываемое силой в 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 (в физической акустике давление может выражаться в дин/см² или микробарах; сила в 1 дину равна силе, сообщаемой массе в 1 г ускорение в 1 см/с^2 . $1 \text{ Па} = 10 \text{ дин/см}^2 = 10 \text{ мкбар}$ или 10 бар). Статическое давление в современной гидроакустике также выражается в паскалях (Па) и килопаскалях (кПа). Атмосферное давление равно примерно 10^5 Па .

При погружении в воду на каждые 10 м глубины гидростатическое давление увеличивается примерно на 100 кПа. Гидростатическое давление в океане на глубине около 2 км равно примерно 20 мегапаскалям ($20 \text{ МПа} = 2 \times 10^7 \text{ Па}$).

Вторым весьма важным понятием в акустике является энергия акустического поля, которая складывается из суммы кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии упругой деформации и измеряется: в джоулях (Дж) ($1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}$).

Мощностью акустического поля P_a называется количество энергии, переносимое волной за единицу времени через всю волновую поверхность. Она измеряется в Вт (1 Вт = 10^7 эрг/с). Величину энергии, заключенную в единице объема среды, называют *плотностью акустической энергии*. Поток энергии численно определяется количеством энергии, проходящей в единицу времени через данную поверхность. Количество акустической энергии, протекающей (или переносимой акустической волной) в единицу времени (т. е. мощность акустической энергии) через единичную площадку (поверхность), перпендикулярную направлению распространения, т. е. плотность потока акустической энергии, называется *интенсивностью или силой звука I* . Эта величина также является весьма распространенной и важной количественной характеристикой акустического поля.

В сферической волне плотность потока энергии убывает с расстоянием. Пусть P акустическая мощность, создаваемая ненаправленным излучателем. В однородной непоглощающей среде на любом расстоянии от ненаправленного источника интенсивность звука I определяется по формуле:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (1.3)$$

где $4\pi r^2$ — площадь перпендикулярной лучам волновой поверхности, находящейся на расстоянии r от излучателя.

При направленном источнике средняя величина интенсивности звука $I_{\text{ср}}$ в пределах телесного угла Ω на расстоянии r равна

$$I_{\text{ср}} = \frac{P}{\Omega r^2}, \quad (1.3')$$

Интенсивность звука выражается в Вт/м² (1 Вт/м² = 10^3 эрг/с·см²). Интенсивность звука в некоторой точке акустической волны однозначно связана с давлением в той же точке среды. При синусоидальной (гармонической) плоской волне эта связь выражается соотношением

$$I = \frac{p_0^2}{2}; \quad \rho c = \frac{p_{\text{эф}}^2}{\rho c}, \quad (1.4)$$

где p_0 — амплитудное, $p_{\text{эф}} \approx 0,7p_0$ — эффективное значение давления.

Из (1.3) и (1.4) $p_{\text{эф}}$ может быть выражено как

$$\sqrt{\frac{\rho c \gamma}{4\pi r^2}},$$

где γ — коэффициент направленности источника. Соотношение (1.4) может быть использовано и при сферической волне, если участок волновой поверхности единичной площади, по которому рассчитывается сила звука I , можно считать плоским.

Произведение ρc , входящее в (1.4), играет весьма важную роль в теории распространения акустических волн и по электромеханической аналогии называется *акустическим сопротивлением среды*.

При заданных одинаковых амплитудах акустического давления в двух средах с разными ρc интенсивность акустических колебаний будет больше в той среде, ρc которой меньше, т. е. $I_1/I_2 = \rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$.

При одной и той же амплитуде акустического давления интенсивность колебаний в воде I_1 будет примерно в 3500 раз меньше, чем интенсивность акустических колебаний в воздухе I_2 , т. к.:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} = \frac{43}{1,5 \cdot 10^5} \sim \frac{1}{3500}.$$

При акустических колебаниях одинаковой интенсивности (и частоты) амплитуда акустического давления в воде будет примерно в $\sqrt{3500}$ раз, т. е. \approx в 60 раз больше, чем

в воздухе, но амплитуды колебательной скорости и смещения, наоборот, будут во столько же раз больше в воздухе, чем в воде.

Практически в воде ввиду ее большого ρc сравнительно легко создать большие амплитуды акустического давления, но трудно создать большие амплитуды смещения, а в воздухе наоборот. Поэтому мембрана громкоговорителя с ее большой податливостью и большой амплитудой смещения вполне приемлема в качестве источника звука в воздухе, а жесткий пьезоэлектрический стержень, дающий малые смещения, — в качестве источника звука в воде. Формула (1.4) позволяет по величине акустического давления, определенной, например, при испытаниях аппаратуры, найти I звука в той же точке среды; выражение (1.3) или (1.3'), решенные относительно P , позволяют определить и мощность источника, создающего акустическое поле в среде.

Пользуясь формулами (1.3) или (1.3') и (1.4), можно написать соотношения I и p на двух разных расстояниях r_1 и r_2 от источника

$$I_1 = \frac{p_1^2}{2\rho c} = \frac{P}{4\pi r_1^2}; \quad I_2 = \frac{p_2^2}{2\rho c} = \frac{P}{4\pi r_2^2}.$$

Отсюда следует, что в непоглощающей однородной среде интенсивность звука обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2},$$

а давление — первой степени расстояния

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{r_1}{r_2}.$$

К внесистемным единицам относятся октава и децибел. Октава — это единица частотного интервала, при котором отношение верхней граничной частоты к нижней граничной частоте равно двум, т. е. если f_1 и f_2 — верхняя и нижняя частоты, ограничивающие октавный интервал частот, то должно иметь место равенство $\log(f_2/f_1) = 1$. Если же $\log(f_2/f_1) \neq 1$, то частотный интервал будет меньше или больше октавы.

В акустике широко принято выражение численных значений физических величин в относительных логарифмических единицах, показывающих превышение (или ослабление) одной величины над другой. Это связано, в частности, и с тем, что ухо человека является логарифмическим детектором (например, оно приблизительно одинаково ощущает разницу между 1 и 10 единицами и между 10 и 100 единицами). Наиболее распространенной относительной единицей является децибел. Децибелы применяют там, где одноименные физические величины изменяются в очень больших пределах. К примеру, в акустике у порога слышимости человеческого уха интенсивность звука составляет около 10^{12} Вт/м² (писк комара не у самого уха). У порога болевого ощущения интенсивность составляет около 1 Вт/м² (рев двигателей реактивного самолета на расстоянии нескольких метров от уха). Таким образом, в акустике сильные и слабые звуки по интенсивности могут различаться в 10^{12} раз, т. е. такое число, которое не укладывается в наши представления о большом и малом. Еще в большее число раз (10^{14} – 10^{18}) могут отличаться по интенсивности сильные зондирующие импульсы от слабых эхосигналов от удаленных объектов в гидроакустике. В связи с таким огромным динамическим диапазоном интенсивностей акустических сигналов на Международном акустическом конгрессе (Нью-Йорк, 1920 г.) было принято решение о том, чтобы для сравнения интенсивностей звуковых сигналов употреблять не абсолютные отношения интенсивностей, а брать десять десятичных логарифмов от абсолютных отношений. Десять десятичных логарифмов от отношения интенсивностей сравниваемых акустических волн называли децибелом (в честь А.Г. Белла, получившего в 1876 г. патент на первый практически пригодный телефон). Таким образом, уровень интенсивности в децибелах определяется по формуле:

$$D_I = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (1.5)$$

где I — интенсивность исследуемого акустического сигнала, I_0 — интенсивность, относительно которой отсчитывается уровень интенсивности исследуемого акустического сигнала (опорное, «нулевое» значение интенсивности).

Согласно формуле 1.5 уровень болевого ощущения человеческого уха, если за опорное значение интенсивности принять порог слышимости, а за исследуемую интенсивность — порог болевого ощущения, составит 120 дБ — число, которое доступно нашим представлениям о большом и малом.

Если, например, I_1 — интенсивность акустического поля 1, а I_2 — то же для звукового поля 2, то говорят, что акустическое поле 1 отличается от акустического поля 2 на N дБ, где

$$N = 10 \log \frac{I_1}{I_2}. \quad (1.6)$$

Учитывая, что согласно (1.4) $I_1/I_2 = (p_1/p_2)^2$, $N = 10 \log (p_1/p_2)^2 = 20 \log p_1/p_2$. Так как порог болевого ощущения человеческого уха по давлению равен 20 Па, а порог слышимости $2 \cdot 10^{-5}$ Па, то принимая $p = 20$ Па и $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па, получим согласно (1.4), что порог болевого ощущения по отношению к порогу слышимости составляет опять же 120 дБ. Как видно, число децибел, на которое отличается уровень одного звука от уровня другого, получается одинаковым независимо от того по давлению или интенсивности вычислены децибелы. Выраженные в децибелах отношения как давлений, так и интенсивностей в двух точках акустического поля одинаковы; отношения же их абсолютных значений связаны между собой квадратичной зависимостью.

Так, например, если отношения интенсивностей и давлений равны 10 дБ, то $I_1/I_2 = 10$, а $p_1/p_2 = \sqrt{10} \sim 3,16$.

Величины интенсивности и давления звука могут быть выражены непосредственно в децибелах, и тогда они называются уровнем интенсивности и уровнем давления, соответственно. Численные значения одного и того же уровня интенсивности или звукового давления, выраженные в децибелах, будут зависеть от того, какие значения I_0 интенсивности или акустического давления p_0 принимают в качестве опорных («нулевых»). В акустике в качестве I_0 и p_0 берут их значения, соответствующие порогу слышимости. В гидроакустике нет общепринятых (стандартных) их значений. Поэтому в гидроакустике можно встретиться с вычислением децибел и относительно порога слышимости, и относительно $p_0 = 0,1$ Па, и относительно 1 мкПа. В связи с этим, встречая в гидроакустической литературе уровни звукового давления или интенсивности, следует обращать внимание на то, относительно какого исходного уровня они вычислены. В последние десятилетия в гидроакустике используют опорное значение акустического давления, равное 1 мкПа. Это значение удобно тем, что выраженные относительно него уровни звуковых давлений всегда будут положительными, т. к. звуки с давлениями, меньшими 1 мкПа, в современной гидроакустике практически не встречаются (их просто не ощутить). Преимущество его состоит и в том, что оно является степенью 10 и достаточно мало (поэтому отрицательные уровни давления фактически исключаются). Вообще же децибелы могут быть отрицательными в том случае, когда уровень исследуемого звука ниже опорного.

Децибел — специфическая единица, не похожая ни на одну из тех, с которыми мы привыкли встречаться в повседневной практике. Это не физическая величина, а всего лишь математическое понятие. Он в чем-то схож с процентами или промилле. Как и проценты, децибелы безразмерны.

За опорные 0 дБ, т. е. за значения, соответствующие I_2 и p_2 , в выражениях (1.5) и (1.6), в гидроакустике обычно принимают значения I и p либо на расстоянии от источ-

ника, равном 1 м, либо на некотором другом определенном расстоянии, либо какие-то другие определенные значения интенсивности и давления. Звуковое давление p в децибелах определяется как

$$p = 10 \log \frac{p_1}{p_0}, \quad (1.7)$$

где p_0 – опорное давление. Различные уровни опорного давления показаны на рис. 1.1.

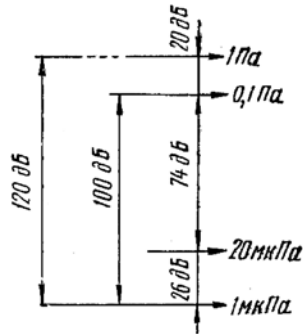


Рис. 1.1. Уровни опорного давления

В качестве эталонной единицы интенсивности звука находит применение интенсивность плоской волны эффективного значения давления равного 0,1 Па. Эта единица интенсивности I_0 (в Вт/см²) определяется по формуле:

$$I_0 = \frac{p_{эф}^2}{\rho c} \cdot 10^{-7}.$$

Для морской воды при $\rho c = 1,5 \times 10^5$ г/см² с $I_0 = 0,64 \cdot 10^{-12}$ Вт/см² (так как 1 Вт = 10⁷ эрг/с).

В этом случае акустическая волна с интенсивностью в 100 раз большей интенсивности плоской волны эффективного значения давления, равного 0,1 Па, имеет уровень, равный $10 \log(100/1) = 20$ дБ, относительно 0,1 Па. Запись $p = 20$ дБ (относительно 1 Па) означает,

что за 0 дБ принят 1 Па; если указано, что $p = -60$ дБ по отношению к давлению на расстоянии 1 м от источника, это значит, что p на 60 дБ (в 1000 раз) меньше, чем на указанном расстоянии (1 м). В децибелах могут быть выражены и многие другие величины, используемые в акустике, например, коэффициенты отражения и рассеяния. Если эти величины безразмерны, за 0 дБ принимается значение, равное 1. Во всех случаях, когда

Таблица 1.1. Приведены значения в децибелах и соответствующие им отношения I_2/I_1 и P_2/P_1

дБ	I_2/I_1		P_2/P_1	
	Увеличение (+)	Ослабление (-)	Увеличение (+)	Ослабление (-)
0,1	1,02	0,977	1,01	0,989
0,2	1,05	0,955	1,02	0,977
0,5	1,12	0,891	1,06	0,944
1,0	1,26	0,794	1,12	0,891
1,5	1,41	0,708	1,19	0,841
2,0	1,58	0,631	1,26	0,794
3,0	1,99	0,501	1,41	0,708
5,0	3,16	0,316	1,78	0,562
6,0	3,98	0,251	1,99	0,501
10	10,00	0,100	3,16	0,316
15	31,6	0,032	5,62	0,178
20	100,00	0,010	10,00	0,100
30	1000	0,001	31,6	0,032
50	100000	0,00001	316,0	0,003

Примечание. Данные табл. 1.1 приводятся для определения величины интенсивности звука I и уровня давления P .

та или иная величина выражается в децибелах, должно быть оговорено, какое значение данной величины выбрано за исходное, т. е. за 0 дБ. Если в формуле $A = N$ дБ (относительно A_0) $N > 0$, то $A > A_0$; если $N < 0$, то $A < A_0$. В табл. 1.1 приведены некоторые величины в децибелах и соответствующие им отношения I_2/I_1 и P_2/P_1 .

Приведем два примера использования данных табл. 1.1.

1. Найти абсолютную величину интенсивности звука $I = -42,5$ дБ (относительно 1 Вт/м^2). Записываем $42,5$ как сумму величин, находящихся в первой графе табл. 1, — $42,5 = -(30+10+2,0+0,5)$; используя соответствующие цифры третьей графы той же таблицы (ослабление интенсивности), получаем $I = 10^{-3} \cdot 10^{-1} \cdot 0,63 \cdot 0,891 = 0,56 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$.

2. Выразить давление $P = 113$ Па в децибелах. Разбиваем P на множители, соответствующие четвертой графе табл. 1: $P = 1,13 \cdot 10 \cdot 10$; пользуясь затем первой графой, получаем $P = 1+20+20 = 41$ дБ (относительно 1 Па).

Система децибел используется также для определения отношения выходного и входного сигналов четырехполюсников и преобразователей. Усилитель напряжения, например, может иметь коэффициент усиления, равный 10, что означает $20 \log$ (выходное напряжение / входное напряжение) = $20 \log 10 = 20$ дБ.

1.4. СКОРОСТЬ ЗВУКА В ВОДЕ

Как указывалось, скорость c распространения акустических колебаний в водной среде определяется модулем объемной упругости k (сжимаемостью) и плотностью воды ρ , тем более, что скоростью звука в среде и плотностью среды определяется ее основная характеристика — волновое сопротивление. Сжимаемость и плотность морской воды по-разному зависят от гидростатического давления, т. е. от глубины, а также от температуры и солености воды, следовательно и скорость распространения акустических волн зависит от перечисленных параметров. С пространственными изменениями скорости звука связана одна из важнейших особенностей распространения акустических волн в море — искривление звуковых лучей (рефракция звуковых волн), нередко существенно влияющее на возможности технических средств рыбохозяйственной гидроакустики.

Коэффициент сжимаемости и плотность морской воды могут принимать различные значения в зависимости от местоположения в океане, времени года (сезона, суток) и глубины моря. Поэтому различные, отличающиеся от среднего значения 1500 м/с , будет принимать и скорость звука.

При повышении температуры сжимаемость и плотность воды уменьшаются. Это означает, что при повышении температуры скорость звука в морской воде будет возрастать. При этом с увеличением температуры прирост уменьшения коэффициента сжимаемости и плотности замедляется. Поэтому приращение температуры на 1°C дает более высокие значения приращения скорости звука при малых температурах и менее высокие — при больших температурах.

Соленость морской воды также влияет на ее сжимаемость и плотность. При увеличении солености плотность воды увеличивается, а сжимаемость уменьшается. Но на 1% повышения солености (1% — одна промилле, т. е. одна тысячная доли) плотность повышается в среднем на $0,08\%$, в то время как коэффициент сжимаемости уменьшается в среднем на $0,3\%$. Более резкое уменьшение коэффициента сжимаемости при увеличении солености по сравнению с повышением плотности приводит к тому, что при повышении солености скорость звука будет возрастать. В среднем повышение солености на 1% приводит к возрастанию скорости звука на $1,15 \text{ м/с}$.

С увеличением глубины возрастает гидростатическое давление (приблизительно 1 атм на каждые 10 м глубины). С ростом гидростатического давления плотность воды увеличивается, а коэффициент сжимаемости уменьшается. Но снова коэффициент сжимаемости уменьшается значительно резче, чем возрастает плотность. Поэтому в целом при увеличении гидростатического давления скорость звука также будет возрастать.

На одну атмосферу (на каждые 10 м глубины) скорость звука увеличивается примерно на 0,18 м/с.

Температура морской воды может изменяться от $-1,9^\circ\text{C}$ в полярных районах, непосредственно подо льдом, до 33°C в экваториальных районах. Соленость может изменяться от 0‰ в опресненных приустьевых районах до 41‰ в соленых морях. Гидростатическое давление изменяется от 1 атм на поверхности воды до 1000 атм и более. Поэтому в значительных пределах изменяется и скорость звука в Мировом океане — от 1400 м/с в холодных опресненных приустьевых районах Арктического бассейна до 1600 м/с и более на дне глубоководных океанических впадин.

Характер зависимостей k и ρ от температуры (T), солености (S) и гидростатического давления (P) весьма сложен и недостаточно изучен, поэтому расчет скорости звука по формуле (1.2) приводит к заметным погрешностям.

При глубинах до 1000 м, солености от 30 до 42‰ и температуре от -2 до $+25,5^\circ\text{C}$ для расчета скорости звука может быть использована весьма точная и простая формула, предложенная в 1969 г. Лероем:

$$c = 1492,9 + 3(t-10) - 6 \cdot 10^{-3}(t-10)^2 - 4 \cdot 10^{-2}(t-18)^2 + 1,2(S-35) - 1 \cdot 10^{-2}(t-18)(-35) + 0,0164h. \quad (1.8)$$

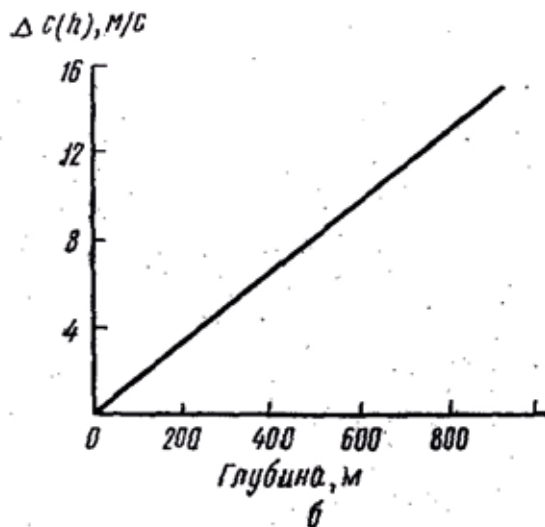
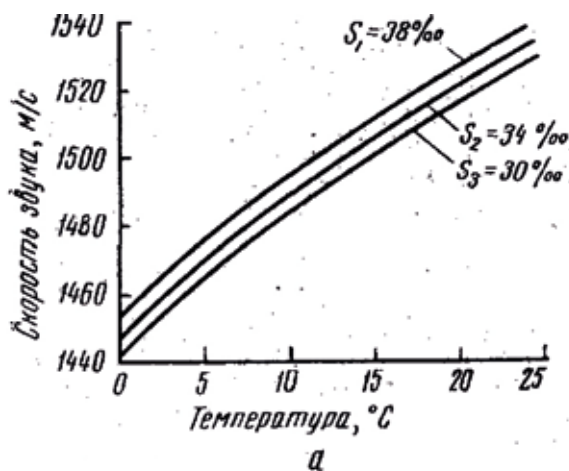


Рис. 1.2. Зависимость скорости звука от температуры, рассчитанная по формуле (1.8):

а — при $h = 0$ (параметр кривых S); б — поправки $\Delta c(h)$ для разных глубин

На рис. 1.2 а приведены рассчитанные по этой формуле кривые $c_0(T^\circ\text{C})$ при глубине $h = 0$ и солености 30, 34 и 38‰; на рис. 1.2 б дана поправка $\Delta c(h)$, соответствующая последнему члену формулы (1.8). Скорость звука при произвольном значении глубины может быть определена как сумма $c_0(T^\circ\text{C}) + \Delta c(h)$ [Андреева, 1974].

В горизонтальных направлениях (по площади) скорость звука в океане можно считать неизменной на значительных акваториях (в пространстве, но не во времени). Того же нельзя сказать о вертикальном направлении (по глубине). По многим причинам температура воды, соленость и, уж во всяком случае, гидростатическое давление изменяются с глубиной, вызывая соответствующие изменения и скорости акустических волн. В связи с этим скорость звука обычно принимается непосредственной функцией глубины $c(h)$. Кривая $c(h)$ называется вертикальным распределением или профилем скорости звука. Скорость звука возрастает при увеличении любого из указанных трех параметров.

Весьма важной численной характеристикой изменения c является вертикальный относительный градиент скорости звука g_c , равный по модулю:

$$g_c = \frac{1}{\hat{c}} \cdot \frac{dc}{dh},$$

где \hat{c} — некоторая средняя скорость звука.

Знак градиента определяется знаком перед величиной g_c , градиент считается

положительным, если с увеличением глубины скорость звука растет, и отрицательным, если она при этом уменьшается. Для практических целей обычно пользуются средними величинами градиента на некотором интервале глубины от h_1 до h_2 и

$$g_c \approx \frac{1}{c} \cdot \frac{c_2 - c_1}{p_2 - p_1}.$$

Скорости звука c_1 и c_2 соответствуют глубинам h_1 и h_2 . Градиент g_c обычно выражается в м^{-1} .

1.5. ПОТЕРИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Достоверное определение затухания звука в воде наиболее важно при количественной оценке запасов промысловых биологических объектов гидроакустическим методом, т. к. оно может приводить к существенным погрешностям в расчетах биомасс.

При распространении звуковых импульсов как от антенны рыбопоискового прибора до объекта локации, так и обратно происходит постепенное уменьшение интенсивности звуковых колебаний. Величина этого уменьшения оценивается в общем виде с помощью параметра, называемого «потери при распространении». Для средств рыбохозяйственной гидроакустики он, в свою очередь, может быть представлен в виде произведения двух независимых параметров — потерь на геометрическое расширение фронта звуковой волны и потерь на затухание звуковой энергии, обусловленное процессом превращения акустической энергии в теплоту.

Первый вид потерь учитывается в выражениях для акустического давления элементарных составляющих результирующего сигнала путем учета в этих выражениях дистанции r от антенны до объекта.

Второй вид потерь учитывается в этих же выражениях посредством множителя в виде показательной функции, в состав степени которой входит коэффициент затухания звука β , имеющий размерность дБ/км.

Любая реальная среда не является идеальной, и энергия, запасенная звуковой волной, расходуется не только на преодоление сил упругости между частицами среды, но и частично безвозвратно уходит на преодоление сил внутреннего трения между частицами. По мере распространения волны все большее количество энергии тратится на преодоление сил трения, что приводит к уменьшению амплитуды волны по мере увеличения пройденного ею расстояния. До сих пор мы считали среду состоящей из упруго взаимодействующих частиц. На самом деле она состоит из молекул, молекулы — из атомов и т. д. Колебания молекул как частиц, и передача колебательного движения от молекулы к молекуле — это и есть то, что подразумевается под акустической волной. Но при колебаниях молекул неизбежно приходит в движение их внутренняя «начинка». На возбуждение процесса движения внутри молекул безвозвратно уходит часть энергии волны. Этот, а в морской воде еще и другие, связанные с наличием растворенных в ней солей, молекулярные процессы также приводят к постепенному затуханию акустической волны по мере ее распространения. Некоторое, хотя и небольшое, затухание звука будет вызываться и через теплопроводность среды.

Затухание волны, вызванное свойствами морской воды, называется физическим затуханием. Оно обусловлено независимыми причинами: поглощением части акустической энергии из-за вязкости, молекулярных процессов, теплопроводности и рассеянием еще одной части ее на неоднородностях морской воды.

В результате распространение акустических колебаний в морской среде сопровождается уменьшением их интенсивности. В реальной океанической среде ослабление акустических колебаний происходит не только в результате сферического расхождения волнового фронта (расширения фронта волны), но и вследствие указанного физического затухания. Поглощенная часть акустической энергии переходит в тепло, рассеянная же распространяется в направлениях, отличных от траектории лучей первичного поля.

Оба эти эффекта приводят к уменьшению силы звука, более быстрому, чем это следует из условий расширения фронта волны. Поглощение акустической энергии определяется, в основном, присутствием в морской воде марганцевокислой соли $MnSO_4$. Этот фактор потерь является доминирующим на частотах в десятки и сотни килогерц.

Другой механизм ослабления распространяющейся акустической энергии в морской воде связан со случайными неоднородностями этой среды. Температура, плотность и соленость морской воды фактически всегда флюктуируют вокруг средних значений. Эти флюктуации случайны и имеют как пространственный, так и временной характер. К неоднородностям относятся и инородные включения — газовые пузырьки, биологические объекты, особенно содержащие газовые включения, продукты их жизнедеятельности, твердые частицы опускающихся осадков и пр. Все эти неоднородности толщи воды рассеивают звук, т. е. переизлучают часть попавшей на них акустической энергии в направлениях, отличных от направления распространения первичной волны.

На этом механизме основано действие целого ряда средств рыбохозяйственной гидроакустики, т. к. способности объектов промысла рассеивать падающие на них акустические колебания обеспечивают возможность их обнаружения и оценки. Однако он же и ограничивает возможности и эффективность указанных средств.

При оценке и определении коэффициента затухания акустической энергии в процессе распространения ее в толще водной среды не учитывают рассеяние звука неровностями границ раздела (дна и поверхности океана) и связанные с этим потери, которые рассматривают отдельно (т. е. принимают во внимание только потери в толще среды, где распространяются акустические волны). В качестве отдельного, хотя часто и весьма существенного (в т. ч. для средств рыбохозяйственной гидроакустики) механизма затухания акустических волн в водной среде, следует рассматривать рассеяние, происходящее на воздушных пузырьках поверхностного слоя воды, образующихся в основном при волнении, а также вследствие жизнедеятельности планктона и других организмов.

Приповерхностный слой моря представляет собой весьма динамичную и сложную структуру, постоянно подверженную мощным воздействиям как со стороны остальной толщи моря (водной среды), так и со стороны атмосферы. По характеристикам приповерхностный слой резко отличается от остальной морской среды. В частности, он характеризуется аномально высокой концентрацией газовых пузырьков, что приводит к повышенному рассеянию и поглощению звука, а также к усилению акустической нелинейности этого слоя.

Несмотря на «объемный» характер, этот процесс при горизонтальном распространении звука, как правило, имеет место одновременно с рассеянием звука неровностями поверхности воды (моря). Толщина слоя пузырьков обычно не превышает 10–15 м (редко 25 м), поэтому звуковые волны будут распространяться преимущественно внутри этого слоя, касаясь, собственно, поверхности воды. На больших глубинах воздушные пузырьки ветрового происхождения практически отсутствуют и, во всяком случае, не оказывают заметного влияния на затухание звука.

При большом волнении моря между излучающей поверхностью гидроакустической антенны и невозмущенным слоем воды у корпуса судна возникает пенный аэрированный слой. На границах аэрированного слоя может теряться до 80–90% акустической энергии. Интенсивность затухания звуковой энергии в этом слое настолько значительна, что использование гидроакустических приборов для обнаружения гидробионтов иногда становится невозможным даже на малых глубинах.

Физическая природа затухания звуковой энергии в аэрированном слое заключается в том, что акустическая волна возбуждает колебания газовых пузырьков, которые переизлучаются в окружающую водную среду и приводят к образованию вторичных акустических волн (эффект рассеяния звука). Эхосигналы, порожденные вторичным акустическим полем, регистрируются на устройствах отображения аппаратуры в виде

плотной темной полосы (бахромы), исключая из зоны наблюдения верхние слои воды толщиной до нескольких десятков метров. Кроме того, пузырьки поглощают почти всю излучаемую эхолотом акустическую энергию. Часть энергии при этом расходуется на преодоление внутренних сил в системе пузырек-жидкость и выделяется в форме тепла (эффект поглощения звука).

Возникновение и концентрация газовых пузырьков в морской воде в значительной степени зависят от состояния поверхности моря, т. е. прежде всего от скорости ветра. При слабом ветре (до 6–8 м/с) пузырьков образуется относительно мало, причем возникают только маленькие пузырьки с резонансными частотами порядка 50 кГц и более. Начиная со скорости ветра 1,0 м/с (5 баллов), соответствующей появлению на вершинах волн белых гребешков пены, наблюдается резкое возрастание количества и размеров пузырьков, идущее по экспоненциальному закону. Характерно, что после прекращения ветра концентрация пузырьков, в первую очередь крупных, сравнительно быстро падает (через 20–30 мин), несмотря на значительные высоту волн зыби и скорость дрейфового течения.

Следовательно, наибольшее количество газовых пузырьков в морской воде образуется при разрушении гребней ветровых волн, сопровождающемся возникновением пенных барашков. Воздушные пузырьки диаметром 0,5 мм и более исчезают в процессе дегазации за счет всплытия, мелкие пузырьки диаметром порядка 0,025 мм растворяются. Пузырьки средних размеров (0,07–0,3 мм) существуют дольше мелких и крупных, поэтому они имеют наибольшую концентрацию и оказывают наибольшее отрицательное влияние на работу эхолотов с рабочими частотами в диапазоне 20–30 кГц, для которых пузырьки диаметром в 0,1–0,2 мм являются резонансными.

В связи с этим после штормовой погоды применение высокочастотных эхолотов дает больший эффект при поиске гидробионтов, чем использование низкочастотных (конечно, в пределах их дальности действия, т. е. при поиске в сравнительно небольшом диапазоне глубин, из-за большего коэффициента затухания звука). Например, высокочастотный тракт эхолота «Сарган» позволял регистрировать одиночных рыб с $R_{\text{эkv}} = 0,1$ м на глубине до 350 м при скорости судна 9 уз., а рыбные скопления — на глубинах 500–550 м [Кудрявцев, Подлипанов, 1975].

В зависимости от состояния поверхности моря и высоты волн толщина слоя аэрации колеблется от 10–15 до 50 м. Особо высокая концентрация пузырьков отмечается в слое до 20 м. Значительные аэрированные слои, проникающие в район акустических антенн, создаются и при движении самого промыслового судна во время волнения моря (при ударах волн).

Нередко явления интенсивного затухания звуковой волны связаны не только с указанными выше причинами, но и с эффектом поглощающей воды — водной среды, в которой под влиянием штормового волнения и механического разрушения — захлопывания огромного количества воздушных пузырьков насыщение растворенным воздухом на 4–5 порядков превышает содержание свободного газа в длительно (более 12 ч) отстаивавшейся воде.

«Поглощающая вода» имеет чрезвычайно большое начальное поглощение порядка 100 дБ/км, которое со временем уменьшается очень медленно. Практически указанный эффект имеет место в поверхностном слое воды толщиной до 20–30 м.

Воздействие повышенного волнения моря на работу эхолотов вертикального действия проявляется в увеличении пропусков в регистрациях эхосигналов от гидробионтов и дна (рис. 1.3 а), в потере контакта со слабыми концентрациями, появлении сильных шумовых помех, особенно при ударах волн, регистрируемых в виде множества отметок различной продолжительности по всей ширине экрана и др. Отметки эха от рыб, а иногда и от грунта в этих условиях могут почти полностью отсутствовать (рис. 1.3 б).

Опыт использования эхолотов вертикального действия и экспериментальные работы с различными типами установки акустических антенн показывают, что в случае

применения стационарно установленных в днище судна антенн (не выступающих за обводы корпуса судна) даже на крупных промысловых судах эффективность аппаратуры

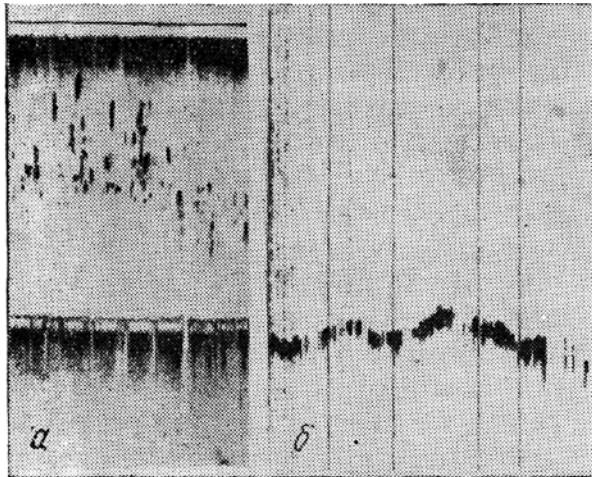


Рис. 1.3. Влияние периодического экранирования антенны эхолота аэрированными потоками и ее вертикальных перемещений на характер отметок эхосигналов при волнении моря (а) и появление больших пропусков отображения эхосигналов даже от грунта при волнении моря 8 баллов (б)

резко снижается уже при волнении около 4–5 баллов. При волнении в 5 баллов появляются пропуски в регистрациях эхосигналов от дна, увеличивающиеся при движении судна лагом к волне. При волнении свыше 5 баллов пропуски в регистрациях обычно настолько возрастают, что возможность различения рыбы у грунта почти исключается. В случае волнения моря 6–7 баллов на встречных курсах в большинстве случаев на экранах дисплея регистрируются лишь эхосигналы от дна моря с пропусками (см. рис. 1.3 б).

Размещение антенны ниже обводов судна с помощью выдвижного устройства или стационарная установка их ниже обводов корпуса существенно снижают помехи и экранирование при волнении моря до 5 баллов и скорости судна до 8–9 уз. Однако в условиях большой волны пенные потоки, в т. ч. срываемые с гребней

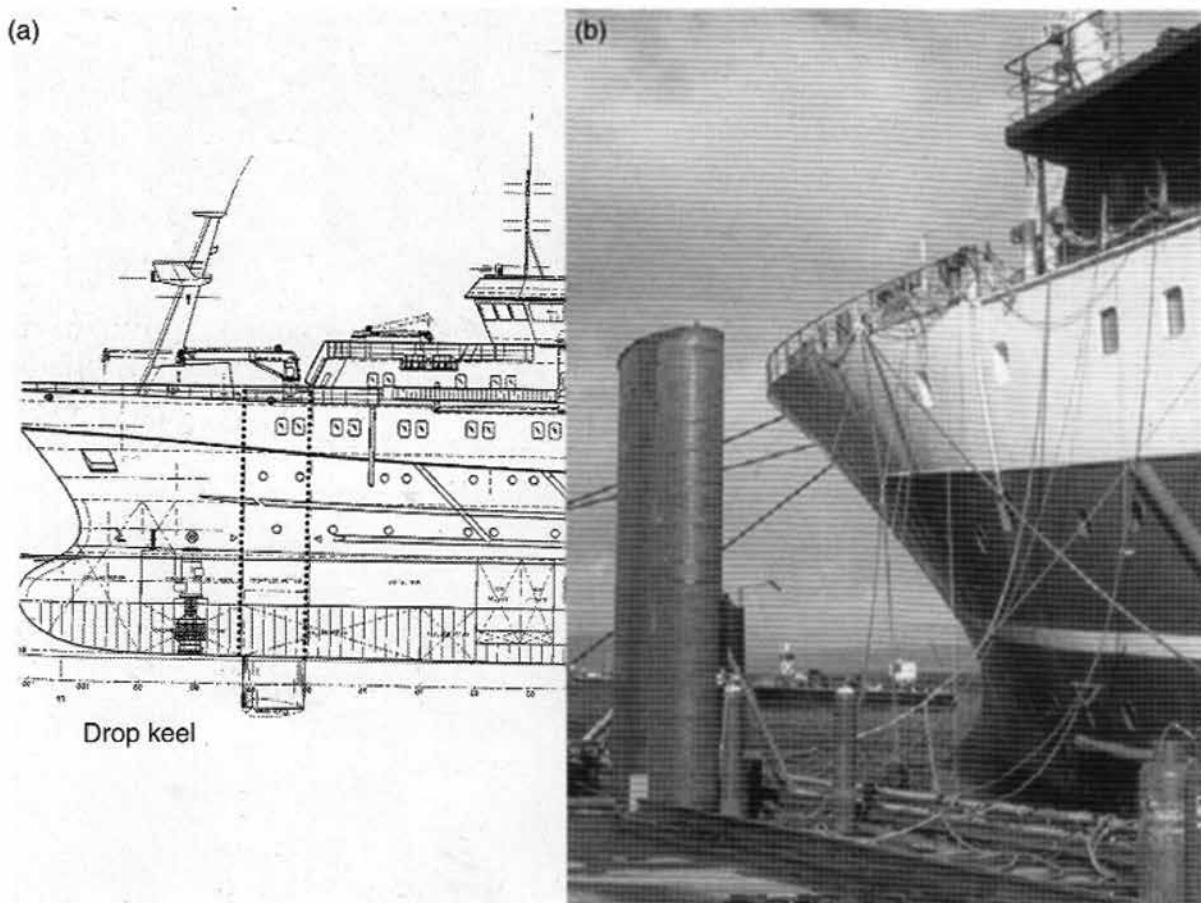


Рис. 1.4. Место установки (слева) и внешний вид ПОУ на судне «Скотиа» [Simmonds и Maklennan, 2005]

волн, могут оказывать значительное влияние на работу аппаратуры, попадая под антенны при подъеме судна на волне. На норвежских научно-исследовательских рыболовных судах и ряде НИС других стран [Левашов, 2010] акустические антенны уже стали устанавливать в специальных подъемно-опускных устройствах ПОУ (ранее ПОУ применялись лишь на судах военно-морского флота) с выдвиганием их до 4 м ниже днища судна (рис. 1.4).

На эхограмме (рис. 1.5) показано влияние глубины погружения ПОУ на обнаружение подводных целей при волнении моря.

Суммарное время, в течение которого значительно снижается эффективность обнаружения скопленных эхолотами вертикального действия со стационарно установленными в корпусе судна (заподлицо с корпусом судна) акустическими антеннами, от общего возможного поискового времени в среднем составляет в Балтийском море 22–23%, Баренцевом – 41–44%, Беринговом – 31–37%, Охотском – 25–31%, Каспийском – 19–21%, Атлантическом океане – 33–44% (за исключением тропической зоны, где оно находится в пределах 11–25%, и экваториальной, где это время равно 7%), в южной части Индийского океана 31–47%, в субтропической и умеренной зонах южной части Тихого океана – 41–60%, в северной части Тихого океана – 11–25% (кроме экваториальной и тропической зон южной части, где оно составляет от 3 до 8%) [Дубман, Шмелева, 1970].

В наименьшей степени подвержены влиянию волнения моря антенны, размещаемые в буксируемых носителях и обеспечивающие уверенную регистрацию эхосигналов при волнении моря свыше 6 баллов, практически уже начиная с глубины погружения 30–40 м. В этом случае излучение акустической энергии происходит непосредственно в водную, а не в аэрированную среду, а принимаемые слабые эхосигналы от рыб не ослабляются аэрированными потоками. Кроме того, помехи в месте приема в 5–10 раз ниже, чем под килем судна. На работу аппаратуры не оказывает влияния качка судна как при стационарной подкильной установке антенны.

При вертикальном распространении звука так называемый пузырьковый слой часто оказывает значительное влияние и на эффективность рыболокаторной аппаратуры вертикального действия. Коэффициент затухания β характеризует уменьшение силы звука в акустической волне, связанное с затуханием, т. е. с потерями, вызываемыми его поглощением и рассеянием. Для морской воды ввиду относительной малости затухания звука в качестве единицы длины используется, как правило, 1 км и величина коэффициента затухания β обычно выражается в децибелах на километр. Потери энергии при распространении являются аддитивными независимо от механизма их возникновения, поэтому величину коэффициента затухания β можно рассматривать как сумму нескольких слагаемых, каждое из которых определяется своим механизмом.

Согласно классической теории затухания (удовлетворительно описывающей поглощение звука в воздухе, дистиллированной воде и других «чистых» жидкостях) коэффициент поглощения (часть коэффициента затухания β) пропорционален квадрату частоты волны. Это означает, что очень сильно будут поглощаться (затухать) высокочастот-

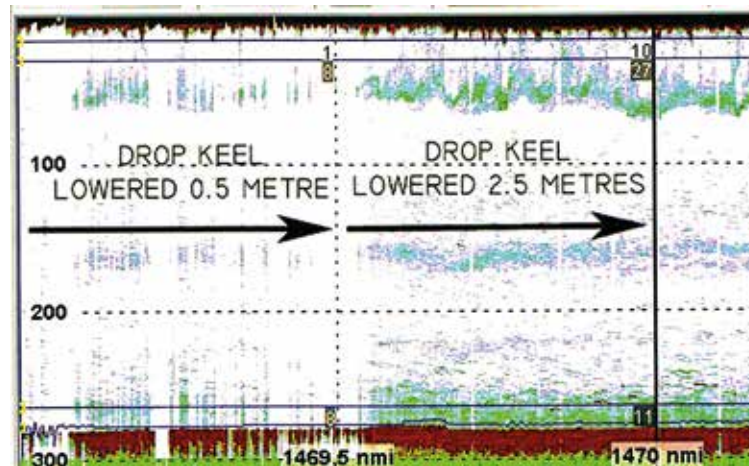


Рис. 1.5. Влияние погружения ПОУ на характер отображения эхосигналов от водных биологических объектов при волнении моря

ные звуки³. Однако в морской воде коэффициент поглощения не столь однозначно зависит от частоты. Дело в том, что при распространении звука в среде нарушается равновесное распределение энергии между различными степенями свободы молекул. В среде возникают внутренние процессы, способствующие восстановлению равновесия. Такие процессы называются релаксационными.

На свое поддержание они отбирают энергию от звуковой волны, вызывая дополнительное поглощение – релаксационное. В морской воде известны и специфические релаксационные процессы, связанные с изменением степени диссоциации молекул растворенных в ней солей, в частности, соли сернокислого магния $MgSO_4$. Соответственно, экспериментальные измерения указывают на повышенное затухание звука в морской воде.

При малых значениях β преобладающую роль в уменьшении интенсивности играет геометрическое затухание. При больших значениях β основную роль будет играть уже физическое затухание. Например, при $\beta = 5$ дБ/км на 1 км из-за физического затухания интенсивность зондирующего (излученного) импульса снизится всего в 3,3 раза, в то время как из-за геометрического затухания – в миллион раз по сравнению с интенсивностью на расстоянии 1 м от антенны. Если же $\beta = 70$ дБ/км, то из-за физического затухания интенсивность на расстоянии 1 км сократится уже в 10 млн раз, в то время как вследствие геометрического затухания она по-прежнему снизится в тот же миллион раз.

Для определения затухания звука в океане базируются в основном на результатах экспериментов. Экспериментальная величина затухания определяется из анализа закона спада силы звука с изменением расстояния от источника при заданной частоте. В опытах обычно используют начальные условия распространения звука, исключая влияние на звуковое поле дна и поверхности моря. В настоящее время не существует единой надежной формулы для определения коэффициента затухания в широком частотном диапазоне (от десятков герц до сотен килогерц).

Существует довольно большое число эмпирических выражений для определения значений коэффициента затухания звука β . Для расчетов, не требующих большой точности, можно использовать в интервале частот $f \sim 5\text{--}60$ кГц более простую эмпирическую формулу, предложенную Шихи и Хелли:

$$B = 0,036 f^{\frac{3}{2}}, \quad (1.9)$$

где f – частота звуковых колебаний, кГц.

Эта формула может быть использована только для оценочных расчетов, так как не учитывает зависимость величины β от солености и температуры воды. Более точные значения коэффициента β с учетом влияния этих параметров можно получить, используя формулу Шулькина-Марша:

$$\beta = \left(\frac{0,0203 S f_T f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{0,0293 f^2}{f_T} \right) \cdot \left(1 - 6,54 \cdot 10^{-5} \cdot h \right), \quad (1.10)$$

где S – соленость воды, ‰; f_T – функция температуры; h – глубина горизонта, на котором определяется величина β , м.

В свою очередь, функция f_T может быть определена из следующего выражения:

$$f_T = 21,9 \cdot 10^{6 - \frac{1520}{T+273}},$$

где T – температура воды, °C.

³ С учетом этого, посещая концерт, садитесь поближе к оркестру, ибо сидя далеко от него, будете воспринимать звуки высоких тонов (частот), например, скрипки, сильно ослабевшими и услышите искаженное эффектом поглощения звучание оркестра.

Известна также формула Франсуа-Гаррисона [1982], в которой, кроме солёности, температуры и глубины, учитывается водородный показатель рН. Сокращенно эта формула записывается в следующем виде:

$$\beta = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 f^2} + A_3 P_3 f. \quad (1.11)$$

Коэффициенты, входящие в эту формулу, определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$A_1 = (8,86/c) \cdot 10^{0,78\text{pH}-5}; P_1 = 1; f_1 = 2,8 \sqrt{\frac{S}{35}} \cdot 10^{4 - \frac{1245}{T+273}};$$

$$A_2 = (21,44S(1+0,025T)/c); P_2 = 1 - 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot H + 6,2 \cdot 10^{-9} \cdot h^2;$$

$$f_2 = \frac{8,17 \cdot 10^8 \cdot 10^{\frac{1990}{T+273}}}{1 + 0,0018(S - 35)};$$

$$A_3 = 4,937 \cdot 10^{-4} - 2,59 \cdot 10^{-5} T + 9,11 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,5 \cdot 10^{-8} T^3 \quad (\text{для } T \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$A_3 = 3,964 \cdot 10^{-4} - 1,146 \cdot 10^{-5} T + 1,45 \cdot 10^{-7} T^2 - 6,5 \cdot 10^{-10} T^3 \quad (\text{для } T > 20 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$P_3 = 1 - 3,83 \cdot 10^{-5} h + 4,9 \cdot 10^{-10} h^2.$$

На рис. 1.6 приведены для примера графики зависимости коэффициента β от частоты, рассчитанные по формулам (1.9), (1.10) и (1.11). При расчете графиков 1 и 2 температура воды принималась равной 4 °С, солёность воды равной 35‰, глубина равной 5 м. Параметр рН при расчете графика 1 принимался равным 8.

Анализ полученных графиков подтверждает нецелесообразность использования формулы (1.9) для рыбопоисковых приборов с рабочей частотой более 75 кГц (авторы рекомендуют ее использовать до частоты 60 кГц). Да и на более низких частотах отклонение значений коэффициента β , рассчитанных по этой формуле, от более точных выражений (1.10) и (1.11) составляет несколько децибел.

При подстановке в формулу (1.10) величин в дБ/км коэффициент затухания β будет получен в децибелах на километр. Большая часть имеющихся экспериментальных данных согласуется с результатами расчета по формуле (1.10), если частоты акустических колебаний превышают примерно 5 кГц.

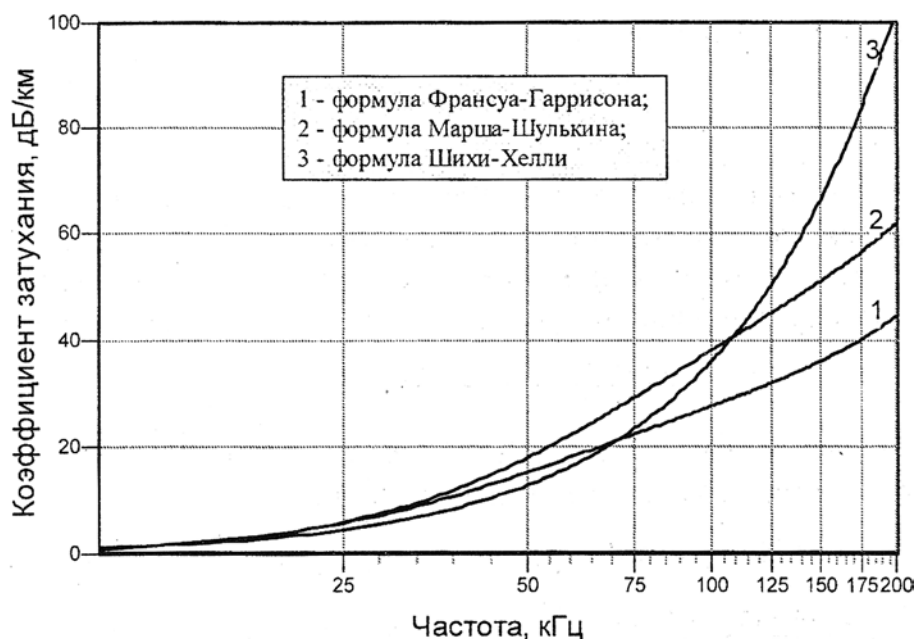


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента затухания звука, рассчитанная по трем различным формулам

Разница значений коэффициента β , рассчитываемых с помощью выражений (1.10) и (1.11), на частотах выше 40 кГц возрастает с увеличением частоты и на частоте 200 кГц составляет 18 дБ [Кудрявцев, 2001].

Формула (1.10) может быть записана в виде [Urik, 1962]:

$$\beta = \left(A' \frac{S f_T f^2}{f_T^2 + f^2} + B' \frac{f^2}{f_T^2} \right) \left(1 - 6,54 \cdot 10^{-4} f \right),$$

где $A' = 8,68 \cdot 10^3 A \approx 2 \cdot 10^{-2}$; $B' = 8,68 \cdot 10^3 B \approx 2,9 \cdot 10^{-2}$.

На низких частотах $f < f_T$ (f_T - температурно-зависимая частота релаксации) затухание определяется в основном первым членом формулы (не учитывая множитель, характеризующий изменение β с глубиной), т. е. первым членом суммы, и становится равным:

$$B = \frac{A'S}{f_T} f^2 = m' f^2,$$

т. е. β пропорционален квадрату частоты (это справедливо в диапазоне частот 5–40 кГц).

На высоких частотах при $f > f_T$ или на частотах > 1000 кГц преобладающим является второе слагаемое суммы и

$$B = \frac{B'}{f_T} f^2 = n' f^2,$$

т.е. β вновь пропорционален квадрату частоты.

В той области частот, в которой коэффициент затухания пропорционален квадрату частоты (т. е. для крайних областей применения формулы), он сильно зависит от температуры. Например, при температуре порядка 30°C он составляет приблизительно $1/3$ своего значения при температуре $4,5^\circ\text{C}$. В табл. 1.2 [Urik, 1962] приведен коэффициент m' для диапазона частот 5–40 кГц в зависимости от температуры (для этих значений температуры, соответственно, указаны частоты релаксации f_T) при $S = 35\%$.

Таблица 1.2. Зависимость коэффициента m' для диапазона частот 5–40 кГц

$T, ^\circ\text{C}$	$f_T, \text{кГц}$	$m' = (A'S)/f_T$
4,44	71	$9,2 \times 10^{-3}$
10,00	91	$7,2 \times 10^{-3}$
15,56	121	$5,4 \times 10^{-3}$
21,11	145	$4,5 \times 10^{-3}$
26,67	182	$3,6 \times 10^{-3}$
32,22	223	$2,9 \times 10^{-3}$

Гидростатическое давление уменьшает коэффициент затухания на величину, определяемую вторым множителем в уравнении (1.10). Считая давление в 1 атм эквивалентным давлением столба воды высотой 10 м при $T = 4^\circ\text{C}$, β на глубине h может быть определен по формуле:

$$\beta_h = \beta_0 (1 - 6,54 \times 10^{-5} h), \quad (1.12)$$

соответственно, при $h = 0$

$$\beta_h = \beta_0,$$

где β_0 – величина коэффициента затухания на нулевой глубине.

Затухание звука в воде уменьшается примерно на 2% на каждые 300 м увеличения глубины.

На рис. 1.7 показана зависимость затухания звука от частоты, определенная по формуле (1.10).

На рис. 1.8 дан поправочный множитель $\gamma(p)$, позволяющий вычислить β при любом значении p , как:

$$\beta(f) = \gamma(p)\beta_0(f).$$

Изменение гидростатического давления незначительно влияет на затухание и может быть легко учтено согласно формуле, приведенной выше, и графику на рис. 1.8. Изменения солености в пределах 2–3‰, характерные для открытого океана, мало влияют на величину β , и эта поправка должна учитываться лишь в тех случаях, когда S сильно отличается от принятого здесь значения.

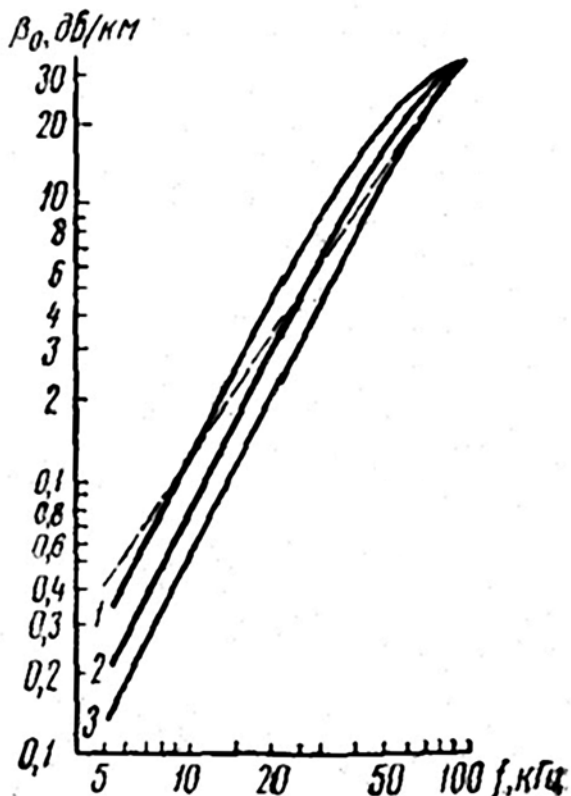


Рис. 1.7. Зависимость затухания акустических колебаний от частоты при $p = 0$; $S = 34\text{‰}$:
1 – $T = 0^\circ\text{C}$; 2 – $T = 10^\circ\text{C}$; 3 – $T = 20^\circ\text{C}$ (пунктир по формуле 1.9)

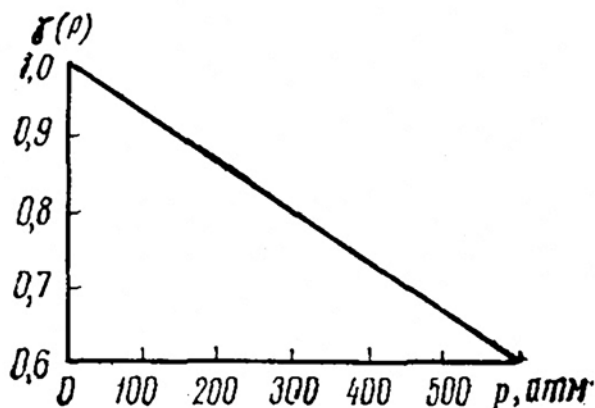


Рис. 1.8. Поправочный коэффициент к кривым 1, 2, 3 (рис. 1.7) для различных значений давления [Андреева, 1974]

На рис. 1.9 приведены графики зависимости β от частоты при различных температурах и солености, рассчитанные по формуле (1.11).

В табл. 1.3 приведены некоторые значения $\beta(f, T, S)$ в дБ/км при $p = 0$, вычисленные согласно (1.10). При $f < 5$ кГц эта формула, как правило, дает заниженные величины.

Таблица 1.3. Определение значения коэффициента затухания звука в дБ/км при $P = 0$

T, °C	Частота, кГц								
	2	4	6	10	20	30	50	70	100
0	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	4,4	8,8	18	26	38
10	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-1}$	3,0	6,3	15	25	38
20	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	2,0	4,4	11	20	35
30	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-1}$	1,4	3,0	8,1	15	28

Примечание. Более точные значения коэффициента β по формуле Марша – Шулькина

На рис. 1.7 нанесена пунктиром кривая $\beta(f)$, рассчитанная по формуле (1.9). При средних значениях глубин, температуры и частот она неплохо согласуется с более точными зависимостями (1.10).

По результатам своих исследований Доонан и др. [2003] предложили следующее выражение для определения коэффициента затухания звука в морской воде на частотах 10–120 кГц, используемых в рыбной акустике (при температуре менее 20°C):

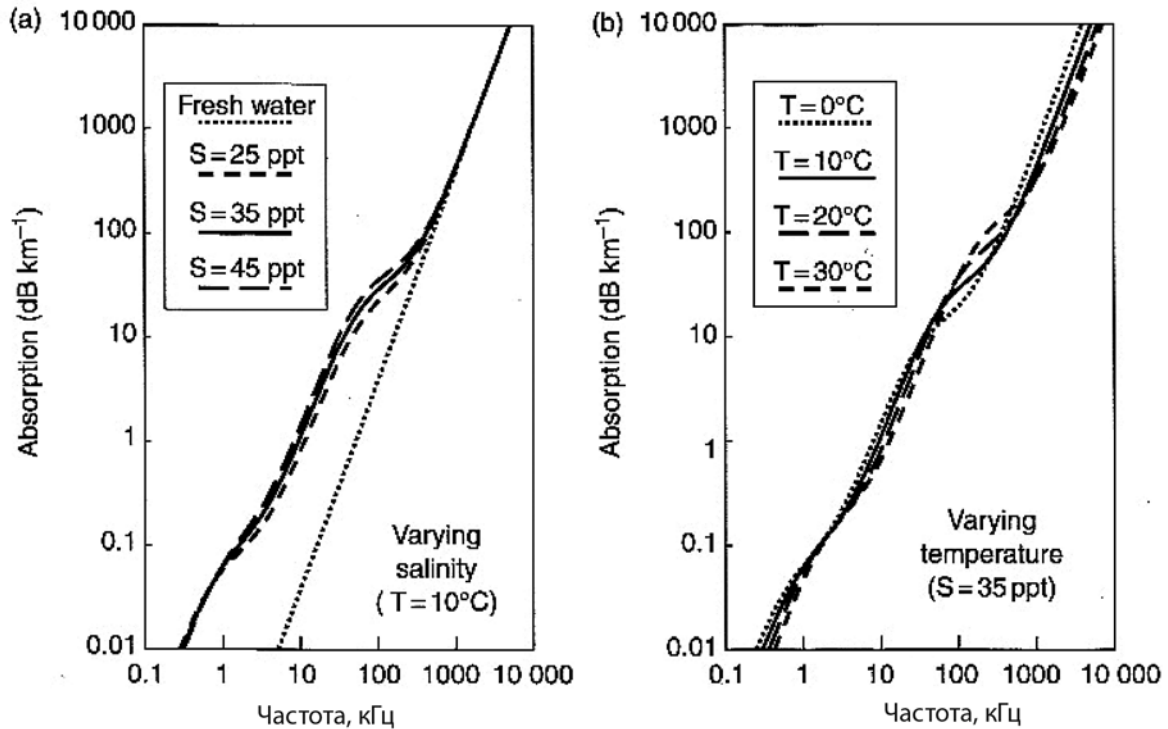


Рис. 1.9. Зависимость коэффициента затухания от частоты, рассчитанная по формуле Франсуа – Гаррисона [1982]:

a – при различных соленостях и температуре $T=10^\circ\text{C}$; *b* – при различных температурах и солености, равной 35‰.

$$\beta = A_2 P_2 f_2^2 (f_2^2 + f^2) / c + A_3 P_3 f^2, \text{ dBкм}^{-1}, \quad (1.13)$$

где f – частота, кГц; f_2 – частота релаксации; $A_2 = 22,19S(1 \pm 17T)$, T – температура в $^\circ\text{C}$, S – соленость в промилях; $f_2 = 1,8 \times 10^7 e^{-1818/(t+273,1)}$; $P_2 = e^{-1,76} \times 10^4 h$ (h в метрах); c – скорость звука определяется как $1412 + 3,21T + 1,19S + 0,167h$. Для A_3 и P_3 используются выражения, приведенные в формуле Франсуа-Гаррисона [1982].

Ослабление звуковой энергии при распространении в пузырьковом слое происходит в основном за счет поглощения и частично за счет рассеяния ее газовыми пузырьками. В зависимости от размеров пузырьков обладает той или иной частотой собственных колебаний (в Гц), величину которой можно определить по формуле:

$$f_0 = 330/a,$$

где a – радиус пузырька, см.

Тогда при $d = 0,01 \text{ см}^4$ резонансная частота радиальных пульсаций воздушного пузырька в поверхностных слоях воды будет $\omega_0 = 4,1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ или $f_0 = 65,4 \text{ кГц}$. Тогда, беря $c_1 = 340 \text{ м/с}$, получим, что $\sigma = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Геометрическое поперечное сечение рассматриваемого пузырька будет всего $7,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$. Таким образом, в режиме резонансных колебаний акустическое поперечное сечение рассеяния воздушного пузырька в воде возрастает в тысячи раз. Пузырек как бы и в самом деле увеличивается во много раз в размерах, что и дает эффект аномально большого рассеяния, не соответствующего геометрическим размерам пузырька. Таким образом, наибольшее рассеяние акустической энергии создается пузырьками, совершающими колебания на резонансной частоте, а также пузырьками, имеющими большие размеры. Кроме того, рассеяние тем больше,

⁴ Пузырьки большего диаметра рассматривать нет необходимости, так как существовать какое-либо продолжительное время в воде они не могут, быстро всплывая. Длительное время в воде могут существовать лишь очень маленькие пузырьки.

чем больше концентрация воздушных пузырьков. Так как в воде длительное время могут существовать во взвешенном состоянии пузырьки с диаметрами порядка сотых долей сантиметра, то это означает, что аномальное рассеяние и, как следствие, затухание могут испытывать акустические волны с частотами в десятки кГц. Это подтверждается и практическими наблюдениями. Например, рыболокаторы с рабочими частотами порядка десятков килогерц на заднем ходу судна, когда под днищем судна вода сильно насыщена воздушными пузырьками, не позволяют измерять даже небольшие глубины, в то время как такая аппаратура с рабочими частотами порядка 100 и более килогерц не испытывают такого эффекта.

Затухание акустической энергии в присутствии воздушных пузырьков усугубляется еще и тем, что пузырьки не только рассеивают, но и поглощают часть этой энергии. И это поглощение также является наибольшим на их резонансной частоте, и эффект поглощения для мелких пузырьков значительно больше, чем для больших. Для резонансных пузырьков отношение коэффициента поглощения γ к коэффициенту рассеяния α равно примерно $0,035 f_0^{1-2}$. Так, при $f_0 = 30$ к $\gamma/\alpha \approx 6$. Следовательно, для пузырьков, колеблющихся на резонансной ультразвуковой частоте, эффект поглощения больше эффекта рассеяния.

Что касается рассеяния звука в водной среде на мелких твердых неоднородностях, то какого-либо заметного рассеяния и, соответственно, затухания они не приносят. В отношении скоплений микроорганизмов (планктона), они как твердые неоднородности, также не вызывают заметного рассеяния звука. Но следует иметь в виду, что жизнедеятельность даже мелких организмов обязательно сопровождается выделением газов. В связи с повышенной насыщенностью воды мелкими газовыми пузырьками в местах скопления планктона все же происходит заметное рассеяние и, соответственно, затухание распространяющихся акустических волн.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С РАСПРОСТРАНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

2.1. СУПЕРПОЗИЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В реальных условиях использования средств рыбохозяйственной гидроакустики в одну и ту же точку (место) водной среды нередко одновременно приходят несколько акустических волн. Поэтому в таких ситуациях речь всегда идет о суммарном акустическом поле, образовавшемся одновременно пришедшими в данную точку среды отдельными волнами. Применительно к обычно применяемой в рыбном хозяйстве гидроакустической аппаратуре результирующая акустическая волна будет равна сумме отдельных одновременно присутствующих в данном месте среды акустических волн. Такое простое сложение волн (колебаний), т. е. суммарное колебание равно алгебраической сумме колебаний, создаваемых отдельными волнами, при котором они считаются накладывающимися независимо друг на друга, называется принципом суперпозиции или принципом простого суммирования волн. Принцип суперпозиции таким образом означает, что каждая из одновременно существующих в данном месте среды волн распространяется так, как будто не существует рядом с ней других волн, или, по-другому, одновременно существующие в данном месте среды волны не влияют друг на друга (не взаимодействуют друг с другом).

На первый взгляд такого быть не может, ведь по своей физической природе акустическая волна — это процесс распространения местных сжатий-растяжений среды, местных изменений давления и плотности. И если одна волна изменила давление и плотность в среде, то другая одновременно с ней существующая волна не может не заметить этого изменения. Следовательно, физические величины, характеризующие вторую волну, неизбежно должны зависеть от того, каковы были физические величины, характеризующие первую волну, и наоборот. Физическая природа акустических волн такова, что при одновременном существовании в данном месте среды они непременно будут влиять друг на друга. Действительно, это так, и они обязательно должны вступать во взаимодействие друг с другом. Однако взаимодействие взаимодействию рознь. Одно дело, когда в данном месте одновременно существуют сильные акустические волны — волны больших амплитуд, и другое, когда имеются одновременно слабые волны малых амплитуд. В первом случае их (волн) влияние друг на друга будет весьма ощутимым (нелинейная акустика). Волны больших амплитуд не подчиняются принципу суперпозиции. Волны же малых амплитуд, соответственно, мало отклоняют физические параметры среды (плотность, давление) от равновесных значений. Практически ничтожно малыми окажутся в связи с этим и изменения физических величин, присущие отдельным волнам из-за влияния их друг на друга. Определив простую сумму волн малой амплитуды, получим результирующую волну, практически не отличающуюся от результирующей волны, которая имеет место в реальности. В результате, если в данное место среды одновременно пришло n -е количество акустических волн малых амплитуд со звуковыми давлениями $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$, то согласно принципу суперпозиции результирующее акустическое давление P будет равно простой сумме акустических давлений отдельных волн:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i.$$

При этом нет ограничений по виду и форме волн, частотным диапазонам, соотношениям амплитуд и фаз. Однако результат суперпозиции, прежде всего, определяется тем, интерферируют ли когерентные или некогерентные волны. Когерентными называются волны, разность фаз которых не зависит от времени. Этому условию строго соответствуют монохроматические (синусоидальные) волны, частоты которых одинаковы.

Волны являются некогерентными, если разность их фаз зависит от времени. Ими в общем случае являются монохроматические волны разных частот, а также отрезки волн (акустические импульсы), начинающиеся и заканчивающиеся независимо друг от друга со случайными значениями фаз в моменты их начала и окончания.

Суперпонировать может большое количество отдельных волн. Рассматривать их суперпозицию – дело довольно громоздкое. Между тем основные закономерности суперпозиции четко просматриваются уже на примере суперпозиции двух волн. Рассмотрим две небольшие равные колеблющиеся с одной частотой поверхности или два источника гармонических колебаний А и Б (рис. 2.1 а) и точки X_a и $X_{об}$ в дальнем поле (т. е. когда дистанция $AX_a \gg AB$), расположенные на линии, перпендикулярной линии АБ. При AX_a и $AX_{об} \gg AB$ точки X_a и $X_{об}$ можно считать представляющими одну и ту же точку X (они показаны раздельными для удобства изложения). Если оба источника А и Б работают синфазно, то колебания в точке X от каждого из них (рис. 2.1 а) будут идентичными, а результирующее колебание – равным сумме двух колебаний с удвоенной амплитудой.

Другая ситуация будет в точке Y (Y_a и Y_b как и в предыдущем случае). Примем расстояние BY равным BX. Но $AY \neq BY$, а превышает его на величину отрезка AC, называемого разностью хода Δ . Если угол φ между AY и AX выбран таким, что $AC = \lambda/2$, то в любой момент времени две волны в точке Y равны по амплитуде, но противоположны по фазе и поэтому полностью гасят одна другую.

В точках в дальнем поле в промежутке между линиями, соединяющими источники с X и Y, эффект является промежуточным. Амплитуда результирующего колебания изменяется при изменении угла φ и в определенных направлениях будут иметь место максимумы, в других – минимумы. Рис. 2.1 б иллюстрирует простейший пример направленного действия двух ненаправленных источников колебаний.

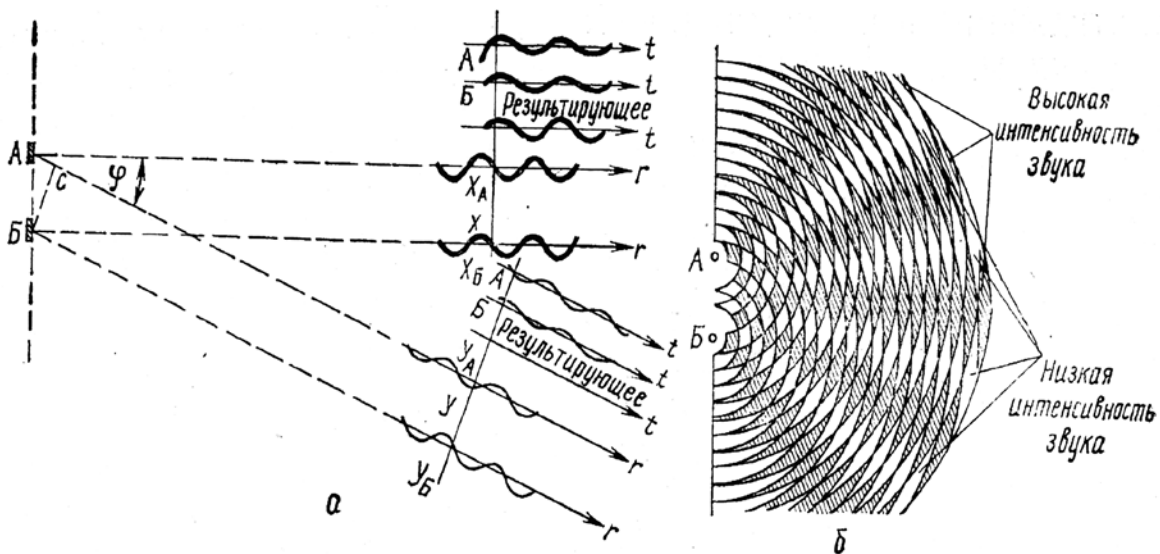


Рис. 2.1. Интерференция акустических колебаний:
а – в двух направлениях от источников А и Б; б – вокруг источников

Амплитуда результирующего колебания зависит от отношения разности хода Δ к длине волны λ . Если разность хода равна целому числу λ , то колебания складываются в фазе и амплитуда результирующего колебания равна удвоенной амплитуде слагаемых колебаний (или сумме амплитуд при неравных амплитудах каждого колебания). Таким образом, в точках синфазной когерентной суперпозиции акустическое поле будет усиливаться. Если разность хода равна нечетному числу длин полуволн $\lambda/2$, то колебания складываются в противофазе и в результате получится нуль (при неравных амплитудах результирующая амплитуда равна разности амплитуд слагаемых колебаний). Тогда можно сказать, что в точках противофазной когерентной суперпозиции акустическое поле будет ослабляться. В промежуточных ситуациях амплитуда результирующей волны соответственно будет принимать значения между максимально и минимально возможными. Отношение Δ к λ определяет разность фаз колебаний.

Явление суперпозиции когерентных волн часто называют интерференцией, а результат такой суперпозиции в пространстве – интерференционной картиной. В результате суперпозиции когерентных волн (интерференции) образуется новая, более сложная волна с амплитудой, зависящей от разности хода волн до точки сложения (разности фаз в точке сложения). В одних точках колебания усиливаются, а в других ослабляются или полностью уничтожаются в зависимости от соотношения частот, амплитуд и фаз составляющих колебаний.

Интерференция часто имеет место при распространении акустических волн. Именно ею обусловлено направленное действие одиночных и групповых излучателей. Например, вследствие интерференции акустических колебаний, отраженных от различных точек грунта, на приемной антенне эхолокационной гидроакустической аппаратуры может наблюдаться сильная флуктуация результирующего акустического импульса как по амплитуде, так и по его форме. Принцип суперпозиции имеет место и при формировании эхосигналов от скоплений рыбы.

2.1.2. Суперпозиция некогерентных волн

При сложении двух некогерентных волн фаза результирующей волны довольно сложным образом зависит от амплитуд, начальных фаз и разностей частот суперпонирующихся волн. Амплитуда результирующей волны как и при когерентной суперпозиции зависит от амплитуд суперпонирующих волн и разности их фаз. Однако важно заметить, что теперь эта разность фаз зависит не только от расстояний, пройденных волнами до точки сложения, но и от времени. Следовательно, и амплитуда результирующей волны будет изменяться со временем.

Принципиальное различие между суперпозицией когерентных и некогерентных волн состоит в том, что в первом случае амплитуда результирующей волны изменяется только при переходе из точки в точку среды, оставаясь неизменной в данной точке, а во втором амплитуда результирующей волны даже и в данной точке будет изменяться во времени. Насколько быстро с течением времени будет изменяться амплитуда результирующей волны при некогерентной суперпозиции зависит от того, какова разность частот суперпонирующих волн. Если она велика, то разность фаз будет быстро нарастать со временем и столь же быстро будет изменяться амплитуда результирующей волны. Если она мала, то разность фаз суперпонирующих волн будет медленно нарастать со временем и медленными в связи с этим будут изменения амплитуды результирующей волны.

При суперпозиции двух некогерентных волн, значительно различающихся по частоте, измерительный прибор прореагирует лишь на величину

$$P = \sqrt{p_{m1}^2 + p_{m2}^2},$$

где p_{m1}^2 и p_{m2}^2 – амплитуды суперпонирующих волн, которые уже от времени не зависят.

В реальности, конечно, суперпонировать могут не две, а большее количество некогерентных волн, имеющих различные частоты. Например, шумовое поле судна, как результат суперпозиции, создается огромным количеством одновременно существую-

щих под днищем акустических волн, создаваемых различными источниками с самым разнообразным сочетанием частот, амплитуд и фаз. Соответственно, суперпонирующие волны будут иметь и близкие и далекие друг от друга частоты, поэтому и амплитуда суммарной волны будет сложным образом и весьма быстро изменяться со временем. Вследствие этого практический результат суперпозиции некогерентных волн (результат ощущения, измерения) можно трактовать так: квадрат амплитуды акустического давления результирующей волны равен сумме квадратов амплитуд звукового давления суперпонирующих волн, а ее интенсивность – сумме интенсивностей. Тем самым при суперпозиции некогерентных волн практически суммируются интенсивности суперпонирующих волн. Это и есть так называемое энергетическое сложение волн.

Интенсивность результирующей волны при некогерентной суперпозиции не может быть меньше интенсивности даже самой сильной из суперпонирующих волн. На практике в результате суперпозиции некогерентных волн акустическое поле всегда усиливается в отличие от суперпозиции когерентных волн, при которой в одном месте среды может произойти усиление, а в другом – ослабление акустического поля. Много слабых волн при некогерентной суперпозиции могут образовать достаточно сильное результирующее акустическое поле, чего не бывает при когерентной суперпозиции.

2.2. Отражение и преломление акустических волн

Если на пути распространения акустических колебаний в среде встречается другая среда с другими акустическими свойствами, т. е. с другим акустическим сопротивлением ρc , то часть звуковой энергии отражается от границы раздела этих сред и возвращается в первую среду в виде отраженной волны. Остальная энергия, преломляясь, проникает во вторую среду и распространяется в ней, образуя преломленные волны. Явление отражения акустических волн от границы раздела двух сред широко используется для измерения глубин эхолотами и расстояний гидролокаторами, а также в рыболокации.

Если поверхность раздела достаточно велика по сравнению с длиной падающей на нее волны и является плоской или если размеры неровностей этой поверхности значительно меньше длины падающих (прямых) волн, то в этом случае применима лучевая теория, т. е. можно пользоваться понятием акустических или звуковых лучей и применять к ним законы геометрической оптики, а именно: угол падения $\alpha_{\text{п}}$ звукового луча равен углу отражения $\alpha_{\text{отр}}$;

$$\frac{\sin \alpha_{\text{п}}}{\sin \alpha_{\text{отр}}} = \frac{c_1}{c_2} = n,$$

где n – коэффициент преломления; $\alpha_{\text{отр}}$ – угол преломления; c_1 – скорость звука в первой среде; c_2 – скорость звука во второй среде.

При $c_2 > c_1$ $\alpha_{\text{отр}} > \alpha_{\text{п}}$ и преломленная волна будет отклоняться от перпендикуляра к поверхности раздела. При $c_2 < c_1$ преломленная волна будет приближаться к перпендикуляру. В том случае, когда падающая волна прибывает с направления, перпендикулярного к границе двух сред, отраженная и преломленная волны также распространяются вдоль этого направления (в одну и другую стороны). При некотором значении $\alpha_{\text{п}}$ угол преломления будет равен $\pi/2$. Звуковая волна при этом уже не будет проходить во вторую среду, а будет направлена вдоль границы раздела двух сред. При дальнейшем увеличении $\alpha_{\text{п}}$ звуковая волна будет полностью отражаться обратно в первую среду и наступит полное внутреннее отражение. Предельный $\alpha_{\text{п}}$, при увеличении которого уже наступает полное внутреннее отражение, называется критическим углом $\alpha_{\text{кр}}$ и определяется из равенства:

$$\sin \alpha_{\text{кр}} = n.$$

Равенство углов падения и отражения при плоской границе сохраняется при любых величинах $\alpha_{\text{п}}$. Направление распространения отраженной волны часто называют

направлением зеркального отражения. Если на границу раздела падает плоская волна, отраженная и преломленная волны тоже остаются плоскими. Угол расхождения сферической волны, падающей на плоскую границу раздела, после отражения не изменяется. Зеркальным направлением в этом случае считается направление отражения центрального осевого луча падающего пучка лучей. Если звуковая энергия, падающая на плоскую границу раздела сред, частично проникает через границу, соотношение давлений в падающей и отраженной волнах зависит от значений ρ и c в сопредельных средах и от α_n первичной звуковой волны. Оно описывается коэффициентом отражения по давлению V_p , который определяется как отношение амплитуд давления в отраженной p_1 и падающей p_2 волнах:

$$V_p = p_1/p_2.$$

Отношение интенсивности (силы) звука в отраженной волне $I_{отр}$ к интенсивности в падающей волне I_n называется коэффициентом отражения по интенсивности (по энергии) V_I

$$V_I = \frac{I_{отр}}{I_n},$$

причем, $V_I = V_p^2$; V_p определяется по формуле:

$$V_p = \frac{m \cos \alpha_n - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_n}}{m \cos \alpha_n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_n}},$$

где $m = p_2/p_1$; $n = c_1/c_2$.

При $\alpha_n = 0$

$$V_p = (m-n)/(m+n) = (\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1)/(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1). \quad (2.2.1)$$

Коэффициент прозрачности W определяется как:

$$W = \frac{2m \cos \alpha_n}{m \cos \alpha_n + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_n}}, \quad (2.2.2)$$

а при $\alpha_n = 0$ $W = (2m)/(m+n)$.

Из (2.2.1) следует, что V_p будет тем больше, чем больше разнятся между собой ρc двух смежных сред. В частных случаях при $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$, как и при $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$, практически $V_p \approx V_I \approx 1$ и акустическая энергия будет полностью отражаться, а при $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$ $V_p = V_I = 0$, так что вся акустическая энергия падающей волны будет переходить во вторую среду без отражения. Так как ρc воды примерно в 3500 раз больше ρc воздуха, то при падении акустической волны на границу вода-воздух (с любой стороны) почти вся падающая энергия отражается и не переходит в другую среду. При скальном грунте отношение акустических сопротивлений воды и дна составляет примерно 1:10, поэтому отношение давления в отраженной волне к давлению в падающей волне составляет примерно 0,8. Так как $V_p^2 = V_I$, то можно считать, что при нормальном падении волны в воде на скальный грунт порядка 2/3 акустической энергии отражается и 1/3 проходит в дно.

Из формулы (2.2.2) следует, что при нормальном падении коэффициент отражения зависит только от величин $\rho_1 c_1$ и $\rho_2 c_2$ и абсолютная величина его остается одинаковой как для прохождения акустических колебаний из первой среды во вторую, так и для обратного прохождения из второй среды в первую. Различие имеется только в его знаке. При $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$ коэффициент отражения (по давлению) при прохождении колебаний из первой среды во вторую имеет отрицательный знак. Это означает, что фаза давления при отражении меняется на обратную, т. е. происходит сдвиг фазы в отраженной волне на угол π . Колебательные скорости в отраженной и падающей волнах при этом, наоборот, имеют одинаковый знак и, следовательно, совпадают по фазе. В этом случае

говорят, что первая среда является акустически более жесткой, чем среда, лежащая за границей раздела; это, например, имеет место при падении звука из воды на границу ее с воздухом. При $\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2$ давления в отраженной и падающей волнах совпадают по фазе, а колебательные скорости, наоборот. В этом случае первая среда является акустически более мягкой, что соответствует, например, падению звука из воды на дно моря.

В указанных двух ситуациях коэффициенты отражения по численному значению одинаковы и стремятся к 1. Таким образом, для численного значения коэффициента отражения неважно, в какой среде ρc больше, в какой меньше. Для того чтобы он был больше, стремился к 1, важно, чтобы было велико различие в ρc сред. Понятно, что коэффициент преломления при этом, наоборот, будет малым, стремящимся к 0.

Когда ρc сред равны, отражение на границе раздела будет отсутствовать, и будет иметь место полное прохождение волны через границу раздела. При равенстве волновых сопротивлений граничащих сред и нормальном падении волна «не замечает» границы раздела, такая граница оказывается звукопрозрачной, хотя сами среды могут обладать далеко непохожими физическими характеристиками (например, одна среда может быть жидкостью, а другая твердым телом).

В табл. 2.2.1 приведены численные значения коэффициентов отражения по амплитуде и интенсивности при нормальном падении волны из воды в некоторые другие среды [Букатый, 2003].

Таблица 2.2.1. Коэффициенты отражения при нормальном падении волны, %

Среда	$\rho_2 c_2$, кг/м ² ·с	V_p	V_I
Вода-воздух	430	99,90	99,90
Вода-сталь	$39,00 \cdot 10^6$	92,60	85,70
Вода-гранит	$11,00 \cdot 10^6$	76,00	57,80
Вода-дерево	$5,60 \cdot 10^6$	57,80	33,40
Вода-лед	$3,98 \cdot 10^6$	45,20	20,50
Вода-песок	$3,73 \cdot 10^6$	42,60	18,20
Вода-ил	$2,14 \cdot 10^6$	17,60	3,10
Вода-рыбы	$1,65 \cdot 10^6$	4,80	0,20

Примечание. Волновое сопротивление морской воды $\rho_1 c_1 = 1,5 \cdot 10^6$ кг/м²·с

Как видно из таблицы 2.2.1, граница вода-воздух практически непроницаема для звука. Достаточно хорошо отражается звук от границ вода-металл, гранит-дерево. Несколько хуже от границ вода-лед, — песок. Плохо от границ вода-ил, — мясо рыбы. Это, правда, не означает, что и в самом деле столь слабое отражение зондирующего импульса от илистого дна или от рыбы.

Дело в том, что отражение акустических колебаний от дна моря и от рыбы не подчиняется тем простейшим законам, которые базируются на методах геометрической акустики. Эхосигналы от дна водной среды и косяка рыб образуются в результате суперпозиции элементарных отражений, которые, суммируясь, приводят к образованию довольно сильных эхосигналов. Так что на самом деле эффективные коэффициенты отражения от дна и от рыбных скоплений получаются существенно больше тех, которые приведены в табл. 2.2.1 для границ вода-ил и вода-рыба. К тому же отражение акустических колебаний от дна и рыбы зависит еще и от частоты волны, что методы геометрической акустики выявить не позволяют.

Можно отметить, что в гидроакустике зачастую вместо абсолютных значений коэффициентов отражения по давлению V_p и интенсивности V_I используют их значения $V = 20 \log V_p = 10 \log V_I$.

Выраженный в децибелах коэффициент отражения называют потерями при отражении.

На рис. 2.2 приведена зависимость модуля коэффициента отражения от α_n при $\rho_2/\rho_1 = 1,95$, $c_1/c_2 = 0,86$ и различном поглощении η в среде [Акустика океана, 1974].

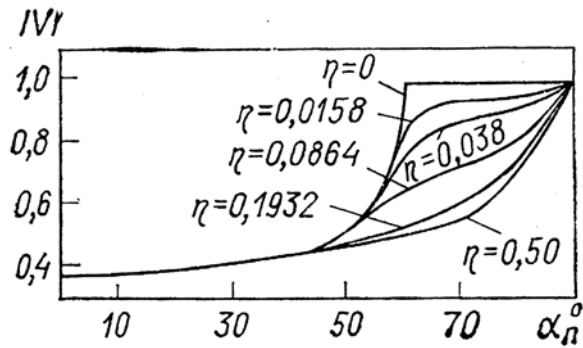


Рис. 2.2. Зависимость модуля коэффициента отражения звука от $\alpha_{\text{п}}$

Верхняя кривая соответствует образцу песчаного грунта ($\rho_2 \approx 2 \text{ г/см}^3$, $c = 1,58 \cdot 10^5 \text{ см/с}$) при отсутствии затухания звука в грунте.

Приведенные соотношения между падающими и отраженными волнами полностью справедливы лишь для случая, когда две однородные среды разделены плоской границей. Обе естественные границы океана (его поверхность и дно) во многом не отвечают такому условию. Поверхность океана можно рассматривать как плоскую границу лишь при акустических волнах, длина которых существенно превышает высоту неровностей взволнованной поверхности (длины акустических волн, применяемые в промысловой гидроакустике при активной рыболокации, изменяются примерно от 0,75 до 15 см). Отражение при этом будет происходить по законам геометрической оптики. Граничная поверхность для акустических лучей представляет собой как бы зеркало (по аналогии с оптикой), и само отражение называется зеркальным.

Если же поверхность, разделяющая две среды, имеет неровности, размеры которых того же порядка, что и длина падающих волн, то отражение не будет отвечать законам геометрической оптики. При этом рассеяние падающих акустических волн на этих неровностях будет происходить в разные стороны.

Такое отражение называется рассеянным или диффузным. В этом случае реальный коэффициент отражения от поверхности может оказаться заметно меньше 1. Подобные явления наблюдаются в реальных условиях и при отражении звука от дна. Коэффициент отражения от дна в сильной степени зависит от характера грунта. Наименьшие коэффициенты отражения дают ил, тина. Большой коэффициент отражения дают гранит и каменная плита. Коэффициент отражения по давлению от илистого грунта при нормальном падении волн колеблется примерно от 0,03 до 0,3 в зависимости от плотности дна, а также частоты акустической волны. Коэффициент отражения может быть выражен в децибелах. Пересчет в децибелы проводится по формуле $K_0 = 10 \log V_1 = 20 \log Vp$. Очевидно, что выраженный в децибелах коэффициент отражения будет иметь одинаковое значение как по интенсивности, так и по давлению со знаком минус, т. к. отраженная энергия меньше падающей. Свойства разных грунтов в различной степени отражать и поглощать акустические колебания различных частот используются для определения слоистости грунта.

Остановимся вкратце на процессах, происходящих при прохождении звуковых волн через границу вода-воздух и обратно. При падении звуковой волны из воды в воздух, когда $m = \rho_{\text{возд}}/\rho_{\text{вод}} = 0,0013$, $n^2 = c_{\text{вод}}^2/c_{\text{возд}}^2 = 20,6$,

W может быть записан как $W = (2m/n) \cos \alpha_{\text{п}}$. Максимальной прозрачность будет при $\alpha_{\text{п}} = 0$, когда $W \approx 5,7 \cdot 10^{-4}$, а $Vp \approx 1$. В противном случае получаются несколько различные результаты.

Так как при этом $m = \rho_{\text{вод}}/\rho_{\text{возд}} = 770$, $n = c_{\text{возд}}/c_{\text{вод}} = 0,22$, то $V_p \approx 1$, а $W \approx 2$. Это значит, что происходит практически полное отражение, причем у границы давление в отраженной волне по величине и знаку равно давлению в падающей волне. С другой стороны, давление в прошедшей волне (в воде) в два раза превышает давление в падающей волне из-за сложения падающей и отраженной волн в воздухе около поверхности воды. Так как давление остается непрерывным при переходе волн через границу, то этой же величине оно должно быть равно и в воде. Далее амплитуда давления убывает с глубиной экспоненциально. Таким образом, если звуковое давление при переходе волны из воды в воздух ослабляется примерно в 2000 раз, то при переходе из воздуха в воду оно

увеличивается в два раза. Вследствие этого рыбы могут хорошо воспринимать воздушные шумы, тогда как мы голоса рыб не слышим.

В то же время прозрачность границы вода-воздух по энергии не зависит от того, из какой среды на границу падает волна. Через границу в обоих случаях проходит лишь 1/1000 часть энергии.

Целесообразно рассмотреть, как будет распространяться акустическая волна в слоисто-неоднородной среде, когда на пути ее встретится n -е количество границ раздела (рис. 2.3). И здесь на каждой из границ будет наблюдаться в общем случае частичное отражение и частичное преломление акустического луча. Тогда угол преломления на предыдущей границе является углом падения для следующей границы. Поэтому для n -й границы раздела можно записать:

$$\sin\alpha_{i1}/\sin\alpha_{in} = c_1/c_n, \quad (2.2.3)$$

где α_{i1} и c_1 – угол падения и скорость акустической волны в первом слое; α_{in} и c_n – угол падения и скорость акустических колебаний в n -ом слое.

Выражение (2.2.3), согласно которому отношение синусов углов падения в любых двух точках акустического луча равно отношению скоростей звука в этих точках, называется законом Снеллиуса. Он позволяет узнавать направление распространения звукового луча, т. е. угол падения в любом слое среды, если известно распределение скорости звука по слоям и задан начальный угол падения $\sin\alpha_{in} = c_1/c_n \cdot \sin\alpha_{i1}$.

Понимание явления полного внутреннего отражения и знание закона Снеллиуса имеет важное прикладное значение при изучении распространения акустических волн в водной среде, т. к. ее можно представить в виде совокупности плоскопараллельных слоев с изменяющейся от слоя к слою скоростью акустических колебаний (гл. 3.1).

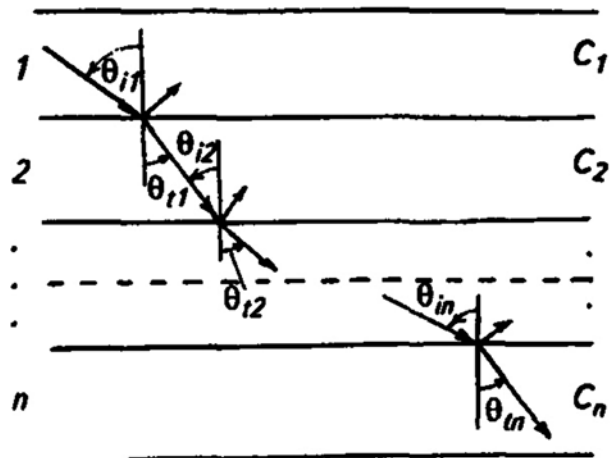


Рис. 2.3. Прохождение звука через плоскопараллельные слои

2.3. ПРОХОЖДЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ

Промежуточным слоем называют слой среды, волновое сопротивление которого отлично от ρc окружающей его среды. В рыболокации ситуация с прохождением акустических волн через промежуточный слой имеет место при размещении антенн гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры вертикального действия стационарно в днище судна, а также при расположении антенн гидролокаторов в обтекателях различной конструкции.

Внутри корпуса обтекателя и вне его находится вода, а стенка обтекателя является промежуточным слоем. Поэтому полезно знать, как влияет такой промежуточный слой на прохождение акустических колебаний через него, от чего зависит его акустическая проницаемость.

Как рассматривается в работе Букатого [2003], при прохождении зондирующего импульса и эхосигнала через слой в нем будет образована стоячая волна вследствие суперпозиции двух встречных волн – волны, проникшей в слой, и волны, отразившейся от нижней границы слоя и распространяющейся вверх (рис. 2.4). Так как слой является твердым (например, стальным или пластиковым), а сверху и снизу находится вода, то для волн внутри слоя отражающие границы следует считать, во всяком случае, близки-

ми к акустически мягким – волновое сопротивление слоя (твердого тела) существенно больше волнового сопротивления воды. Следовательно, суперпозиция встречных волн внутри слоя приведет к образованию стоячей волны, амплитуда A_{mc} колебательной скорости которой может быть выражена как

$$A_{mc} = V_m \cos k_2 x, \quad (2.3.1)$$

где V_m – некоторое максимальное значение амплитуды стоячей волны, зависящее от амплитуд встречных волн в теле слоя; k_2 – волновое число в теле слоя.

Расположим ось x направленной вниз и поместим начало координат на верхней границе слоя (рис. 2.4). Тогда в соответствии с (2.3.1) на верхней границе слоя ($x = 0$) амплитуда колебательной скорости будет максимальной и равной V_m , т. е. здесь будет пучность колебательной скорости. На нижней границе слоя ($x = l$) амплитуда колебательной скорости будет:

$$A_{mc} = V_m \cos k_2 l. \quad (2.3.2)$$

Согласно (2.3.2) имеем, что пучности колебательной скорости, а следовательно, и максимумы кинетической энергии, обуславливающей передачу колебаний воде

ниже слоя, т. е. прохождение акустических колебаний через слой, будут наблюдаться на нижней границе в том случае, если выполняется условие

$$k_2 l = n\pi,$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

или равносильное ему условие

$$l = n\lambda_2/2,$$

где λ_2 – длина волны в материале слоя.

Таким образом, когда по толщине слоя укладывается целое число длин полуволн, создаются условия для полного прохождения звука через него. Следовательно, для максимизации прохождения акустических колебаний через корпус обтекателя необходимо толщину его корпуса делать равной половине длины волны в материале корпуса обтекателя. Для стального корпуса обтекателя при тех частотах, которые применяются в гидролокаторах, это будет означать, что толщины их должны быть слишком большими (особенно в случае низкочастотной аппаратуры), поэтому на практике идут по другому пути – пути разумного, допустимого с точки зрения прочности, снижения толщины промежуточного слоя и оценки при этом потерь акустической энергии на промежуточном слое. Эти потери оценивают коэффициентом прохождения ε_t , которым называют отношение интенсивности I_t , прошедшей через слой волны к интенсивности I_i , падающей на слой волны,

$$\varepsilon_t = I_t/I_i.$$

ε_t при произвольной толщине l слоя и произвольных волновых сопротивлениях окружающей среды и слоя при нормальном падении волны на слой может быть определено по формуле Рэлея, впервые решившего задачу о прохождении звука через промежуточный слой [Букатый, 2003],

$$\varepsilon_t = 4/4 \cos^2(2\pi l/\lambda_2) + (q+l/q)^2 \sin^2(2\pi l/\lambda_2), \quad (2.3.3)$$

где $q = \rho_1 c_1 / \rho_2 c_2$.

Из формулы Рэлея следует, что при толщине промежуточного слоя, равной половине длины звуковой волны, в нем независимо от волновых сопротивлений слоя и окру-

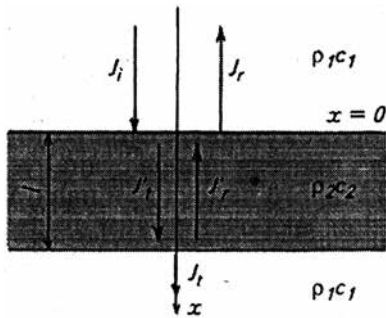


Рис. 2.4. Прохождение звука через промежуточный слой

жающей его среды коэффициент прохождения действительно равен 1. Из (2.3.3) также следует, что при $q = 1$, т. е. при равенстве волновых сопротивлений слоя и окружающей среды коэффициент преломления также равен 1. Изложенное справедливо и для материалов, защищающих излучающие поверхности антенн рыболокаторов вертикального действия. К примеру, у рыболокатора «Прибой-101Э» для стального промежуточного слоя ($\rho_2 = 7800 \text{ кг/м}^3$, $c_2 = 5500 \text{ м/с}$) при толщине его $l = 3 \text{ мм}$ коэффициент прохождения на частоте 25,5 кГц составлял около 50%. Как видно даже при столь тонкой стальной мембране, расположенной перед антенной, потери акустической энергии получаются весьма ощутимыми. Поэтому создание звукопрозрачных мембран для стационарно устанавливаемых в корпусе судна антенн и звукопрозрачных обтекателей для антенн рыбопоисковых гидролокаторов является важной задачей. При этом следует иметь в виду и возможное обрастание их поверхностей. Сильное обрастание стальных обтекателей гидролокаторов наблюдалось при их использовании во время лова рыбы в промысловых районах у Африканского побережья Атлантики.

Интересное конструктивное решение задачи создания звукопрозрачных обтекателей для антенн рыболокаторов горизонтального действия было найдено специалистами норвежской фирмы Симрад. Обтекатель был выполнен из эластичной резины, отшлифованной и армированной стальной проволокой для увеличения прочности, волновое сопротивление которой было близко к ρc морской воды (ρc). В исходном положении обтекатель не заполнен водой и находится вблизи корпуса судна. Перед включением гидролокатора с помощью насоса в патрубке шахты ПВУ создается давление порядка 101 кПа и обтекатель заполняется водой. Примерно через 1 мин он приобретает обтекаемую полукаплевидную форму и акустическая система вдвигается в него. Пока обтекатель не принял своей формы специальный датчик его наполнения служит для преждевременного опускания антенны.

При такой конструкции обтекателя вероятность повреждения антенны меньше, чем при применении выдвигного и стационарного обтекателей.

В тракте вертикальной локации комплекса «Сарган» («Сарган-Э») для защиты пьезокерамической антенны и обеспечения звукопрозрачности была применена мембрана из нержавеющей стали, представляющая собой сотообразную конструкцию (рис. 2.6). Отверстия в мембране были расположены вплотную друг к другу и имели воронкообразную форму. Нижняя сторона мембраны, соприкасающаяся с забортной водой, была прикрыта резиной. Над мембраной в специальном танке, ввариваемом в днище судна и заполненном водой, располагалась антенна. Звукопрозрачность такой мембраны обеспечивалась за счет трансформации ее волнового сопротивления вследствие эффекта уменьшения скорости звука при прохождении его в узких трубах (рис. 2.6). Эта мембрана толщиной около 20 мм была достаточно прочна и практически звукопрозрачна.

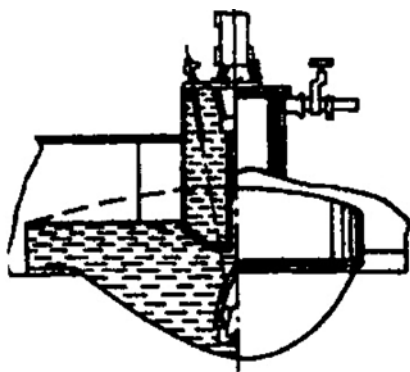


Рис. 2.5. Стационарный обтекатель из эластичной резины

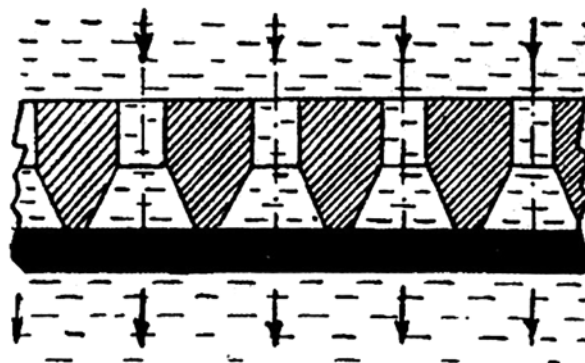


Рис. 2.6. Звукопрозрачная мембрана гидроакустической аппаратуры вертикальной локации «Сарган-Э».

В работе Симмон и Макленан [2005] отмечается, что в последнее время акустические преобразователи проектируются со слоем различных материалов на излучающей поверхности. Толщина этого слоя близка к четверти длины волны (на частоте, близкой к центральной частоте полосы пропускания частот аппаратуры) для достижения лучшего согласования акустических сопротивлений преобразователя и воды. Более точно этот слой имеет акустический импеданс, соответствующий геометрическому среднему импедансов основной части преобразователя и воды. Такой слой толщиной $\frac{1}{4} \lambda$ существенно улучшает передачу акустической энергии в воду по сравнению с обычными конструкциями, в которых имеется лишь одна граница с определенным рассогласованием между твердыми и жидкими средами.

2.4. ДИФРАКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН. ЗОНА АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНИ

Если длина акустической волны сравнима или больше размеров препятствия, встречающегося на пути ее распространения, то уже нельзя пользоваться законами геометрического распространения и отражения волн по прямым линиям — лучам. При этом следует учитывать явление дифракции, т. е. огибание акустическими волнами препятствий, встречающихся на их пути, и появление за счет этого волн там, где согласно геометрическому построению должна бы быть акустическая тень (рис. 2.7).

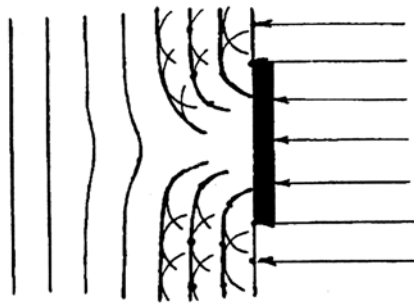


Рис. 2.7. Дифракция акустических волн

В результате дифракции за препятствием в области геометрической тени также будут наблюдаться акустические волны, хотя и более слабые, чем в основном акустическом поле. Прохождение звука за препятствие, размеры которого существенно превышают λ , сопровождается незначительной дифракцией и образованием зоны акустической тени. Если размеры препятствия сравнимы с длиной волны λ и только в несколько раз превышают ее, то у концов препятствия будет наблюдаться частичная дифракция волн. Область акустической тени при этом будет меньше. Если размеры препятствия мень-

ше длины волны, акустические волны будут огибать его. Например, если тело представляет собой жесткий шар, то при диаметре его меньше 0,1 длины волны, присутствие шара практически не влияет на процесс распространения волны.

Вследствие дифракции часть энергии прямой акустической волны проникает за препятствие, что приводит к уменьшению интенсивности отраженной волны. Если размеры препятствия меньше длины волны, то эхо от такого препятствия будет очень слабым из-за малой интенсивности отраженной волны. Так, например, в воде практически нельзя получить отражения звуковых волн частотой $f = 1000$ Гц ($\lambda = 1,5$ м) от шара диаметром 1 м, т. к. они будут огибать его. Ориентировочно можно считать, что при размерах препятствия, в три раза больших длины волны, применимы геометрические законы отражения акустических волн. При меньших размерах препятствия уже следует учитывать дифракцию волн.

ГЛАВА 3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В МОРЕ

3.1. РЕФРАКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Возможности средств рыбохозяйственной гидроакустики при горизонтальном и наклонном направлениях излучения и приема звука нередко в сильной степени зависят от условий распространения акустических колебаний в воде. Море — неоднородная среда, т. е. среда, в которой скорость звука изменяется с глубиной. Подобную среду принято называть слоисто-неоднородной. На свойства воды как звукопроводящей среды существенно влияет степень ее нагретости и солености.

Ранее было показано, что скорость звука в толще морской среды может существенно изменяться с глубиной. Рассмотрим влияние вертикальных изменений скорости звука на распространение звуковых волн.

Целый ряд факторов вызывает изменения температуры, подчиняющиеся закономерностям, которые могут быть распространены на большие расстояния, например, на всю глубину океана, а также изменения случайного характера.

Общая соленость вод океана близка к 35%, ее величина в открытом океане варьирует незначительно (на 2–3%) в поверхностных слоях и еще меньше в глубинах океана. В полузакрытых морях соленость может сильно отличаться от указанной выше, однако временные изменения ее, как правило, также весьма небольшие.

Поскольку температура оказывает наиболее сильное влияние на скорость звука в верхних слоях морской среды (которая в основном и представляет интерес для рыбохозяйственной гидроакустики) со значительными температурными градиентами и довольно слабым влиянием гидростатического давления вертикальное распределение скорости звука приблизительно повторяет вертикальное распределение температуры с небольшим отклонением за счет солености.

Из-за неоднородности физических свойств морской среды скорость распространения звука в ней подвержена значительным изменениям, особенно в вертикальном направлении (по глубине). В среде с изменяющейся скоростью звука акустическая энергия распространяется не по прямым, а по искривленным лучам, т. е. наблюдается рефракция звука. Рефракция звука в морской среде является следствием преломления акустических лучей при переходе их из одного слоя воды в другой, отличающийся скоростью распространения акустических волн. Построение и расчет рефракционных траекторий распространения звука при решении практических задач гидроакустики базируются на методах лучевой акустики, позволяющих достаточно точно определять траекторию звуковых лучей в том случае, если на длине акустической волны коэффициент преломления n (или скорость звука c) можно считать неизменным. Это требование выражается неравенством:

$$g_c \lambda / n < 1.$$

Указанное условие со значительным запасом выполняется для средств рыбохозяйственной гидроакустики, если считать, что в морской среде наибольшие величины градиента g_c скорости звука c наблюдаются в слое скачка в низких широтах; там они отрицательны и могут достигать $-3-4 \cdot 10^{-3}$ 1/м.

В плоскослоистой среде акустический луч при любой глубине h должен удовлетворять соотношению (закон Снеллиуса):

$$\frac{\cos \chi(h_0)}{c(h_0)} = \frac{\cos \chi(h)}{c(h)} = \frac{\sin \alpha(h)}{c(h)} = \text{const}, \quad (3.1)$$

где $\chi(h)$ — угол скольжения, составляемый лучом с горизонтальной плоскостью; $\alpha(h)$ — угол падения, составляемый лучом с вертикальной плоскостью.

Из выражения (3.1) следует, что, если луч пересекает горизонты с разными значениями скорости звука, то и углы наклона его на этих горизонтах также различны. Рефрагирующий луч всегда поворачивает в сторону уменьшения скорости звука и угол $\chi(h)$ уменьшается, если уменьшается величина $c(h)$. Если в глубине толщи водной среды есть область, соответствующая минимуму скорости звука, то звуковые лучи, распространяющиеся как выше, так и ниже ее, поворачивают в сторону $h(c_{\text{мин}})$, и акустическая энергия концентрируется на этих глубинах. Область глубин с минимумом скорости звука называется подводным звуковым каналом (ПЗК), а горизонт, соответствующий $c_{\text{мин}}$, — осью канала. Из выражения (3.1) также можно видеть, что если акустический луч пересекает два равных горизонта с одинаковыми значениями скорости звука, то независимо от формы кривой $c(h)$ между этими горизонтами, разности их глубин и т. д., углы наклона луча на горизонтах с одинаковыми значениями c равны между собой.

Степень непрямолинейности траектории, т. е. кривизна луча тем больше, чем больше градиент скорости звука. Определим соотношение между радиусом кривизны луча R_k и градиентом скорости звука. R_k в пределах бесконечно малого элемента траектории луча dR (рис. 3.1 а), может быть записан в виде:

$$R_k = \left| \frac{dR}{d\chi} \right|.$$

Величина $dR = dh / \sin \chi$ (рис. 3.1 б) и, следовательно,

$$R_k = \left| \frac{1}{\sin \chi} \cdot \frac{dh}{d\chi} \right|.$$

Запишем выражение (3.1) в виде:

$$c_0 \cos \chi_0 = c \cos \chi,$$

где χ_0 и c_0 — угол скольжения и скорость звука соответственно на горизонте h_0 нахождения источника.

После дифференцирования по h получаем:

$$c_0 \sin \chi_0 \cdot (d\chi_0 / dh) = \cos \chi_0 \cdot (dc / dh)$$

или

$$|\sin \chi_0 (d\chi_0 / dh)| = (\cos \chi_0 / c_0) |dc / dh| = g_c \cos \chi_0,$$

где g_c — относительный градиент скорости звука.

$$R_k = l / g_c \cos \chi_0.$$

Для каждого луча $\cos \chi_0 = \text{const}$ и радиус кривизны обратно пропорционален g_c . При постоянстве градиента $R_k = \text{const}$ и траектория луча — есть дуга окружности.

Пользуясь соотношением (3.1), можно получить и выражение, связывающее форму луча и характеристики среды для произвольной зависимости $c(h)$, называемое уравнением траектории луча [Акустика океана, 1974; Андреева, 1974]. На рис. 3.1 б бесконечно

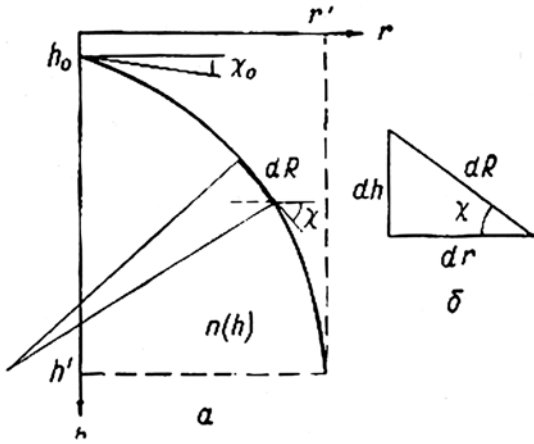


Рис. 3.1. Звуковой луч в рефрагирующей среде: a – к определению радиуса кривизны; b – элемент траектории луча

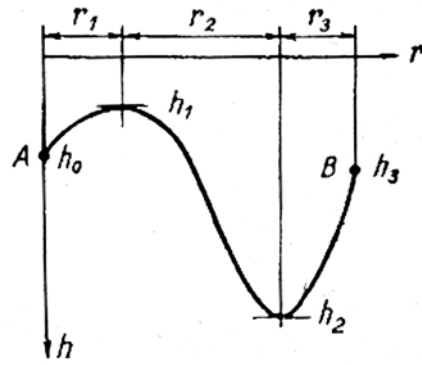


Рис. 3.2. Звуковой луч в рефрагирующей среде при наличии минимумов и максимумов

малые величины dr и dh являются проекциями элемента луча dR на оси координат, а χ определяет угол скольжения луча в пределах выбранного элемента

$$dr = \frac{dh}{\operatorname{tg} \chi}.$$

Проинтегрируем обе части равенства по глубине от h_0 (глубина источника) до некоторой h' (см. рис. 3.1 a). Тогда пройденное лучом расстояние по горизонтали равно [см. формулу (2.2.3) и (3.1)]

$$r' = \int_{h_0}^h \frac{dh}{\operatorname{tg} \chi(h)};$$

$$\operatorname{tg} \chi(h) = \frac{\sin \chi(h)}{\cos \chi(h)} = \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \chi(h)}{\cos^2 \chi(h)}};$$

$$\cos \chi(h) = \frac{c(h)}{c_0} \cdot \cos \chi_0 = \frac{\cos \chi_0}{n(h)}.$$

Следовательно, общее уравнение, определяющее траекторию луча в вертикальной плоскости, можно записать в виде:

$$r = \cos \chi_0 \int_{h_0}^h \frac{dh}{\sqrt{n^2(h) - \cos^2 \chi_0}}. \quad (3.2)$$

При этом следует иметь в виду, что расширение пределов интегрирования в уравнении (3.2) допустимо лишь до тех пор, пока рассматриваемый участок траектории звукового луча идет вниз или вверх монотонно, т. е. пока функция $h(r)$ не имеет экстремумов между глубинами h_0 и h . Правильный результат при траектории луча с экстремумами, например, как показано на рис. 3.2, может быть получен, если разбить весь участок траектории на отрезки, разграниченные экстремальными точками, вычислять интегралы в пределах каждого отрезка отдельно, а результаты суммировать. Интеграл в выражении для $r(h)$ зависит от вида функции $c(h)$ или $n(h)$. Он может быть легко вычислен в интервалах глубин, где градиент скорости звука постоянен.

При построении траекторий акустических лучей, выходящих из источника, или лучевых картин наиболее широко распространен способ кусочно-линейной аппроксимации, основанный на рассечении рассматриваемой глубины горизонтальными пло-

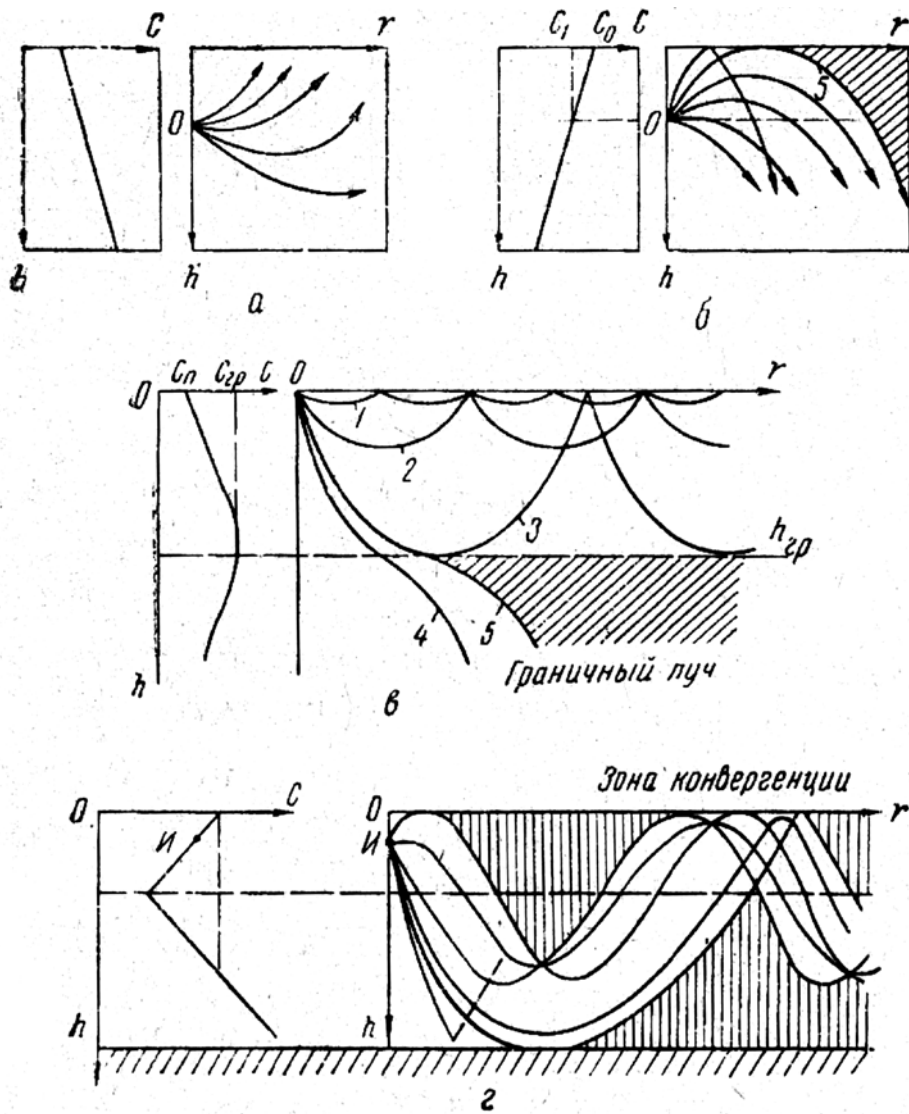


Рис. 3.3. Лучевые картины:

$a, б$ — простейшего типа (положительная и отрицательная рефракции); $в$ — в условиях приповерхностного канала; $г$ — подводного звукового канала (при нахождении источника выше оси канала)

скостями на ряд интервалов (слоев), в каждом из которых градиент скорости звука считается постоянным. В пределах каждого слоя вычисляется участок траектории лучей, а на границах слоев эти участки «сшиваются» с сохранением непрерывности угла скольжения.

На рис. 3.3 a и $б$ изображены простейшие лучевые картины, когда скорость звука равномерно увеличивается с глубиной (положительная рефракция) и равномерно уменьшается (отрицательная рефракция). Как видно из рис. 3.3 $б$, ни один луч, выходящий из источника, не попадает в зону, находящуюся за пределами луча 5. Это значит, что в эту зону звук от источника практически не будет проникать независимо от мощности, направленности и ориентации излучателя. Указанная область называется зоной акустической тени, а зона вокруг источника, где проходят звуковые лучи, называется ближней освещенной (озвученной) зоной. Луч, касающийся поверхности и разграничивающий освещенную зону и зону тени, называется граничным лучом.

Следует отметить, что в зоне тени, несмотря на отсутствие прямых лучей, существует слабое звуковое поле, возникающее как из-за дифракционных явлений на границе

зон, так и вследствие рассеяния звуковых волн на случайных неоднородностях среды, неровной поверхности воды и отражения их от дна.

При отсутствии отражения от дна и поверхностного рассеяния и при условии линейного уменьшения скорости звука с глубиной интенсивность акустической энергии в области тени по мере удаления от ее границы убывает очень быстро (например, при $G_c = 0,35 \text{ 1/c}^1$ и $g_t = 0,1 \text{ град/м}$ и $f = 20 \text{ кГц}$, ослабление силы звука равно 250 дБ/км ; при $f = 15 \text{ кГц}$ – 210 дБ/км , $f = 50 \text{ кГц}$ – 280 дБ/км и т. д.).

Условия отрицательной рефракции являются весьма неблагоприятными для работы многих гидроакустических приборов. Приемные системы, находящиеся в зоне тени, могут либо совсем не «слышать» сигналы излучателя, либо слышать их сильно ослабленными. Эхосигналы от отражающих звук объектов исчезают или резко ослабляются на устройствах отображения эхолотаторов сразу же, как только отражающий объект пересечет граничный луч и попадет в зону тени. При постоянной глубине источника звука горизонтальное расстояние до границы тени зоны существенно зависит от глубины, где располагается приемный гидрофон или отражающий объект.

При перемещении источника колебаний от поверхности воды вниз граница зоны тени будет отдаляться, а освещенная область увеличиваться, и наоборот, при подъеме источника озвучиваемая зона сокращается.

При положительной рефракции не создается рефракционных ограничений на дальность распространения акустической энергии, не наблюдается расфокусировки акустического пучка и отсутствуют зоны тени. Все это создает более благоприятные условия для работы гидроакустической аппаратуры при горизонтальной локации.

В ряде случаев наблюдается возрастание скорости звука в поверхностном слое водной среды и убывание ее от нижней границы этого слоя (рис. 3.3 в). Такой характер вертикального распределения c связан чаще всего с наличием изотермии в поверхностных слоях, при которой за счет влияния давления на скорость звука в этих слоях отмечается положительный g_c . Типичная для данных условий лучевая картина приведена на рис. 3.3 в. Часть звуковых лучей все время остается в некотором приповерхностном слое воды с положительным g_c , называемым приповерхностным звуковым каналом.

На любом расстоянии от источника каналные лучи остаются в интервале глубин от 0 до $h_{гр}$, где $h_{гр}$ – глубина простираения положительных градиентов. В горизонтальном же направлении расхождение лучей остается таким же, как в однородной среде, и соответствует сферическому закону. Звуковую энергию, распространяющуюся в приповерхностном канале, можно представить «растекающейся» по поверхности вертикального цилиндра; ось этого воображаемого цилиндра проходит через точку излучения, длина образующей равна $h_{гр}$, а его радиус непрерывно увеличивается и равен $r = ct$. На достаточно большом удалении от источника можно считать, что интенсивность звука убывает обратно пропорционально расстоянию $\approx r$, а не квадрату расстояния, как в однородной среде. Такой закон убывания силы звука называется цилиндрическим и справедлив для каналных условий дальнего распространения звука в океане.

Участок луча между двумя последовательными выходами к поверхности называется *циклом*. Горизонтальная длина цикла d зависит от угла выхода луча из источника. При данном изменении $c(h)$ она тем больше, чем больше угол выхода луча. Одновременно с увеличением длины цикла растет и глубина точки заворота, глубина проникновения лучей в толщу каналного слоя. Наиболее пологие лучи стелются вдоль поверхности; более крутые достигают нижней границы канала, т. е. глубины $h_{гр}$, где возрастание скорости звука сменяется убыванием (либо может находиться дно моря в мелководных районах). Луч, оставивший источник под таким углом, что он становится горизонтальным у основания или нижней границы канала, можно назвать граничным каналным лучом; все лучи, выходящие из излучателя под меньшими углами, остаются в слое; все лучи, оставляющие источник под большими углами, не захватываются каналом и ухо-

¹ Абсолютный градиент скорости звука.

дят в область отрицательных градиентов. Ниже $h_{гр}$ знак кривизны этих лучей изменяется, они начинают отклоняться вниз (загибаются) и уходят из приповерхностного канала. Точки пересечения лучами границы канала являются точками перегиба лучей. Граничный каналный луч как бы расщепляется. Верхняя половина его загибается к поверхности моря, а нижняя — ко дну. Эффективность действия канала обычно оценивается интервалом углов выхода лучей, захватываемых каналом. Чем больше этот интервал, тем сильнее канал, тем он эффективнее. В низких и умеренных широтах указанный интервал, как правило, не превышает нескольких градусов.

При указанных условиях образуются значительные зоны «тени» ниже слоя приповерхностного звукового канала и происходит расфокусировка акустического пучка излучателя. В связи с неидеальностью нижней границы канала и из-за рассеяния акустической энергии от поверхности взволнованного моря ослабление энергии в этой зоне «тени» происходит медленнее, чем при отрицательной рефракции. Поэтому отмеченную на рис. 3.3 в зону «тени» иногда называют зоной полутени.

3.2. ПОДВОДНЫЙ ЗВУКОВОЙ КАНАЛ

Подводный звуковой канал (рис. 3.3 з) определяется как слой в толще воды, в пределах которого звуковые лучи распространяются, испытывая многократное внутреннее отражение. Если излучатель помещен на оси канала, звуковой луч, вышедший из источника в сторону поверхности моря, будет описывать параболическую кривую, обращенную своей выпуклостью к поверхности (отрицательная рефракция). Испытав полное внутреннее отражение, луч достигнет оси канала, ниже которой закон изменения скорости с глубиной будет обратным (положительная рефракция). Траектория звукового луча изогнется выпуклостью ко дну, и луч, вновь испытав полное внутреннее отражение, достигнет оси канала. Далее картина будет повторяться. Аналогично будут вести себя и звуковые лучи, вышедшие из излучателя в сторону дна. В результате акустическая энергия концентрируется вдоль оси канала, что позволяет получать большие дистанции обнаружения при использовании буксируемых антенн в случае погружения их на ось канала.

В реальных условиях весьма распространена ситуация, когда источник звука находится выше оси ПЗК, в т. ч. у поверхности воды (рис. 3.2 з). При таких условиях возникает значительная зона тени от поверхности моря, захватывающая большой интервал глубин и расположенная в определенном диапазоне расстояний от источника, за которой появляется новая зона освещенности (зона конвергенции, зона сходимости, зона вторичного выхода лучей и др.). Она образуется в результате выхода к поверхности лучей, испытавших полное внутреннее отражение в нижних слоях воды. В результате при поиске вначале может быть получен контакт с целью на больших дистанциях, который теряется при приближении к косяку на средних расстояниях и затем снова появляется на небольших дальностях.

Изложенное указывает на необходимость регулярной оценки условий распространения звука в промысловых районах и выдачи соответствующих рекомендаций рыболовным судам по условиям и режимам работы рыболокаторов горизонтального действия.

3.3. ФАКТОР АНОМАЛИИ

Под фактором аномалии A подразумевается отношение интенсивности I_p акустического поля в рефрагирующей среде в точке, удаленной на расстояние r от источника, к интенсивности I_0 в однородной безграничной среде на том же расстоянии от источника

$$A = I_p / I_0,$$

где $I_0 = Pa / 4\pi r^2$.

Аномалия — это отклонение интенсивности поля под влиянием рефракции от интенсивности поля в сферической волне. Поскольку рефракция иногда способствует ослаблению звука, а в ряде случаев приводит к его усилению, то это отклонение может быть как в большую сторону (коэффициент фокусировки в этом случае >1), так и в меньшую (коэффициент фокусировки <1).

3.4. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

В практике применения средств рыбохозяйственной гидроакустики часто приходится иметь дело с перемещающимися как источником и приемником акустических колебаний, так и обнаруживаемым объектом. Их взаимное относительное перемещение влияет на характеристики принимаемых от объекта отраженных акустических колебаний. Если происходит сближение источника и приемника, то частота принимаемых колебаний f_2 повышается, а если относительное удаление, то частота при приеме понижается.

Если источник движется, а приемник неподвижен, то принятая волна будет иметь частоту:

$$f_1 = f_0 \frac{1}{1 - (v_1 \cos \alpha_1) / c},$$

где f_0 — частота волны, излучаемой источником; v_1 — скорость движения источника; α_1 — угол между направлением движения источника и линией, соединяемой источник и приемник акустических колебаний (рис. 3.4 а).

Если приемник движется, а источник неподвижен, то частота принимаемых акустических колебаний будет:

$$f_2 = f_0 \frac{1}{1 - (v_2 \cos \alpha_2) / c},$$

где v_2 — скорость движения источника; α_2 — угол между направлением движения источника и линией, соединяемой источник и приемник акустических колебаний (рис. 3.4 б).

Изменение частоты $\Delta f = f_2 - f_1$ составляет:

$$\Delta f = 2f_1 \frac{v_1 \cos \alpha_1 + v_2 \cos \alpha_2}{c},$$

где f_1 — частота излучаемых колебаний; v , v_2 — скорость перемещения излучателя-приемника и цели, соответственно; α_1 , α_2 — углы между направлением перемещения излучателя-приемника и цели, соответственно, и направлением распространения волны.

Из приведенных соотношений видно, что при сближении источника и приемника частота принимаемой волны будет повышаться, а при удалении их друг от друга — понижаться. При определении частоты принимаемого от дна эхосигнала, когда с движущегося со скоростью v судна по ходу его излучается зондирующий сигнал под углом α относительно плоскости горизонта (рис. 3.5).

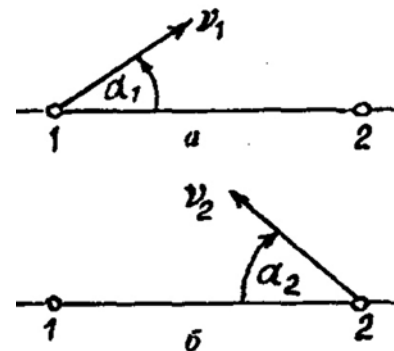


Рис. 3.4. К пояснению эффекта Доплера

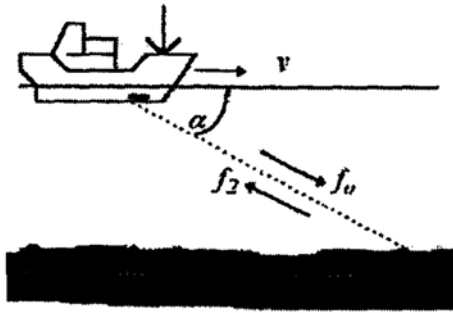


Рис. 3.5. Схема определения доплеровского изменения частоты при наклонной локации дна моря

для f_1 , и вместо α_1 — угол α . Таким образом, для частоты эхосигнала от дна получаем:

$$f_0 = f_0 \frac{1 + \frac{v \cos \alpha}{c}}{1 - \frac{v \cos \alpha}{c}}$$

Согласно этому выражению, если $v=10$ узлов, $\alpha=30^\circ$ и $f_0=100$ кГц, то приращение частоты эхосигнала по сравнению с несущей частотой излучаемого импульса (доплеровское приращение частоты) составляет достаточно ощутимую величину $\Delta f=f_2-f_0=595,5$ Гц. Приращение частоты в данном случае положительное в силу того, что источник и приемник «сближаются» в своем относительном движении. Если бы судно двигалось задним ходом, приращение частоты оказалось бы отрицательным. Доплеровское приращение частоты зависит от скорости движения судна относительно дна. Следовательно, измерив его, можно измерить абсолютную скорость судна. Подобным образом также измеряется скорость трала в аппаратуре норвежской фирмы Scanmar — «Trawl speed» с гидроакустической линией связи и «Tunnel flow».

На принципе измерения доплеровского изменения частоты основана работа абсолютных гидроакустических лагов. Однако при их построении следует учитывать, что излучение зондирующего импульса производится не по одному направлению, а в пределах некоторого телесного угла, определяемого шириной характеристики направленности антенны. Поэтому для каждого n -го акустического луча будет свой угол α_n и, следовательно, для каждого луча будет свое доплеровское смещение частоты. Таким образом, в реальности будет определен спектр доплеровских частот, что затрудняет выделение (измерение) основной доплеровской частоты, соответствующей несущей зондирующего импульса, и может приводить к возможным погрешностям измерения. То же самое относится и к доплеровским измерителям скорости трала и потока воды в трале.

Эффект Доплера в рыбохозяйственной гидроакустике может играть как отрицательную, так и положительную роль. Отрицательная роль связана с необходимостью дополнительного расширения полосы пропускания частот приемных трактов рыболокаторов горизонтального действия и траловых зондов, что приводит, в общем, к нежелательному снижению соотношения сигнал/шум на выходе приемного тракта. Однако наличие эффекта Доплера при движущемся объекте-цели может служить для классификации эха, позволяя отличить неподвижную цель от движущейся и определить направление ее движения. Эффект Доплера положен в основу работы гидроакустических лагов, позволяющих по изменению частоты отраженных акустических колебаний от грунта или неоднородностей водной среды определять скорость судна относительно воды или грунта (во втором случае имеет место так называемый абсолютный лаг). Эффект Доплера также используется при измерении с судна скоростей и направлений подводных течений с помощью гидроакустической аппаратуры. При этом аппаратура вклю-

Считая дно неподвижным приемником, частота зондирующего сигнала на дне будет определяться вышеприведенным выражением для f_1 , в котором вместо v_1 необходимо брать скорость судна v , а вместо угла α_1 — угол α . Для эхосигнала от дна, считая дно неподвижным источником (вторичным излучателем, переизлучателем), а судовую антенну — движущимся со скоростью v приемником, частота принимаемого антенной эхосигнала будет определяться выражением для f_2 , только в нем вместо частоты f_0 необходимо брать частоту f_1 , вычисленную по выражению

часть 3 или 4 гидроакустические антенны с равными углами наклона, но с различными направлениями излучения в горизонтальной плоскости. Подобный принцип применен в траловой аппаратуре фирмы Scanmar («Tunnel flow sensor») для контроля скорости и направления потока воды в трале при наличии подводных течений.

Существующие конструкции гидроакустических лагов позволяют определять абсолютную скорость судна при движении над глубинами до 500 м, при больших глубинах они измеряют относительную скорость. Были получены определенные положительные результаты использования эффекта Доплера при изучении структуры рыбных косяков посредством оценки доплеровских смещений частоты в косяке при его зондировании. Проводились также работы по оценке средних размеров рыб в скоплениях по эффекту Доплера исходя из предположения, что скорость рыбы зависит от ее размера и составляет 2–3 длины рыбы в 1 с [Holliday, 1973].

ГЛАВА 4. РАССЕЯНИЕ ЗВУКА РЫБОЙ И ОБНАРУЖЕНИЕ ЭХОСИГНАЛОВ ОТ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Изучение законов рассеяния звука скоплениями рыб и другими морскими организмами, установление зависимостей характера и интенсивности эхосигналов от размеров и плотности концентраций объектов позволяет решать важные практические задачи, связанные с обнаружением промысловых скоплений, расшифровкой показаний гидроакустических рыбопоисковых приборов и, в первую очередь, с количественной оценкой морских биомасс гидроакустическим способом. Знание законов рассеяния дает также возможность совершенствовать гидроакустическую технику в части обработки и представления отраженных от объектов сигналов в форме, удобной для использования при поиске и облове концентраций промысловых объектов. В связи с этим первостепенное значение имеют исследования акустических характеристик морских объектов и возможностей обнаружения эхосигналов от них.

4.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ МОРСКИХ ЖИВОТНЫХ

В рыбохозяйственной гидроакустике отражательные свойства объектов обычно характеризуются рассеянием звука в обратном направлении. На рассеяние звука объектом могут оказывать влияние два фактора: размеры и структура объекта в направлении распространения звуковых волн и площадь сечения рассеивателя в направлении, перпендикулярном распространению звуковых волн [Юданов, 1981].

Размеры и структура отдельных элементов и всего объекта в целом определяют качественную характеристику рассеяния, а площадь поперечного сечения объекта – количественную.

Качественные характеристики отражательных свойств одиночных объектов и скоплений обычно определяются безразмерными параметрами. Характер рассеяния единичного объекта, в первую очередь, зависит от безразмерного параметра X_p , который находят как отношение общей длины объекта-рассеивателя L_p к длине звуковой волны λ :

$$X_p = \frac{L_p}{\lambda}. \quad (4.1)$$

При анализе особенностей рассеяния звука (интерференционные явления, многократное рассеяние) следует также учитывать структуру одиночных объектов и их скоплений. Так, структура рассеивающего единичного объекта характеризуется следующими параметрами:

$$X_1 = \frac{L_1}{\lambda}; \quad (4.2)$$

$$X_2 = \frac{L_2}{\lambda}, \quad (4.3)$$

где L_1 – расстояние между отдельными элементами внутри объекта; L_2 – размер объекта в направлении распространения звуковых волн; λ – длина акустической волны.

Применительно к вертикальной локации основными расстояниями между элементами внутри рыбы являются толщина плавательного пузыря и слой мяса до позвоночника. Эти расстояния обычно составляют примерно пять сотых от общей длины рыбы L_p , т. е. $L_1 = 0,05L_p$. Размер L_2 определяется толщиной рыбы, которая обычно составляет две десятые ее длины, т. е. $L_2 = 0,2L_p$. Структура скопления объектов характеризуется параметрами:

$$X_3 = \frac{L_3}{\lambda}; \quad (4.4)$$

$$X_4 = \frac{L_4}{\lambda}, \quad (4.5)$$

где L_3 – среднее расстояние между отдельными объектами; L_4 – размер рассеивающего объема в направлении распространения акустических волн.

Если известна объемная плотность рыбной концентрации ρ_v , то среднее расстояние L_3 между отдельными рыбами внутри скопления [Losow, 1982]:

$$L_3 = 0,55/\rho_v^{1/2}.$$

Величина L_4 определяется половиной протяженности излучаемого импульса в воде $L_4 = c\tau/2$.

Используя известные сведения о размерах морских объектов и расстояниях между ними в работе Юданова [1992] приведены значения, которые могут принимать безразмерные параметры $X_1 - X_4$ в различных условиях распределения объектов при рабочей частоте 30 кГц ($\lambda = 5$ см) и длительности излучаемых импульсов $\tau = 1,0$ мс. Результаты расчетов приведены в табл. 4.1.

Из приведенной таблицы видно, что отношения размеров отдельных элементов объектов, целых объектов и их скоплений к длине ультразвуковой волны могут изменяться в больших пределах, а это, в свою очередь, влияет на характер и интенсивность рассеяния. Интенсивность акустического поля, рассеянного отдельными объектами и их скоплениями, в большой степени зависит от формы и размеров объектов, отношения их размеров к длине волны, расстояния между объектами в скоплении и других факторов.

Количественные характеристики отражательных свойств одиночных объектов и скоплений оцениваются одним из следующих параметров: акустическим сечением обратного рассеяния, радиусом эквивалентного шара или силой цели.

Акустическое сечение обратного рассеяния в классической акустике определяется отношением мощности $P_{\text{рас}}$, рассеиваемой объектом в расчете на единицу телесного угла в направлении приема, к интенсивности $I_{\text{пад}}$ падающей звуковой волны:

$$\sigma_k = \frac{P_{\text{рас}}}{I_{\text{пад}}} = \frac{r^2 I_{\text{рас}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (4.6)$$

Таблица 4.1. Значения безразмерных параметров отражательных свойств водных биологических объектов

Наименование объекта	Длина объекта (L_p), см	Плотность (ρ_v), экз/м ³	X_p	X_1	X_2	X_3	X_4
Планктон	0,1–5	10^6 – 10^7	0,02–1	–	0,004–0,2	0,1–5	15
Рыбы	5–100	10^2 – 10^{-4}	1–20	0,05–1	0,2–4	2,5–240	15–
Тунцы, акулы, дельфины и др.	100–1000	$< 10^{-3}$	20–200	1–10	4–40	> 110	–

где r – расстояние между точкой приема и объектом; $I_{\text{рас}}$ – интенсивность рассеиваемого объектом звука в точке приема.

Однако используемая в рыболокации формула для расчета акустического сечения обратного рассеяния несколько отличается от (4.6) и выражается как

$$\sigma = \frac{P_{\text{рас}}}{I_{\text{пад}}} = \frac{4\pi r^2 I_{\text{рас}}}{I_{\text{пад}}} = 4\pi\sigma_{\text{к}}. \quad (4.7)$$

Под акустическим сечением в данном случае понимается условная площадь, дающая такое же идеальное отражение во все стороны, что и реальный объект в данном направлении. И хотя эта величина акустического сечения менее удобна, чем $\sigma_{\text{к}}$, она широко распространена в рыбной акустике.

Используют также понятие *радиуса эквивалентного шара (не сферы)* $R_{\text{э}}$, который связан с акустическим сечением следующим соотношением:

$$R_{\text{э}} = \sqrt{\sigma / \pi}.$$

Отражательные свойства объектов часто выражают через силу цели. Этот параметр представляет собой логарифмическую форму выражения отражательной способности объекта. Силу цели TS определяют по формуле:

$$TS = 20 \log(\sigma / 4\pi) = 2 \log(R_{\text{э}} / 2), \quad (4.8)$$

где $R_{\text{э}}$ выражен в метрах, σ – в квадратных метрах.

В рыболокации наибольший интерес представляют количественные характеристики рассеяния в обратном направлении, которые чаще всего выражают в акустических поперечных сечениях обратного рассеяния, называя их для краткости акустическими сечениями объектов.

Сложность явлений, происходящих при рассеянии звука отдельными морскими объектами и скоплениями, пока затрудняет получение достаточно точных зависимостей для расчета их акустических характеристик. Поэтому в настоящее время наряду с теоретическими исследованиями проводится в основном экспериментальное изучение отражательных свойств рыб и других морских животных в лабораторных и морских условиях.

Рассмотрим более подробно количественные и качественные характеристики рассеяния звука одиночными морскими объектами и их скоплениями применительно к вертикальной локации.

4.2. РАССЕЯНИЕ ЗВУКА ЕДИНИЧНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

С точки зрения гидроакустики рыбы и другие морские организмы представляют собой неоднородности морской среды, от которых происходит рассеяние звуковых волн во все стороны. Рассеяние акустической энергии на неоднородностях было подробно изучено Рэлеем [1955] применительно к мелким объектам, размеры которых значительно меньше длины волны ($X_p \ll 1$).

Из рэлеевского закона рассеяния следует, что отношение интенсивностей рассеянных и падающих звуковых волн обратно пропорционально четвертой степени длины волны и прямо пропорционально квадрату объема объекта или шестой степени его размера. Так, при увеличении размера объекта в 2 раза интенсивность рассеяния возрастает в 64 раза.

Важным свойством рэлеевского рассеяния является то, что в зависимости от различных факторов изменяются только размеры индикатрисы рассеяния звука, а ее форма остается неизменной независимо от величины и конфигурации малых объектов. При этом рассеяние вперед и назад одинаково; кроме того, оно в 2 раза больше, чем в перпендикулярном направлении.

Полученные Рэлеем закономерности применимы в первую очередь к различным видам планктонных организмов и молоди рыб, размеры которых значительно меньше длины волны ультразвуковых сигналов технических средств рыбопоисковых приборов активной гидроакустической локации. Величина акустического сечения таких мелких объектов чрезвычайно мала; для отдельных особей планктона она может быть порядка 10^{-5} см² и меньше.

Согласно теории рассеяния при увеличении размеров объектов ($X_p > 1$) интенсивность рассеяния растет не так быстро, как при рэлеевском рассеянии. Если размеры рыб заметно больше длины волны, то теория рассеяния усложняется, т. к. приходится иметь дело с дифракционными и интерференционными явлениями, происходящими на поверхности и внутри рыбы.

Экспериментальные измерения акустических характеристик морских животных. Сложность явлений, происходящих при рассеянии звука рыбами, сильно затрудняет расчеты акустических сечений рыб, поэтому их приходится определять экспериментальным путем. Учеными многих стран выполнен большой объем экспериментальных исследований акустических свойств рыб в лабораторных и естественных условиях в основном применительно к вертикальной локации [Юданов, Ганьков, Шатоба, 1966; Holliday et al., 1973; Шишкова, 1977].

Акустические сечения рыб одного вида и одинакового размера могут изменяться в больших пределах. Большой разброс в величинах акустического сечения рыб обусловлен различиями в их экстерьере, объеме плавательных пузырей, наполнении желудков, состоянии половых продуктов, жирности, а также определяется наличием пузырьков газа в желудке и кишечнике и другими причинами.

Такой большой разброс акустических сечений рыб вследствие различия в структуре отдельных особей, к сожалению, не позволяет выявить детальные закономерности изменения отражательных свойств рыб с изменением их размеров; имеется возможность определять только усредненные величины акустических сечений.

Большой интерес представляет определение зависимости акустических свойств рыб от частоты облучения. Многочисленные экспериментальные измерения в широком ультразвуковом диапазоне на фиксированных частотах позволили установить, что влияние частоты облучения на величину акустического сечения рыб проявляется нечетко. Отмеченный выше большой разброс значений акустических сечений рыб одного вида и одинакового размера практически маскировал частотную зависимость, установленную на дискретных частотах. Для выявления частотных характеристик необходим значительно более высокий уровень экспериментальных измерений.

Прецизионные частотные измерения удалось провести в лабораторных и базовых морских условиях В.Г. Самоволькину [1974] с помощью экспериментальной установки в диапазоне частот 20–200 кГц; исследовались разные виды пресноводных и морских животных. Было установлено, что акустические сечения рыб практически не изменяются на сравнительно низких и средних частотах облучения ($X_p = 1,5-5$) и возрастают приблизительно вдвое на более высоких частотах ($X_p = 5-20$). Иной вид имеет частотная зависимость для креветок длиной от 4 до 6 см. В области значений X_p от 1,5 до 7 величина σ/L_p^2 в среднем растет пропорционально частоте; при $X_p < 1,5$ она быстро уменьшается при понижении частоты и уже при $X_p < 1,0$ оказывается в области рэлеевского рассеяния.

Экспериментальные исследования отражательных свойств рыб показывают, что величина и характер рассеяния в большой степени зависят от внутренней структуры и биометрических показателей тела рыбы. Проведенные в лабораторных и морских базовых условиях эксперименты на рыбах позволили установить, что для промысловых рыб малых и средних размеров при использовании рыбопоисковой аппаратуры на 20–30 кГц ($X_p \leq 8$; $X_1 \leq 0,4$; $X_2 \leq 1,6$) основную долю в величину акустического сечения вносит плавательный пузырь. При увеличении параметров X_p , X_1 и X_2 (возрастании частоты при постоянных размерах рыбы) суммарный эхосигнал складывается из эхосиг-

налов от мяса, костей и плавательного пузыря рыбы. При еще больших значениях перечисленных параметров эхосигнал от пузыря становится слабее, чем от мяса и костей. Отражательная способность рыбы сильно зависит от ее ориентации относительно направления облучения. Наибольшие значения акустических сечений имеют место при отражении звуковых волн от боковой поверхности тела рыбы, а наименьшие — со стороны головы и хвоста. Гидроакустикой судов кошелькового лова нередко отмечалось даже как бы «пропадание» эхосигналов от косяков рыбы во время поиска, когда под влиянием шумов судна косяк уходил от судна и его озвучивание гидролокатором при этом осуществлялось практически со стороны хвостов рыб.

Таким образом, если исходить из получаемых соотношений размеров рыб l и используемых в рыбохозяйственной и промысловой гидроакустике длин волн λ , то могут быть выделены следующие области: $l < \lambda$, $l > \lambda$ и $l \approx \lambda$ (размер рыбы значительно меньше длины волны, размер рыбы значительно больше длины волны и промежуточная зона, когда размеры рыбы сравнимы с длиной волны акустических колебаний).

Наиболее простой является ситуация при $l \ll \lambda$, когда размеры не только деталей тела, но и самого объекта намного меньше длины волны и можно полагать, что отличия истинной формы тела от формы идеализированной модели не будут играть слишком большой роли. При этом газовые полости рассеивают звук изотропно, а поле, рассеянное более жесткими элементами, в некоторой степени концентрируется как вблизи направления распространения первичной волны, так и вблизи противоположного направления. В этом случае действует рэлеевский закон распределения энергии, из которого следует, что отношение интенсивностей колебаний в падающем и рассеянном полях обратно пропорционально четвертой степени длины волны (площадь поперечного сечения обратного рассеяния пропорциональна $1/\lambda^4$) и прямо пропорционально квадрату объема объекта или шестой степени его радиуса. При увеличении радиуса объекта в два раза интенсивность рассеяния возрастает в 16 раз.

Рассеяние вперед и назад одинаково, кроме того, оно в два раза больше, чем в перпендикулярных направлениях. В зависимости от различных факторов изменяются только размеры индикатрисы рассеяния, ее форма не зависит от величины и формы малых объектов. Хотя эти закономерности обычно бывают применимы к объектам, размеры которых значительно меньше длины волн, однако явление рэлеевского рассеяния звуковых волн в водно-рыбной среде может наблюдаться и на более крупных объектах.

Когда размеры рыб в направлении падающего акустического поля сравнимы с длиной волны, т. е. $l \approx \lambda$, теория рассеяния существенно усложняется. Переход от рэлеевской зоны к промежуточной зоне обычно имеет место, когда вертикальный размер рыбы, примерно равный $0,2l$ (l — длина рыбы), приближается к длине падающей волны λ [Haslett, 1977]. В этом случае приходится сталкиваться с дифракционными явлениями, происходящими на поверхности рыбы. Кроме того, нужно учитывать особенности внутреннего отражения звуковых волн в рыбе (а также и поглощения).

В общем случае рыба для акустических колебаний является полупрозрачным телом, поэтому акустическая энергия, падая на поверхность, частично отражается, а оставшаяся часть проходит внутрь тела, имеющего весьма неоднородную структуру. При этом одна часть вошедшего потока энергии выходит из рыбы сразу в направлении падающего сигнала, а другая после многочисленных внутренних отражений (и частично потерь) выходит из нее в разных направлениях. При достаточно больших размерах рассеивателей и при плавных их очертаниях (например, пузырь рыбы) значительная часть рассеянной энергии начинает сосредотачиваться вблизи обратного (или зеркального) направления. Сложение эффектов многократного отражения и дифракции на рассеивающих элементах приводит к деформации индикатрисы рассеяния (по сравнению с рэлеевской). Волны в боковых направлениях и в направлении падающей волны гасятся в результате взаимной интерференции. С увеличением размеров рассеивающего объекта индикатриса рассеяния все более и более концентрируется в направлении первичного источника акустического поля. Поперечное сечение обратного рассеяния σ увеличи-

вается, но не так быстро, как при рэлеевском рассеянии. Однако при определенных соотношениях между размерами объектов и длиной волны, а также акустическими сопротивлениями объекта и среды происходит резкое резонансное возрастание рассеяния. Затем по мере увеличения размеров рыб степень влияния длины волны на интенсивность рассеяния постепенно понижается. Сила цели в этой области имеет комплексный характер, ее зависимость от длины волны имеет несколько максимумов и минимумов, разница между которыми может быть порядка до 20 дБ и более. График ее изменения показывает наличие «волнистости», что в принципе согласуется с характером рассеяния электромагнитных волн целями в воздухе (в т. ч. и сферой-шаром). Разброс сечений рассеяния, например, для диапазона $4 < l/\lambda < 20$, может достигать $5 \cdot 10^3$ [Haslett, 1970]. По данным измерений [Foote, 1987] для трески длиной от 18 до 52 см акустическое сечение изменяется от 10 до 400 см² (при $l_{\text{макс}}/l_{\text{мин}} = 3$), т. е. в 40 раз. Средние значения σ в этой зоне аппроксимируются прямой линией. Сечение рассеяния следует закономерности вида $\sigma \approx 1/\lambda$. Можно считать, что указанной зоне соответствуют размеры рыб $8\lambda < l < 28\lambda$. К сожалению, почти все рыбы промыслового значения как объекты акустической локализации находятся в условиях, соответствующих этой средней зоне, характеризующейся наибольшими вариациями рассеяния акустических волн от рыб.

Последней можно считать ситуацию, когда $l \gg \lambda$ или $l > 24-28\lambda$, что, например, на частоте 30 кГц соответствует длине рыб 120–140 см. В этом случае по мере дальнейшего увеличения размера объекта по сравнению с длиной волны дифракционные явления играют все меньшую роль и процесс рассеяния постепенно переходит в процесс отражения звука, подчиняющийся законам геометрической акустики. За объектом образуется полная или частичная звуковая тень, размытая за счет дифракционных явлений на его краях. Площадь поперечного сечения обратного рассеяния в этом случае пропорциональна $1/\lambda^2$. Во всех случаях энергия, рассеянная объектом, черпается из первичного поля. Таков физический механизм рассеяния акустической энергии промысловыми объектами при изменении соотношений их размеров с длиной волны акустического поля.

Поле, рассеянное в толще вод океана в сторону первичного источника колебаний, создается в основном дискретными объектами и неоднородностями, являющимися сильными рассеивателями. В результате проведенных экспериментальных работ было установлено, что коэффициент отражения от мяса рыбы изменяется в пределах от 1,2 до 6,0% [Cushing, 1973], от костей рыб составляет около 25% [Шишкова, 1963; Haslett, 1977]. Коэффициент отражения от чешуи также значительно выше, чем от мяса [Shibata, 1975].

Акустическое сопротивление тела рыбы определяется его плотностью (от 1,04 до 1,09 г/см³) и скоростью звука в нем (от 1500 до 1600 м/с). Общий коэффициент отражения от тела рыбы изменяется от 2,2 до 6,2%, однако наиболее распространенными являются значения 2,5–3,5% [Теслер, Шатоба, 1976]. Наибольшее отражение акустической энергии происходит от плавательного пузыря. Хотя плавательный пузырь занимает около 5% общего объема рыбы, эхосигнал от него составляет примерно 50% в общем эхосигнале, получаемом от рыбы. Например, при измерениях на частоте 50 и 200 кГц оказалось, что эхосигнал от плавательного пузыря при озвучивании со стороны спинки составлял 52% при частоте 50 кГц и 48% при 200 кГц, при озвучивании с других направлений эхосигнал был меньше [Shibata, 1975]. Удаление или прокол плавательного пузыря уменьшают амплитуду сигнала в среднем на 45–50% от максимального значения. Влияние кишечного тракта сказывается в случае значительного наполнения его газом при наличии пищи.

При средней частоте и средних размерах рыбы эхосигналы от тела и пузыря можно считать примерно равными. На высоких частотах и при больших размерах рыбы наибольшую часть в суммарном эхосигнале составляют эхосигналы от плавательного пузыря и «твердых» частей тела [Теслер, Шатоба, 1976].

Многими исследователями проводились экспериментальные измерения силы цели промысловых объектов. Например, для окуней размером 16,2–24 см акустическое сече-

ние обратного рассеяния при озвучивании со стороны спинки σ_c составляло 15–40 см² ($TS = -35 - -38$ дБ); со стороны боковой поверхности σ_b до 60 см², с головы или хвоста – 5 см² ($TS = -45$ дБ). Для трески размером 42–90 см σ_b изменялось от 79 до 1332 см² ($TS = -18,5 - -32,7$ дБ) на частоте 30 кГц, длиной 30–84 см – составляло от 124 до 1700 см² ($TS = -17,0 - -31,0$ дБ) при частоте 30 кГц, сельди длиной 28 см – 98 см² ($TS = -31,4$ дБ) и камбалы длиной 51 см σ равно 1780 см² ($TS = -16,5$ дБ) [Теслер, Шатоба, 1962, 1976]. Хотя полученные результаты существенно различаются, обнаружена связь между силой цели TS и размером рыб l : по результатам одних работ TS рыб примерно пропорциональна l^2 , по результатам других – $l^{2.5}$ или l^3 , т. е. примерно пропорциональна объему рыбы [Cushing, 1973]. Эти данные получены для разных видов рыб при обработке большого объема экспериментальных данных с существенными вариациями. Ряд полученных данных позволяет сделать некоторые предположения о том, что фактические вариации силы цели с длиной рыбы в промежуточной зоне ($8\lambda < l < 28\lambda$) намного меньше, чем это ожидалось при теоретическом рассмотрении.

Предложено несколько формул, связывающих силу цели рыб TS с их размерами и длиной волны, в т. ч. более часто употребляемые формулы Love [1969, 1971] при спинном и боковом направлениях озвучивания:

- 1) $TSc = 19,4 \log l + 0,6 \log \lambda - 24,9$, где TSc – спинной аспект, при $0,7 \leq (l/\lambda) \leq 90$, где l и λ , см;
- 2) $TSb = 22,8 \log L - 2,8 \log \lambda - 22,9$ при $1 \leq (l/\lambda) \leq 130$;
- 3) $TSc = 24,5 \log l - 4,5 \log \lambda - 26,4$;
- 4) $TSc = 28,0 \log l - 8,0 \log \lambda - 67,4$;
- 5) $TSb = 25,7 \log l - 5,7 \log \lambda - 68,8$.

Средние значения силы цели рыбы в боковом аспекте важны при количественной оценке в ситуациях акустического зондирования в горизонтальных направлениях, а в спинном аспекте при вертикальной локации.

Лове [1971] были проведены лабораторные измерения максимальных TS в зависимости от размера рыбы, вида и частоты с использованием пустотелых резиновых сфер в качестве опорных целей (для калибровки). Полученные данные были объединены с имеющейся информацией от других авторов и была рассчитана линия регрессии для каждого аспекта с использованием метода наименьших квадратов. На рис. 4.1 показаны использованные при этом данные для спинного аспекта озвучивания (от 16 семейств из 8 различных отрядов). Длина рыб варьировалась от примерно 1 см до 1 м. Некоторые рыбы имели плавательные пузыри, другие нет. Частоты озвучивания были в диапазоне от 8 кГц до 1480 кГц. Рассчитанное уравнение линии регрессии для спинного аспекта озвучивания имеет вид:

$$\sigma/\lambda^2 = 0,041 (l/\lambda)^{1,94} \quad (\text{на рис. 4.1 } l \text{ обозначена как } L) \quad (4.9)$$

Соответственно, TSc будет иметь вид, обозначенный цифрой 1.

На рис. 4.2 представлены подобные данные для бокового аспекта озвучивания. Они были получены от 13 семейств рыб из 7 различных отрядов. Размеры рыб и использованные частоты примерно соответствуют указанным для спинного аспекта озвучивания. Полученное уравнение регрессии имеет вид $\sigma/\lambda^2 = 0,064(l/\lambda)^{2,28}$ и, соответственно, TS_b будет иметь вид, обозначенный цифрой 2.

В то же время следует учитывать, что отражательная способность рыб и их сила цели находятся в довольно сложной зависимости от их ориентации относительно направления облучения и изменяются в значительных пределах при изменении направления озвучивания. Рыба имеет сложную конфигурацию тела, поэтому падающая на нее энергия облучает отдельные части ее тела не одновременно и под разными углами. При изменении ориентации рыбы относительно акустического луча изменяются как амплитуда, так и фазовые соотношения сигналов, отраженных от разных частей тела рыбы, поэтому сила цели рыбы при ее озвучивании под разными углами может значительно изменяться. Получаемые при экспериментальных исследованиях полярные диаграммы

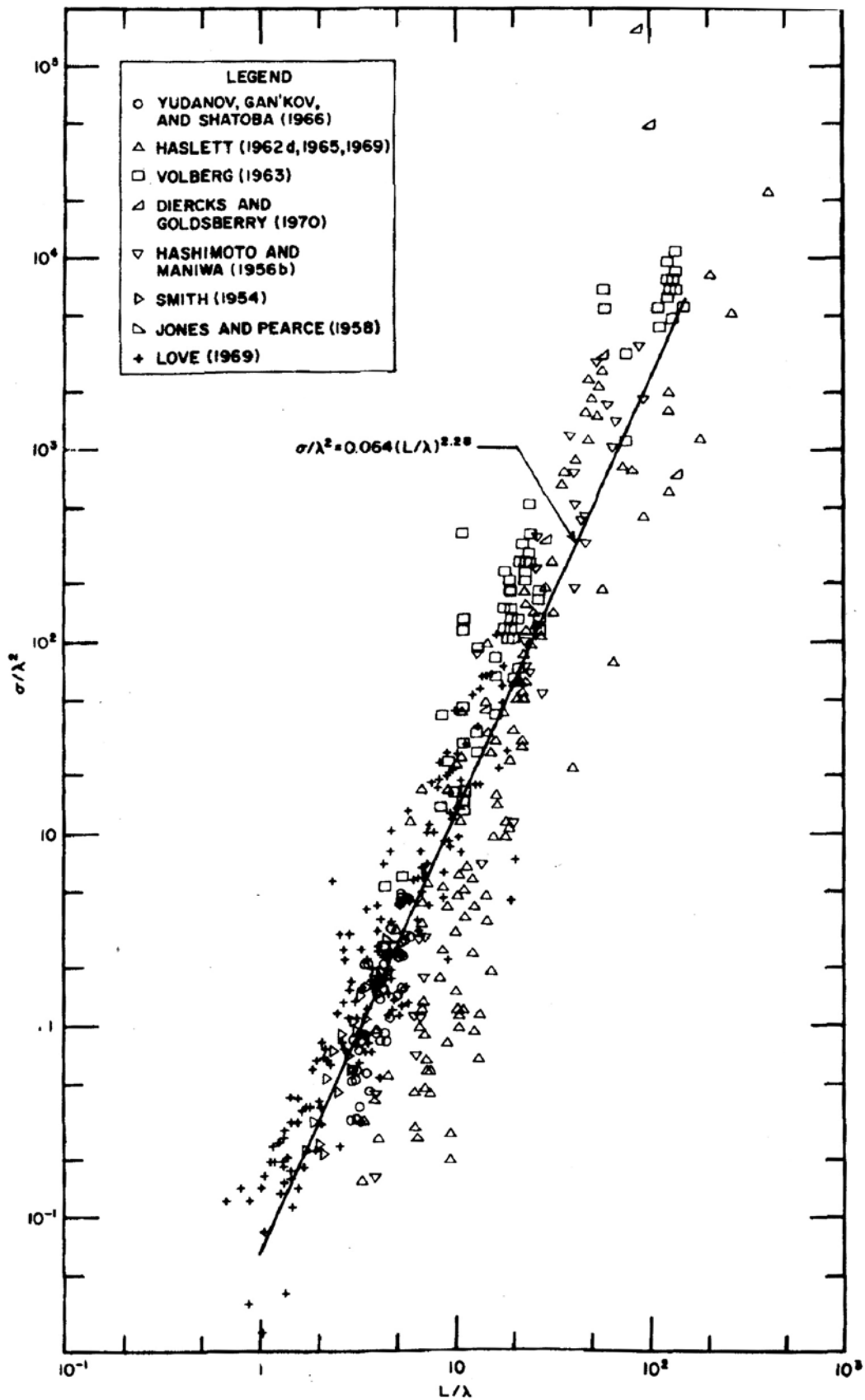


Рис. 4.1. Информация об акустических сечениях обратного рассеяния отдельных рыб в спинном аспекте озвучивания [Love, 1971]

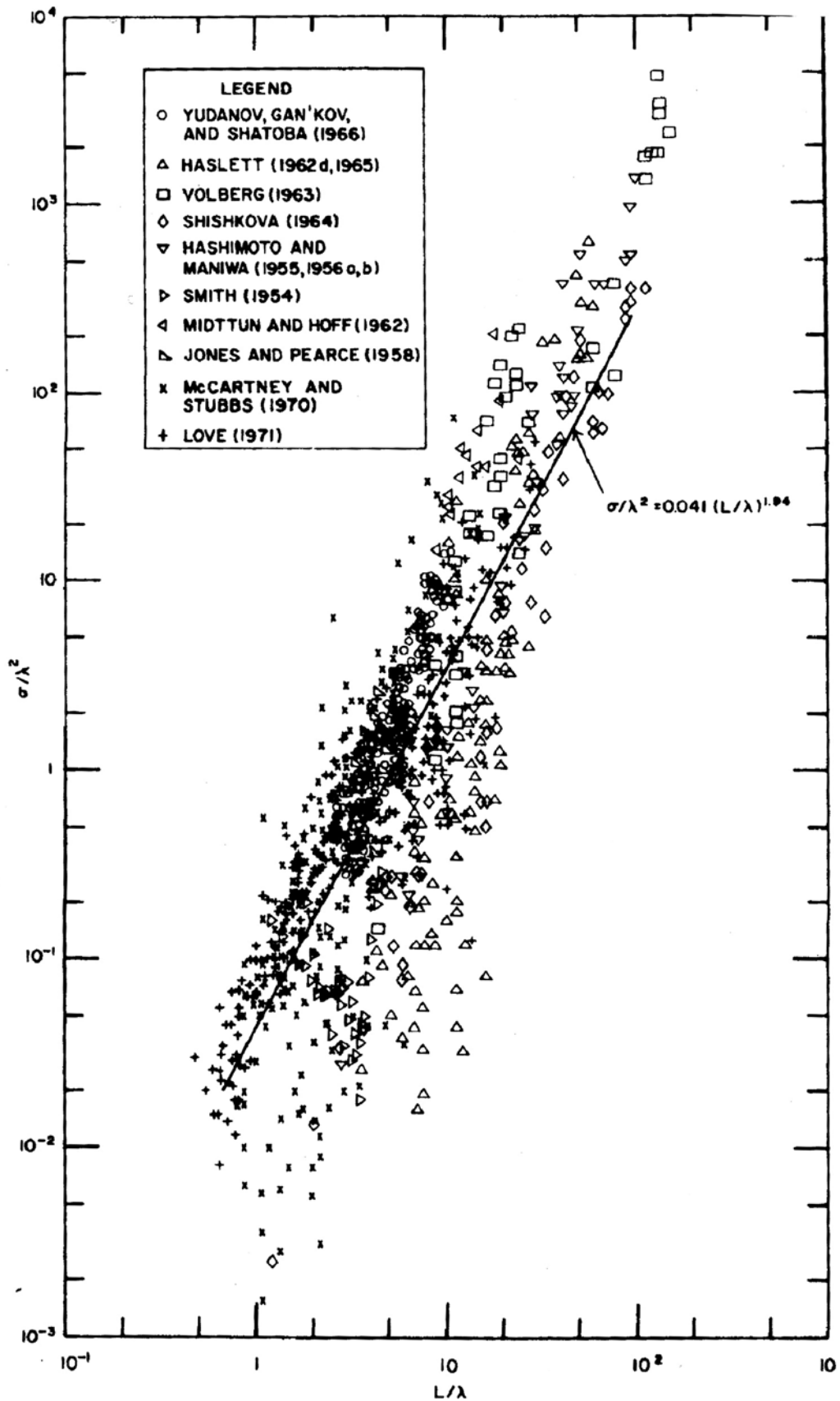


Рис. 4.2. Информация об акустических сечениях обратного рассеяния отдельных рыб в боковом аспекте озвучивания [Love, 1971]

рассеяний для рыб характеризуются частым чередованием больших максимумов и глубоких минимумов. При повышении рабочей частоты возрастают величина максимумов, глубина минимумов, а также увеличивается их количество и уменьшается их ширина. Сильно различаются по величине сигналы, отраженные со стороны головы, спины, хвоста и боков. Отражения со стороны головы в 2–3 раза, а со стороны боков примерно в 10 раз интенсивнее, чем со стороны хвоста.

Исследованиям отражательной способности гидробионтов постоянно уделяется большое внимание в рыбохозяйственной гидроакустике. Не случайно практически на всех проведенных международных симпозиумах ICES этим вопросам посвящался отдельный раздел. О масштабности экспериментальных исследований по измерениям TS рыб и некоторых других водных биологических объектов с указанием авторов можно судить, к примеру, по сводным табл. 4.3, 4.4, с учётом приведённых в работе [Simmonds and MacLennan, 2005].

Таблица 4.3. Сводная таблица результатов исследований по измерению TS тресковых и других морских физиологов (закрытопузырных рыб).

Виды рыб	Район исследований	Длина l , диапазон/средняя (см)/ l (см)	Время: D – лишь днём; N – ночью	Частота (кГц)	m , dB	B , dB	b_{20} , dB	Авторы
Треска взрослая	Ньюфаундленд	18–60	N	38			-66,0	1
	Кольский залив, Россия	15–21	A	120	31,6	-80,7		2
Молодь трески	Скандинавия	3,19/9,4	A	120	27,0	-76,2	-66,1	3–4
Личинки трески		0,1–1,2		120	176,1	-82,4	-68,9	5
Сайда	Норвежское море	45–91/ 57,2	N	38			-68,3	6
				38			-68,3	6
Норвежск. поут	Норвежское море	10–21/17,6	N	38			-67,1	6
Окунь	Норвежское море	9–43/19,7		38			-67,1	6
Пикша	Норвежские фиорды	43,8±4,2	N	38			-67,9	7
Чилийск. хек-мерлуза	Чилийское побережье	48–80	N	38	22,0	-73,3	-68,5	10
Хек юж. полушар.	Чилийское побережье	37–53	N	38	23,6	-74,0	-68,5	10
Мерлуза тихоокеан..	Тихий океан	47–60/51,8	N	38			-68,5	
Минтай	Берингово море	35–52/41,7	A	38			-66,0	8
Ставрида	Юго-западная Атлантика	25–47	N	38	14,7	58,7	66,8	9
Ставрида	Чилийское побережье	22–40	N	38	28,3	-73,3	-58,9	10
Аргентина	Норвежское море	25–50/37,2		38			-68,0	6
Путассу Южного полуш.	Сев. вост Алантика	21–37/31,1	N	29	21,7	-72,8	-71,9	12
			A	38			-73,5	13
	Новая Зеландия		38	25,0	-81,3	-73,5	14	
	Исландия	.../11,5	N					15
Мойва	Исландия	.../14,5	N	38				15
	Ньюфаундленд	9–15/12,3	A	38–49			-73,1	16
	Залив Св. Лаврентия	.../16,5		120	21,1	-74,3	-61,3	17

Примечание. Функциональная зависимость TS от длины рыб l определялась как $TS = (m \log l + b_{20})$ или с помощью стандартной формулы $TS = (20 \log l + b_{20})$. Параметры m , b и b_{20} определялись с помощью линейной регрессии. b_{20} в скобках — это эталонное значение $\{m - 20 \log l_{\text{этал.}} + b\}$, где $l_{\text{этал.}}$ — центр указанного диапазона длин рыбы.

Авторы исследований, приведённых в табл. 4.3: 1. Rose and Porter (1996); 2. Ermolchev and Zaferman (2003); 3. Nielsen and Lundgren, (1999); 4. Ona (1994); 5. Chi et al. (2003); 6. Foote et al. (1986); 7. Ona and Hansen (1986); 8. Traunor (1996); 9. Barange et al. (1996); 10. Lillo et al. (1996); 11. Gutierrez and MacLennan (1998); 12. Robinson (1983); 13. Monstad (1992); 14. McClatchie et al. (1998); 15. Halldorsson and Reynisson (1983); 16. Rose (1998); 17. Rose and Leggett (1988).

Таблица 4.4. TS сельдёвых и других морских физостоумов (открытопузырных рыб), а также некоторых других промысловых рыб.

Виды рыб	Район исследований	Длина: диапазон средняя (см) / (см)	Время суток: D – день; N – ночь	Частота, кГц	m , dB	b , dB	b_{20} , dB	Авторы
Сельдь	Северозападная Атлантика	7–27/18,8	Любое время	38	20,1	-71,5	(-71,3)	1
	Норвежская часть Северн. моря	24–34/28,5	N	38			-72,1	2
	Исландия	9–33/21,5	N	38			-73,2	3
	Норвежский фиорд	/32,8	D	38			-71,1	4
Шпрот	Прибрежн. часть северн. Балтики	6–24/13,0	N	70	21,7	-75,5	-69,9	5
		22–33/28,0	D	70			-72,3	6
	Норвежский фиорд	9–15/12,6	N	30			-69,1	7
	Северное море	.../7,15	N	30			-70,7	7
Смесь сельдь/шпрот	Каттегат/ Скаге-рак	19–26/21,0	D	38			-72,6	8
	Сев.-восточная Атлантика	12–21/16,6	D	38			-73,4	1
	Юго-восточная Балтика	7–19/13,8	N	120			-73,1	8
	Сев.-Восточная Атлантика	12–21 16,6	D	120			-76,0	1
Анчовета	Перу	10–16/12,8	D	38			-78,9	9
		10–13/11,3	D	120			-76,2	9
Анчоус	Сев.-восточная Атлантика	7–14	N	38	19,5	-75,6	-76,1	10
Сардинопс	Сев.-восточная Атлантика	5–23	N	38	17,1	-66,7	-70,5	10
Сардина	Перу	12–20	D	120			-74,1	9
Скумбрия	Сев.-вост. Атлант.	31–35/32,7		38			-84,9	1
	Северное море	.../37,8	N	38			-85,4	
Лосось (нерка)	Канадские озёра	.../51,0	N	38			-61,9	11
Песчанка	Северо-восточн. Атлантика	11–14/12,2	Любое время	38			-93,7	12

Примечание. Функциональная зависимость TS от длины рыб l определялась как $TS = (m \log l + b_{20})$ или с помощью стандартной формулы $TS = (20 \log l + b_{20})$. Параметры m , b и b_{20} определялись с помощью линейной регрессии. b_{20} в скобках — это эталонное значение $\{m - 20 \log l_{\text{этал.}} + b\}$, где $l_{\text{этал.}}$ — центр указанного диапазона длин рыбы.

Авторы исследований, приведённых в табл. 4.4: 1. Edwards et al. [1984B]. 2. Foote [1987]. 3. Halldorsson and Reynisson [1983]. 4. Misund and Beltestad [1996]. 5. Rudstam et al. [1988]. 6. Misund and Øverdal [1988]. 7. Robinson [1983]. 8. Degnbøl et al. [1985]. 9. Gutierrez and MacLennan [1998]. 10. Barange et al. [1996]. 11. Mulligan and Kieser [1996]. 12. Armstrong [1986].

Исследования TS рыб были начаты в основном в начале 60-х гг. XX века, сначала на мертвых и снулых рыбах, затем на живых рыбах, помещаемых в специальные садки (*ex situ*), и далее на свободно плавающих в стаях в естественных условиях (*in situ*). Был сделан вывод, что большей частью только прямые измерения TS свободно плавающих рыб в естественных скоплениях (*in situ*) могут обеспечить получение достаточной статистики для определения обоснованных $TS-L_T$ зависимостей [Ehrgenberg, 1983]. Большой объём работ по TS рыб был выполнен Love [1971, 1977] Им было предложено следующее выражение для TS как $TS = m \log l + m_f \log f + b$ [Simmonds and MacLennan, 2005] где m , m_f и b — определённые коэффициенты, зависящие от аспекта и частоты озвучивания рыбы.

Было установлено, что TS рыб является возрастающей функцией ее длины l , $TS = B \log l + A$, где B и A — коэффициенты, зависящие от вида рыб. В естественной среде обитания (*in situ*) TS зависит также от частоты облучения, температуры и солёности

воды, глубины, ракурса, активности, жирности, наполненности желудка и половозрелости. Поэтому $TS-l$ зависимость *in situ* имеет статистический (корреляционный) характер. Знание $TS-l$ зависимостей для разных видов рыб имеет ключевое значение в оценках их запасов при помощи тралово-акустических съёмок (ТАС).

В связи с существенным совершенствованием научной эхолокационной аппаратуры знание зависимостей силы цели (TS) рыб и других гидробионтов *in situ* (от их длины и глубины обитания) приобретает всё большее значение при оценке состояния их запасов гидроакустическим методом и учёте их влияния на результаты съёмки.

В работе Ермольчева [2012] отмечается, что норвежский НИИ морских исследований (БИМИ, г. Берген) и Полярный НИИ рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича (ПИНРО) начали исследования TS рыб в 60-х гг. XX века. Для определения TS сначала применялись научные эхолокаторы норвежской фирмы «Simrad» с однолучевой антенной, затем эхолокаторы EK500 и EK60 с высокоточными ВАРУ и антеннами с «расщепленным лучом» (судовые и устанавливаемые в подводных аппаратах), измеряющие TS рыб, и программы сбора, накопления и пост-обработки акустических данных VI60, Echoview, Famas и LSSS.. Методика определения $TS-l$ зависимостей основывалась на сопоставлении общих математических ожиданий TS -распределений от рыб в зонах облова (средних значений \overline{TS}) и l -распределений рыб по размерным классам (средних длин \bar{l}) в уловах. Недостаток этой методики: состоит в том, что не определялись $TS-l$ зависимости, охватывающие все размеры рыб, поскольку общее математическое ожидание распределения случайной величины всегда больше минимального и меньше максимального значений. Так, исландские специалисты для окуня-клювача в море Ирмингера определили $TS-l$ зависимость для размерного диапазона l от 35 до 39 см [Reynisson, 1992/B, Report of, 2010], а реальный диапазон – от 10 до 50 см; канадские специалисты для атлантической трески определили $TS-l$ зависимость для диапазона l от 20 до 60 см [Pedersen, 2011], а реальный диапазон – от 5 до 150 см; норвежские специалисты в Норвежском море определили $TS-l$ зависимость для путассу для диапазона от 21 до 28 см [8, 15], а реальный диапазон – от 12 до 45 см. Этот недостаток можно устранить [Гмурман, 2003], если l -распределения рыб в уловах и TS -распределения от рыб в зонах облова делить на соответствующие поддиапазоны (группы) и сопоставлять их групповые математические ожидания, в том числе в областях наименьших и наибольших размеров рыб. Возможности программ VI60 и новой версии Famas_2012, созданной в ТИНРО-центре И.А. Убарчуком, позволили усовершенствовать методику в направлении определения $TS-l$ зависимостей, охватывающих все размеры рыб. Новая методика реализуется в три этапа [Report of, 2012, 2014].

Первый этап. Сбор данных о TS рыб в зонах облова и данных о размерно-видовом составе рыб учетными тралами.

Второй этап. Обработка собранных акустических и биологических данных. Определяются общие распределения TS , средняя сила цели \overline{TS} рыб в зонах облова средняя длина \bar{l} рыб в уловах. При помощи программ постобработки VI60 и Famas_2012 выделяются в зоне облова эхотрассы одиночных рыб с наименьшими и наибольшими значениями силы цели, определяются их \overline{TS}_{min} и \overline{TS}_{max} соответственно для наименьших \overline{L}_{min} и наибольших \overline{L}_{max} размеров рыб в уловах.

Третий этап. Сопоставляя \overline{TS} и \overline{TL} , \overline{TS}_{min} и \overline{L}_{min} , \overline{TS}_{max} и \overline{L}_{max} , определяются регрессионные $TS-l$ зависимости, охватывающие весь размерный диапазон рыб. При этом данные, лежащие за пределами 95%-ных доверительных границ, отфильтровываются как сомнительные [16, 19]. В табл. 1 представлены результаты определения $TS-l$ зависимостей для основных промысловых рыб в морях Северо-Восточной Атлантики и Арктики. Эти результаты периодически обсуждаются на двухсторонних встречах БИМИ и ПИНРО, на международных рабочих группах ИКЕС [13, 15] и принимаются согласованные $TS-l$ зависимости для практического использования при выполнении ТАС. и средних размерных классов. Второй вид – трассы эха одиночных рыб с максимальными значениями TS в зоне облова, с одной стороны, и максимальные размеры рыб в уло-

Таблица 4.5. Новые, полученные ПИНРО, и ныне применяемые $TS-L$ зависимости для сновных видов промысловых рыб в морях Северо-Восточной Атлантики и Арктики

Вид рыбы	Длина рыб L , см	Средняя длина \bar{L} , см	Новые $TS-L$ зависимости	Применяемые $TS-L$ зависимости
Треска атлантическая (Cod) в Баренцевом и Норвежском морях	5–40	34,1	$23,5 \log_{10} L - 72,2$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 66,7$ $n^* = 89, r^2 = 0,96, s. e. = 1,3$	$20 \log_{10}(L) - 68$ (БИМИ и ПИНРО), $20 \log_{10}(L) - 66$ (Канада [3, 14])
Треска атлантическая (Cod) в Баренцевом и Норвежском морях	40–90	79,0	$25,5 \log_{10} L - 75,4$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 64,8$ $n = 456, r^2 = 0,81, s. e. = 1,1$	$20 \log_{10}(L) - 68$ (БИМИ и ПИНРО), $20 \log_{10}(L) - 66$ (Канада [3, 14])
Треска атлантическая (Cod) в Баренцевом и Норвежском морях	90–145	109,0	$35,7 \log_{10} L - 95,4$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 63,4$ $n = 353, r^2 = 0,74, s. e. = 1,1$	$20 \log_{10}(L) - 68$ (БИМИ и ПИНРО),
Пикша (Haddock) в Баренцевом и Норвежском морях	9–81	36,9	$22,0 \log_{10} L - 69,6$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 66,4$ $n = 191, r^2 = 0,87, s. e. = 1,3$	$20 \log_{10}(L) - 68$ (БИМИ и ПИНРО)
Сайда (Saithe) в Баренцевом и Норвежском морях	8–115	62,3	$23,8 \log_{10} L - 70,8$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 63,9$ $n = 27, r^2 = 0,98, s. e. = 1,4$	$20 \log_{10}(L) - 68$ (БИМИ и ПИНРО) $20 \log_{10}(L) - 65,8$; $L = 45-91$ см [3]
Сайка (Polar cod) в Баренцевом море	3–23	8,7	$18,9 \log_{10} L - 68,6$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 69,6$ $n = 118, r^2 = 0,90, s. e. = 1,2$	$21,8 \log_{10} L - 72,7$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 71,0$ (БИМИ и ПИНРО)
Мойва (Capelin) в Баренцевом море	4–19	12,9	$19,0 \log_{10} L - 73,6$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 74,7$ $n = 35, r^2 = 0,97, s. e. = 0,7$	$19,1 \log_{10} L - 74,0$ (БИМИ и ПИНРО)
Путассу (Blue whiting) в Норвежском море на местах нереста	18–44	29,3	$28,3 \log_{10} L - 76,1$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 63,9$; $n = 51, r^2 = 0,91$, $s. e. = 0,8$	$17,4 \log_{10} L - 61,6$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 65,2$ [8,15]; $n = 15$, $r^2 = 0,17, s. e. = 1,2$
Путассу (Blue whiting) в Норвежском море на местах нагула	26–36	29,1	$36,7 \log_{10} L - 88,9$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 64,5$ $n = 15, r^2 = 0,88, s. e. = 0,7$	$20 \log_{10} L - 64,2$ (БИМИ), REPORT PGNAPEs, ICES*2009/ RMC:06 [20])
Окунь-клевач (Beaked redfish) в море Ирмингера и на Большой Ньюфаундлендской Банке (GNB)	14–36 36–49	30,3 40,3	$9,8 \log_{10} L - 54,9$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 69,9$ $n = 73, r^2 = 0,60, s. e. = 0,9$ $65,7 \log_{10} L - 141,4$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 68,0$; $n = 84, r^2 = 0,93$, $s. e. = 0,9$	$12,5 \log_{10} L - 59,5$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 71,3$ [12]; $L = 35,7-38,5$ см, $\bar{L} = 36,9$ см, $n = 16, r^2 = 0,15$
Окунь-клевач (Beaked redfish) в Баренцевом море	6–46	25,6	$18,8 \log_{10} L - 68,6$ или $20 \log_{10} \bar{L} - 70,3$	$20 \log_{10} L - 68$ (БИМИ и ПИНРО)

* n – количество пар данных L и TS , r^2 – достоверность аппроксимации, $s. e.$ – стандартная ошибка.

** ICES – Международный комитет по морским исследованиям.

ве, с другой стороны. Сопоставление этих данных позволяет определять зависимости TS от их длины для рыб средних и максимальных размерных классов. Информация обоих видов обладает как достоинствами, так и недостатками [Ермольчев, 2006]. Для регрессионного анализа данных TS и длины применялся вероятностно-статистический способ [Ricker, 1973] с использованием SAL-модели, обеспечивающей максимально возможную точность путем определения прямой и обратной линейных регрессий, функ-

циональной среднегеометрической линейной регрессионной зависимости и 95%-ных доверительных интервалов, позволяющих выявлять и отфильтровывать сомнительные данные.

В работе Ермольчева и др. [2016] приводятся данные о полученных $TS-L$ зависимостях для основных промысловых рыб в Северных морях. Указывается, что полученные $TS-L$ зависимости отличаются от ныне применяемых и особенно для тресковых видов рыб и окуня-клювача. Полученные данные о силе цели TS взрослых рыб на разных глубинах не подтвердили предполагаемое существенное уменьшение силы цели TS рыб с увеличением глубины их обитания. Изменения TS взрослых рыб на разных глубинах оказались в пределах вариаций, вызываемых поведением, пространственной ориентацией, физическим и биологическим состоянием рыб.

Таблица 4.6. Полученные $TS-L$ зависимостях для основных промысловых рыб в Северных морях.

TS (треска, БМ, $L=5-50$ см) = $21,6 \lg L - 69,2$; $r^2=0,97$; s. e. = 1,1; $n=102$,	(1)
TS (треска, БМ, $L=50-100$ см) = $25,5 \lg L - 75,4$; $r^2=0,81$; s. e. = 1,1; $n=456$,	(2)
TS (треска, БМ, $L=100-145$ см) = $36,6 \lg L - 97,4$; $r^2=0,78$; s. e. = 1,0; $n=359$,	(3)
TS (пикша, БМ, $L=8-81$ см) = $21,9 \lg L - 69,5$; $r^2=0,87$; s. e. = 1,3; $n=195$,	(4)
TS (сайка, БМ, $L=3,5-29$ см) = $18,4 \lg L - 68,3$; $r^2=0,97$; s. e. = 0,9; $n=178$,	(5)
TS (сайка, КМ, $L=3,5-29$ см) = $18,4 \lg L - 68,3$; $r^2=0,97$; s. e. = 0,9; $n=178$,	(6)
TS (мойва, БМ, $L=3,2-18$ см) = $19,0 \lg L - 73,8$; $r^2=0,95$; s. e. = 1,0; $n=109$,	(7)
TS (путассу, НМ, $L=18-44$ см) = $27,8 \lg L - 75,3$; $r^2=0,92$; s. e. = 0,8; $n=61$,	(8)
TS (сайда, БМ, $L=8-114$ см) = $23,8 \lg L - 70,8$; $r^2=0,98$; s. e. = 1,4; $n=27$,	(9)
TS (сельдь, МБ, $L=8-23$ см) = $23,7 \lg L - 76,1$; $r^2=0,96$; s. e. = 0,8; $n=8$,	(10)
TS (навага, МБ, $L=13-32$ см) = $28,4 \lg L - 80,6$; $r^2=0,85$; s. e. = 1,3; $n=24$,	(11)
TS (BRF, БМ, $L=6-36$ см) = $18,5 \lg L - 68,4$; $r^2=0,95$; s. e. = 1,1; $n=112$,	(12)
TS (BRF, БМ, $L=36-47$ см) = $56,0 \lg L - 126,9$; $r^2=0,79$; s. e. = 1,0; $n=67$,	(13)
TS (BRF, НМ, $L=35-38$ см) = $46,4 \lg L - 110,9$; $r^2=0,19$; s. e. = 0,7; $n=12$,	(14)
TS (BRF, МИ, $L=25-36$ см) = $23,3 \lg L - 74,5$; $r^2=0,76$; s. e. = 0,7; $n=35$,	(15)
TS (BRF, МИ, $L=36-49$ см) = $60,1 \lg L - 131,4$; $r^2=0,88$; s. e. = 0,9; $n=81$,	(16)

где s. e. — стандартная ошибка, n — количество пар данных TS и L , BRF — окунь-клювач, БМ — Баренцево море, КМ — Карское море, НМ — Норвежское море, МИ — море Ирмингера, МБ — море Белое.

Большой объем измерений TS рыб *in situ* выполняется в ПИНРО. Они были начаты в конце 80-х гг. при использовании научной эхолокационной аппаратуры вертикального действия норвежской фирмы «Simrad», сначала с одной характеристикой направленности, затем с использованием систем ЕК500 и ЕК60 с высокоточными ВАРУ и антеннами с «расщепленной» характеристикой, способных измерять TS рыб.

В последние годы в ПИНРО разработана методология определения *in situ* во время тралово-акустических съемок (ТАС) [Гаврилов и др., 2007; Ermolchev, 2009; Ермольчев, 2010], основанная на применении аппаратуры ЕК60 и учетных тралов. Для сбора и постобработки данных о TS используются компьютерные программы LTSD100, норвежскую VI60 в составе ЕК60 и российскую Famas [Nikolayev and Ubarchuk, 2004].

Программный пакет LTSD100 разработан в ПИНРО [Материалы отчетной сессии ПИНРО, 2007]. В нем реализован гидроакустический способ определения размерного состава рыб в скоплениях *in situ* [Ермольчев, 2002, 2005], позволяющий определять распределения силы цели рыб по линейным размерным классам одновременно для двух уравнений TS_1 и TS_2 вида $TS = B \log(TL) + A$ (где TL — зоологическая длина рыб) с любыми коэффициентами A и B из двух любых центральных частей характеристики направленности антенны, ограниченных выбранными углами в продольной и поперечной плоскостях судна. В пакете можно устанавливать до 100 размерных классов, охватывающих длину рыб от 1 до 500 см. Он состоит из двух модулей: первый предназначен для сбора данных о TS , включающих расстояния до них и углы их расположения в характеристике направленности, второй — для постобработки данных о TS из базы, собранной первым модулем.

Программы VI60 и Famas-2009 (новая версия) способны обрабатывать «сырые» (raw) файлы. Программа VI60 показала себя эффективной в режиме «TS detection» для выделения единичных эхотрасс одиночных рыб и определения *TS*-распределений от них. Программный пакет VI60 осуществляет управление процессом измерения и хранения «сырых» гидроакустических данных, включающих *TS* рыб, расстояния до них и углы их расположения в характеристике направленности и не зависящих от режимов, установленных в эхолокационной аппаратуре ЕК60. Постобработка «сырых» данных позволяет многократно анализировать их, устанавливая разные параметры аппаратуры, что повышает возможности пакета по сравнению с LTSD100 и Famas.

Достоинствами программы Famas-2009 являются высокая скорость работы, простой интуитивно понятный интерфейс, реализация в режиме «TS detection» изобретений ПИНРО, повышающих точность определения *TS*-распределений и средней силы цели *TS* рыб в выбранном слое [Ermolchev, 2002, 2005]. Программа Famas-2009 показала себя эффективной как для выделения единичных эхотрасс одиночных рыб и определения *TS* каждой рыбы, так и для определения *TS* от множества одиночных рыб в выбранном слое. Пакет Famas осуществляет сбор и накопление данных о *TS* рыб, включающих расстояния до них и углы их расположения в характеристике направленности, постобработку накопленных данных о *TS* с визуализацией на экране дисплея эхограммы, гистограммы распределения *TS* и ее среднего значения.

Для определения зависимости между *TS* и длиной *L* для всех размерных классов используется акустическая и биологическая информация двух видов. Первый вид – средняя *TS* рыб в зоне облова, с одной стороны, и средняя длина рыб в улове, с другой. Сопоставление этих данных позволяет определять зависимость *TS* от их длины для рыб малых и средних размерных классов. Второй вид – трассы эха одиночных рыб с максимальными значениями *TS* в зоне облова, с одной стороны, и максимальные размеры рыб в улове, с другой стороны. Сопоставление этих данных позволяет определять зависимости *TS* от их длины для рыб средних и максимальных размерных классов. Информация обоих видов обладает как достоинствами, так и недостатками [Ермольчев, 2006]. Для регрессионного анализа данных *TS* и длины применялся вероятностно-статистический способ [Ricker, 1973] с использованием SAL-модели, обеспечивающей максимально возможную точность путем определения прямой и обратной линейных регрессий, функциональной среднегеометрической линейной регрессионной зависимости и 95%-ных доверительных интервалов, позволяющих выявлять и отфильтровывать сомнительные данные. В табл. 4.7 приводятся параметры уравнений силы цели гидробионтов основных видов, применяемые в ПИНРО.

В табл. 4.8 приведены новые, полученные в ПИНРО и ныне применяемые зависимости *TS*-*L_T* для основных видов промысловых рыб в морях Северо-Восточной Атлантики (полезны при сравнении результатов предыдущих съемок).

Данные по *TS* некоторых пресноводных рыб России приведены в работе [Borisenko и др., 2006].

Нельзя сказать, что достаточно исследованы зависимости *TS* рыб от глубины, хотя нередко рыбы совершают значительные перемещения по глубине. В работе Ермольчева [2014] указывается, что некоторые исследования подтвердили предположение о такой зависимости, но только до небольших глубин: до 25 м для сельди, до 100 м для трески и минтая, до 80 м для мойвы и до 150 м для окуня-клювача [Horne et al., 2009; Mikai and Lida, 1996; Ona, 1990; Ona and Svellingen, 2011; Reynisson, 1992]. Норвежские исследователи предложили для взрослой мойвы зависимость *TS* от длины *L* и глубины *H* в диапазоне глубин от 15 до 80 м в виде формулы [Ona and Svellingen, 2011]:

$$TS = 20 \lg L - 6,4 \lg(1 + H / 10) - 71,1.$$

В указанной работе [Ермольчев, 2014] приведены зависимости *TS* некоторых рыб от длины *L* и глубины *h* и не отмечено заметных изменений *TS* от *h*. На основе полученных данных делаются следующие выводы:

Таблица 4.7. Параметры уравнений силы цели гидробионтов основных видов, применяемые в ПИНРО [Методические указания..., 2006]

Название, методика, район и время выполнения съемок	Уравнения силы цели $TS = \text{Alg}(l) - B$
МВ ТАС ДР, учет молоди, оценка запасов, в том числе ТС палтуса, I, Па, Ъ ИКЕС, октябрь–декабрь	Треска, пикша, сайда, путассу: $A = 21,8; B = 72,7$ ($l > 10,3$ см) $A = 14,4; B = 65,2$ ($l < 10,3$ см) Мойва: $A = 19,1; B = 74,0$ ($l > 9,7$ см) $A = 12,9; B = 67,8$ ($l < 9,7$ см) Сельдь: $A = 20,0; B = 71,9$ ($l > 9,2$ см) $A = 11,3; B = 63,7$ ($l < 9,2$ см) Сайка: $A = 21,8; B = 74,9$ ($l > 14,7$ см) $A = 12,8; B = 64,0$ ($l < 14,7$ см) Окунь-клювач: $A = 30,9; B = 88,9$ ($l > 19,9$ см) $A = 17,1; B = 70,9$ ($l < 19,9$ см) Окунь морской: $A = 29,55; B = 86,7$ ($l > 19,9$ см) $A = 17,7; B = 71,3$ ($l < 19,9$ см) Песчанка: $A = 20,0; B = 78,3$
ТАС окуня-клювача, НЭЗ и зона Шпицбергена, апрель–май	Окунь-клювач: $A = 30,9; B = 88,9$ ($l > 19,9$ см) $A = 17,1; B = 70,9$ ($l < 19,9$ см) Окунь морской: $A = 29,55; B = 86,7$ ($l > 19,9$ см) $A = 17,7; B = 71,3$ ($l < 19,9$ см)
ТАС неполовозрелой части пикши, РЭЗ, ГУ и НЭЗ, май–июнь	Треска, пикша, сайда: $A = 21,8; B = 72,7$ ($l > 10,3$ см) $A = 14,4; B = 65,2$ ($l < 10,3$ см)
Рос.-норв. ТАС ДР, РЭЗ, НЭЗ, зона Шпицбергена, февраль	Треска, пикша, сайда: норв. методика: $A = 20,0; B = 68,0$ рос. методика: $A = 21,8; B = 72,7$ ($l > 10,3$ см) $A = 14,4; B = 65,2$ ($l < 10,3$ см)
Международная ТАС окуня-клювача в море Ирмингера, СВА, СЗА, июнь–июль	Окунь-клювач, окунь морской: $A = 20,0; B = 71,3$ Миктофиды: $A = 25,2; B = 75,0$
ТАС нерестового запаса мойвы, Баренцево море, январь–март	Мойва: $A = 19,1; B = 74,0$ ($l > 9,7$ см) $A = 12,9; B = 67,8$ ($l < 9,7$ см)
ТАС молоди атл.-сканд. сельди, Баренцево море, май–июнь	Сельдь: $A = 20,0; B = 71,9$ ($l > 9,2$ см) $A = 11,3; B = 63,7$ ($l < 9,2$ см)
Международная ТАС нерестового шаса путассу, СВА, март–апрель	Путассу: $A = 21,8; B = 72,7$
Международная ТАС запаса атл.-сканд. сельди, Норвежское море, июнь	Сельдь: $A = 20,0; B = 71,9$
Рос.-норв. МВ ТАС ПР, мойвы, сайки и мол. сельди, I, Па, ПЬ ИКЕС, сентябрь–октябрь	Мойва: $A = 19,1; B = 74,0$ Сельдь: $A = 20,0; B = 71,9$ Сайка: норв. методика: $A = 21,8; B = 72,7$ рос. методика: $A = 21,8; B = 74,9$ ($l > 14,7$ см) $A = 12,8; B = 64,3$ ($l < 14,7$ см)

– В Баренцевом море TS трески и окуня-клювача на глубинах от 100 до 550 м, TS сайки на глубинах от 100 до 350 м и TS мойвы на глубинах от 60 до 250 м не претерпевают существенных изменений.

– Некоторое уменьшение TS с глубиной (примерно на 1,7 дБ) наблюдается у окуня-клювача в Баренцевом море, но только для размерного класса от 35 до 40 см (средняя

Таблица 4.8. Новые и применяемые ранее зависимости $TS-L_T$ для основных видов промысловых рыб в морях Северо-Восточной Атлантики [Гаврилов и др., 2011]

№	Вид рыбы	Длина, см	Средняя длина L_T , см	Новые (new) зависимости $TS-L_T$, полученные в ПИНРО	Применяемые (old) зависимости $TS-L_T$	$TS_{new} - TS_{old}$ для L_T , дБ
1	Треска Cod	5–40	34,2	$23,4 \log_{10}(L_T) - 72,1$ $n=87, r^2=0,96, s. e.=1,2$	$20 \log_{10}(L_T) - 68$ [6]	1,1
2	Треска Cod	40–90	79,0	$25,7 \log_{10}(L_T) - 75,6$ $n=452, r^2=0,80, s. e.=1,1$	$20 \log_{10}(L_T) - 68$ [6]	3,2
3	Треска Cod	90–140	106,0	$34,7 \log_{10}(L_T) - 93,3$ $n=271, r^2=0,73, s. e.=1,1$	$20 \log_{10}(L_T) - 68$ [6]	4,5
4	Пикша Haddock	9–81	36,3	$22,1 \log_{10}(L_T) - 69,7$ $n=177, r^2=0,87, s. e.=1,2$	$20 \log_{10}(L_T) - 68$ [6]	1,6
5	Сайда Saithe	8–115	49,9	$24,0 \log_{10}(L_T) - 70,9$ $n=13, r^2=0,98, s. e.=1,5$	$20 \log_{10}(L_T) - 68$ [6]	3,9
6	Сайка Polar cod	3–23	8,7	$18,9 \log_{10}(L_T) - 68,6$ $n=118, r^2=0,90, s. e.=1,4$	БИМИ (IMR) [6]: $21,8 \log_{10}(L_T) - 72,7$ ПИНРО [6]: $21,8 \log_{10}(L_T) - 74,9$	1,4 3,6
7	Мойва Capelin	4–19	12,9	$19,0 \log_{10}(L_T) - 73,6$ $n=35, r^2=0,97, s. e.=0,7$	$19,1 \log_{10}(L_T) - 74,0$ [6]	–0,3
8	Путассу Blue whiting	18–44	28,9	$25,6 \log_{10}(L_T) - 72,8$ $n=76, r^2=0,78, s. e.=0,9$	$21,8 \log_{10}(L_T) - 72,7$ [6]	5,4
9	Окунь-клювач Deep-water redfish, море Ирмингера	12–40	33,9	$17,2 \log_{10}(L_T) - 65,5$ $n=38, r^2=0,85, s. e.=0,8$	IMRI* [15]: $12,5 \log_{10}(L_T) - 59,5$ $n=16, r^2=0,15$ WKTAR** [15]: $10,6 \log_{10}(L_T) - 55,4$ $n=110, r^2 < 0,15$	–1,17 0,02
10	Окунь-клювач Deep-water redfish, Норвежское море	12–40	33,9	$17,2 \log_{10}(L_T) - 65,5$, $n=38, r^2=0,85, s. e.=0,8$	ICES***, 2008 [15] $20 \log_{10}(L_T) - 68$ WKTAR** [15]: $10,6 \log_{10}(L_T) - 55,4$ $n=110, r^2 < 0,15$	1,8 0,02
11	Золотистый окунь (Redfish), Норвежское море	8–45	24,2	$18,7 \log_{10}(L_T) - 66,0$, $n=3, r^2=0,99, s. e.=0,3$	$20 \log_{10}(L_T) - 68$ [6]	0,2

*IMRI – Исландский морской исследовательский институт.

**WKTAR – Рабочий семинар по определению силы цели морских окуней.

***ICES – Международный комитет по морским исследованиям. L_T – средняя длина тела, s. e. – дисперсия, r – коэффициент корреляции, n – количество пар проб.

длина 36 см), тогда как у более крупных рыб наблюдается обратная зависимость TS от глубины.

– Не выявлены существенные изменения TS и окуня-клювача в море Ирмингера в диапазоне глубин от 250 до 750 м. Более того, TS окуня-клювача в море Ирмингера сначала увеличивается с глубиной, достигает максимального значения на глубинах 350–400 м, затем снова уменьшается, но на глубинах 700–750 м не становится меньше, чем на глубине 250 м. В целом отмечается, что для перечисленных видов рыб изменения TS с глубиной находятся в пределах вариаций TS , вызываемых поведением, пространственной ориентацией, физическим и биологическим состоянием рыб.

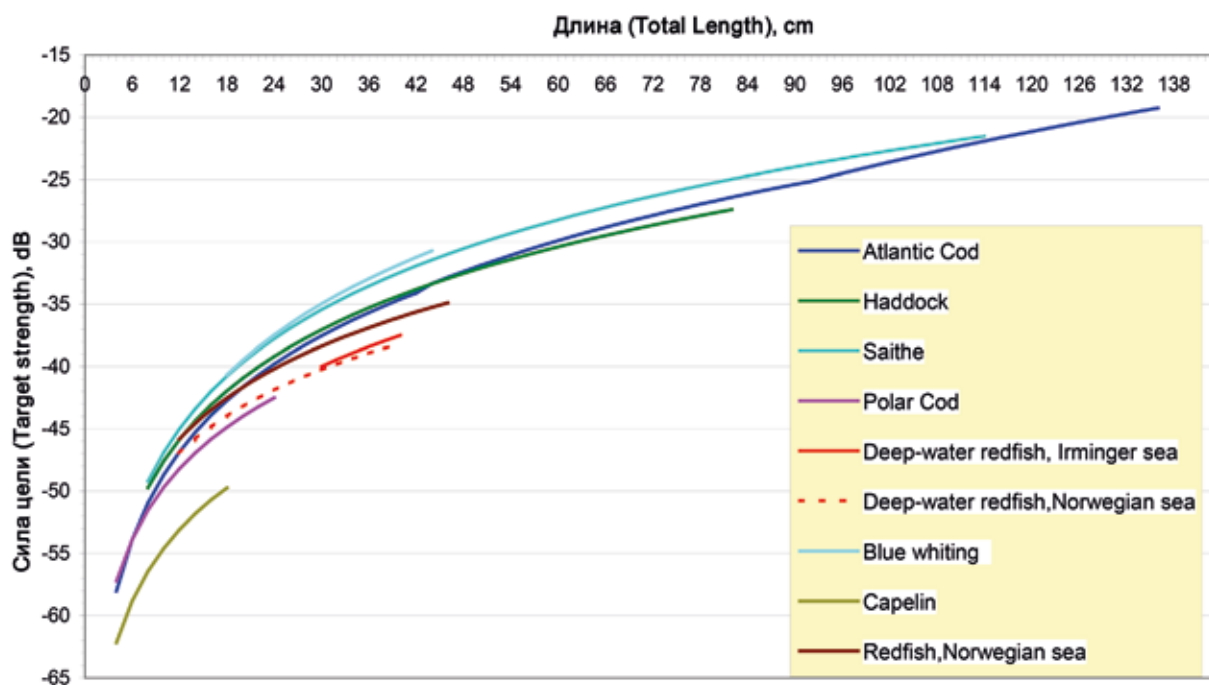


Рис. 4.3. Зависимости $TS-L_T$ для атлантической трески, пикши, сайды, сайки, окуня-клевача, золотистого окуня, путассу и мойвы в морях Северо-Восточной Атлантики [Ермольчев, 2013]

На рис. 4.3 представлены графические зависимости TS от длины некоторых морских рыб [Ермольчев, 2013].

4.3. РАССЕЯНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СКОПЛЕНИЯМИ ВОДНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Размеры многих гидробионтов нередко соизмеримы с длинами волн, излучаемых гидроакустической рыбопоисковой аппаратурой активной локации. При этом возникающие дифракционные явления близки к тем, которые исследовались Рэлеем, Ми и другими учеными в задачах о распространении волн в мутных средах [Юданов, 1992]. Как следует из теории мутных сред, характер и интенсивность рассеяния зависят не только от акустических свойств отдельных объектов, но и от плотности их распределения.

При достаточно широкой диаграмме направленности, которую обычно имеют рыбопоисковые приборы, в разрешающий или импульсный объем попадает сразу большое количество объектов и от всех происходит рассеяние звука. Анализ рассмотренной Рэлеем задачи сложения большого числа отражений со случайным распределением амплитуд и фаз показывает, что при многочисленных измерениях средняя интенсивность регистрируемых эхосигналов равна сумме интенсивностей отражений от отдельных объектов, попадающих в импульсный объем. Таким образом, средняя интенсивность отраженных сигналов оказывается пропорциональной количеству регистрируемых объектов, а значит и плотности их концентрации. Это положение подтверждается экспериментальными исследованиями [Юданов и др., 1965].

Иная картина рассеяния звука получается при очень плотных концентрациях объектов, когда расстояния между соседними из них сравнимы с длиной звуковой волны. В этом случае имеет место взаимное влияние полей рассеяния отдельных объектов. Рассеивая звуковую энергию (рассеяние первого порядка), каждый объект облучает этой энергией находящиеся вблизи другие объекты, которые также рассеивают часть этой энергии (рассеяние второго порядка) и т. д. В результате возникает явление так называемого многократного рассеяния. При достаточно большой плотности скоплений

может иметь место также существенный вклад синфазных рассеяний от отдельных объектов, которые, складываясь, дают регулярную, когерентную составляющую результирующего эхосигнала.

Рэлеевское рассеяние звука. Наиболее просто оценивается величина отраженной от скопления энергии при Рэлеевском законе рассеяния, когда средняя интенсивность эхосигнала пропорциональна количеству облучаемых прибором рыб. Учитывая в этом случае неравномерность распределения энергии в импульсном объеме от направленного действия антенны гидроакустического прибора, акустическое сечение скопления выражается как [Craig and Forbes, 1969]:

$$\sigma_{\text{ск}} = \rho_v V_{\text{имп}} \bar{\sigma} = \rho_v \frac{c\tau}{2} r^2 \sigma \Psi, \quad (4.10)$$

где ρ_v – объемная плотность скопления; $V_{\text{имп}}$ – импульсный объем; $\bar{\sigma}$ – акустическое сечение рыбы, усредненное для всех рыб, попадающих в импульсный объем; $c\tau$ – протяженность лоцируемого импульса в воде; r – дистанция от акустической антенны до скопления; σ – акустическое сечение рыбы на оси антенны; Ψ – интегральный фактор направленности антенны.

Под величиной Ψ понимается интеграл от функции направленности антенны по телесному углу, т. е.

$$\Psi = \int_0^{2\pi} \int_{\theta/2}^{\pi/2} G(\theta, \varphi) \frac{\theta}{2} d\frac{\theta}{2} d\varphi.$$

Акустическое сечение скопления рыб характеризует степень рассеяния звуковой энергии в обратном направлении, однако не дает объективной оценки рассеивающих свойств рыбных скоплений. Как следует из формулы (4.10), величина $\sigma_{\text{ск}}$ зависит от параметров гидроакустического прибора и дистанции до скопления. Для объективной характеристики отражательных свойств рыбных скоплений пользуются другим параметром – так называемым коэффициентом объемного рассеяния в обратном направлении. Этот коэффициент представляет собой меру обратного рассеяния звука единичным объемом рыбного скопления и определяется по формуле:

$$m_v = \rho_v \sigma. \quad (4.11)$$

Коэффициент объемного рассеяния является функцией только физических свойств скоплений, а именно, акустического сечения рыб и плотности их концентрации.

Из выражений (4.10) и (4.11) получим следующую формулу:

$$m_v = \sigma_{\text{ск}} / (c\tau/2) r^2 \Psi. \quad (4.12)$$

Как показали результаты проверки формул (4.10) и (4.12) на искусственных концентрациях рыб известной плотности, расчеты значений $\sigma_{\text{ск}}$ и m_v удовлетворительно согласуются с экспериментально полученными данными.

Ориентировочные расчеты по формуле (4.11) показали, что коэффициент объемного рассеяния звука от концентраций рыб может изменяться в пределах 10^{-8} – 10^{-2} 1/м. Следует, однако, иметь в виду, что формула (4.12) справедлива только для концентраций сравнительно небольшой плотности, рассеяние звука которыми подчиняется рэлеевскому закону; эта формула не годится для очень плотных скоплений. Поэтому приведенные здесь предельные значения коэффициентов объемного рассеяния звука рыбными скоплениями следует рассматривать как весьма приближенные.

Когерентное отражение звука. Если скопление имеет достаточно большую плотность и расстояния между отдельными особями сравнимы с четвертью периода волны, то обратное рассеяние звука приобретает регулярный, когерентный характер [Юданов, 1981]. Когерентная составляющая акустического сечения $\sigma_{\text{кгр}}$, как известно [Юданов,

1981], пропорциональна квадрату числа объектов в каждой из зон Френеля, содержащихся в импульсном объеме:

$$\sigma_{\text{кгр}} = \frac{1}{160} \pi r^4 \lambda^2 \sigma_{\rho_v} \Psi \theta_{\rho}^2, \quad (4.13)$$

где θ_{ρ} — эффективная ширина ультразвукового пучка прибора¹.

Для оценки значимости когерентной составляющей воспользуемся коэффициентом когерентности

$$K_{\text{кгр}} = \frac{\sigma_{\text{кгр}}}{\sigma_{\text{нкгр}}}, \quad (4.14)$$

где $\sigma_{\text{нкгр}}$ — некогерентная составляющая акустического сечения скопления [см. формулу 4.10].

Подставляя (4.10) и (4.13) в (4.14) после преобразований, получаем:

$$K_{\text{кгр}} = \left(\pi r^2 \lambda^2 \rho_v \theta_{\rho}^2 \right) (80 \text{сТ}). \quad (4.20)$$

Таким образом, доля когерентного отражения определяется длиной волны (рабочей частотой), длительностью импульсов, шириной акустического пучка, плотностью и глубиной расположения скопления. В работе Юданова [1992] принято условие считать рассеяние некогерентным (рэлеевским) при $K_{\text{кгр}} \leq 0,1$ и полностью когерентным при $K_{\text{кгр}} \geq 10$.

Правильность выражения (4.20) была проверена на искусственных моделях скоплений объектов. Результаты проверки показали удовлетворительное соответствие экспериментальных данных с расчетными. Однако при оценке когерентного отражения в реальных условиях следует принимать во внимание рассеяние звука на различных неорганических и органических включениях, а также на неоднородностях микроструктуры водной среды, которые могут создавать дополнительные флуктуации эхосигналов и тем самым сглаживать влияние когерентного отражения. Кроме того, необходимо принимать во внимание фазовую функцию направленности акустической антенны, т. к. сигналы по первому, третьему и всем последующим нечетным боковым лепесткам приходят в противофазе по отношению к сигналу по основному лепестку и тем самым уменьшают степень когерентности рассеяния. Учитывая указанные обстоятельства, приведенная выше предварительная оценка когерентности требует дополнительной экспериментальной проверки и уточнения (см. также Зафекмана [1994]).

Множественное рассеяние звука. Как уже отмечалось, в очень плотных концентрациях кроме когерентной составляющей рассеяния необходимо также учитывать множественное рассеяние. При значительной плотности скоплений множественное рассеяние (второго и более высоких порядков) может быть велико.

В работе Юданова [1992] рассматривается, при каких условиях множественное рассеяние звука в промысловых концентрациях становится существенным. В теории рассеяния света в мутных средах одной из важнейших характеристик среды является ее оптическая толщина. За единицу оптической толщины в один рэлей принимается длина пути сигнала в среде, на которой его интенсивность убывает в «е» раз. Оптическая толщина $\delta_{\text{опт}}$ может быть выражена через безразмерные параметры рассеивающей среды:

$$\delta_{\text{опт}} = \frac{X_2^2 X_4}{X_3^3}. \quad (4.21)$$

¹ Эффективной шириной ультразвукового пучка считается его максимальная ширина, в пределах которой объект регистрируется прибором.

Если учесть, что акустические волновые явления аналогичны оптическим, то соотношение (4.21) может быть использовано при оценке акустического многократного рассеяния. Подставляя в (4.21) формулы (4.3), (4.4) и (4.5), а также полученные применительно к вертикальной локации значения L_2 , L_3 и L_4 , получим следующее выражение для акустической толщины рыбных скоплений [Юданов, 1981]:

$$\delta_{\text{ак}} = 0,12c\tau\rho_u L_p^2. \quad (4.22)$$

Как видно из соотношения (4.22), акустическая толщина рыбного скопления тем больше, чем больше протяженность проникающих в него звуковых импульсов, плотнее скопление или крупнее рыбы.

Из теории рассеяния в мутных средах следует, что при $\delta_{\text{ак}} < 0,1$ рэля многократное рассеяние можно не учитывать, при $0,1$ рэля $< \delta_{\text{ак}} \leq 0,3$ рэля нужна поправка на рассеяние второго порядка, а при $\delta_{\text{ак}} > 0,3$ рэля имеет значение весь комплекс эффектов многократного рассеяния.

Приведенные соображения проверялись экспериментально на искусственных моделях скоплений [Калихман, Бондаренко, Протащук, 1980]. Установлено хорошее соответствие экспериментальных данных с расчетами. При использовании низкочастотного гидроакустического прибора (рабочая частота 30 кГц и $\tau = 1$ мс) многократное рассеяние становилось заметным при плотностях концентрации мелких рыб ($L_p = 8$ см) более 120 экз/м³, т. е. при $\delta_{\text{ак}} > 0,15$ рэля (при $X_3 \leq 2$, $X_4 = 15$).

Эмпирическими исследованиями установлено, что многократное рассеяние увеличивает длительность и уменьшает интенсивность эхосигналов, не изменяя их энергию. Следовательно, многократное рассеяние в общем не должно влиять на результат эхоинтегрирования и оценки плотности промысловых скоплений. Однако увеличение длительности эхосигналов от плотных скоплений приводит к искажениям размеров их изображения при регистрации гидроакустическими приборами.

Следует также иметь в виду, что по мере проникновения звуковых волн в глубь плотного скопления происходит дополнительное уменьшение их интенсивности за счет затухания энергии в толще концентрации. Это объясняется тем, что при многократном рассеянии звуковым волнам приходится проходить внутри скопления большие пути и испытывать многократное поглощение в самих рыбах. Естественно, при наличии когерентного и многократного рассеяния, а также затухания звука в водно-рыбной среде, пропорциональность между плотностью концентрации рыб и интенсивностью эхосигналов нарушается. Для установления зависимости величины эхосигналов от степени концентрации морских объектов в плотных скоплениях необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

Интенсивность эхосигналов, степень их флуктуаций, а также характер акустического отображения (изображения) скоплений на экранах дисплеев гидроакустических приборов в сильной степени зависят от количества промысловых объектов n_o в импульсном объеме $V_{\text{имп}}$, которое может быть определено из соотношения:

$$n_o = V_{\text{имп}}\rho_v = \frac{\pi}{8} r^2 \rho_v \theta_v^2 c\tau. \quad (4.23)$$

Как следует из соотношения (4.23), количество особей в импульсном объеме зависит от плотности концентрации, параметров рыбопоискового прибора и дистанции до скопления.

Если при обнаружении скопления в импульсный объем гидроакустического прибора одновременно попадает не больше одного объекта, то в точку приема приходят эхосигналы от единичных особей; огибающая каждого такого сигнала имеет плавную форму и протяженность, близкую к форме зондирующего импульса. Будем считать эхосигналы от j единичных объектов элементарными. Такие эхосигналы регистрируются гидроакустическим прибором раздельно.

Если в импульсном объеме гидроакустического прибора оказывается сразу несколько или даже сотни объектов ($X_3 \gg 1$), то эхосигналы от них представляют собой сумму элементарных отражений от отдельных особей. В этом случае, как уже указывалось, зависимость интенсивности эхосигналов от количества облучаемых объектов подчиняется закономерностям, которые были подробно изучены Рэлеем. Величина средней интенсивности эхосигналов согласно рэлеевской зависимости пропорциональна количеству объектов в импульсном объеме.

Рэлеевские закономерности сохраняются, если в импульсный объем попадает не менее семи-десяти объектов [Ольшевский, 1973]. Эхосигналы, подчиняющиеся рэлеевским закономерностям, будем называть рэлеевскими. Огибающая этих эхосигналов имеет изрезанный характер, сильно флуктуирует от одного цикла лоцирования к другому.

Если число объектов в импульсном объеме меньше семи-десяти, то рэлеевские закономерности нарушаются, причем величина флуктуаций эхосигналов еще более возрастает. Такие эхосигналы от небольшого количества объектов названы групповыми. Они представляют собой серии перекрывающихся друг друга элементарных сигналов.

Рэлеевские зависимости распределения эхосигналов не выполняются и при значительном количестве рыб в импульсном объеме, когда расстояния между ними сравнимы с длиной волны. Как уже отмечалось, при достаточно большой плотности скоплений в результирующих эхосигналах имеет место регулярная, когерентная составляющая. Степень когерентности эхосигналов зависит от плотности концентраций и размеров полупериодной зоны. Соотношение между когерентными и некогерентными эхосигналами определяется коэффициентом когерентности $K_{\text{кр}}$. При этом количество объектов в импульсном объеме [Юданов, 1981]:

$$n_o = 10K_{\text{кр}} \left(\frac{c\tau}{\lambda} \right)^2. \quad (4.24)$$

Как уже отмечалось, было принято считать эхосигнал некогерентным (рэлеевским) при $K_{\text{кр}} \leq 0,1$ и полностью когерентным при $K_{\text{кр}} \geq 10$. Если коэффициент когерентности имеет промежуточное значение, то эхосигнал включает в себя как когерентную, так и некогерентную составляющую. Такой эхосигнал называется сложным.

Гидроакустические наблюдения в море показали, что при когерентном рассеянии амплитуда суммарного эхосигнала не может сильно изменяться за время, существенно меньшее длительности излучаемого импульса. В результате когерентные эхоимпульсы от плотных скоплений состоят как бы из отдельных пакетов с примерно одинаковой амплитудой. Ширина таких пакетов близка к длительности зондирующих импульсов, однако форма существенно отличается от огибающей излученного импульса.

Таблица 4.9. Граничные условия для эхосигналов разных типов

Тип эхосигнала	Количество объектов в импульсном объеме	Предельная плотность скопления
Элементарный	< 1	$8/\pi r^2 \theta^2, c\tau$
Групповой	$1 < n \leq 10$	$80/\pi r^2 \theta^2, c\tau$
Рэлеевский	$10 < n \leq (c\tau/2)^2$	$8c\tau/\pi r^2 \theta^2, \lambda^2$
Сложный	$(c\tau/\lambda)^2 < n \leq (10c\tau/\lambda)^2$	$800c\tau/\pi r^2 \theta^2, \lambda^2$
Когерентный	$> (10c\tau/\lambda)^2$	—

Таким образом, в зависимости от количества объектов, попадающих в импульсный объем, эхосигналы можно разделить на элементарные, групповые, рэлеевские, сложные и когерентные. Принимая во внимание установленные граничные значения количества рыб в импульсном объеме для каждого типа эхосигналов, можно по формуле (4.23) определить соответствующие предельные плотности скоплений. В табл. 4.9 [Юданов, 1992]

приведены выражения для определения предельных значений плотностей применительно к каждому типу эхосигналов.

Чтобы иметь представление о граничных значениях плотности концентраций объектов применительно к типовой рыбопоисковой аппаратуре, в работе Юданова [1992] произведены ориентировочные расчеты для широко используемого в те годы на наших судах комплекса ГАС «Сарган» в режиме вертикальной локации рыбных скоплений на глубинах 100 м. Для упрощения расчетов он принимал, что величина $\theta_{\text{э}}$ равна углу направленности антенны гидроакустического прибора по уровню давления 0,7. Подставляя исходные данные для низкочастотного тракта ($f = 20$ кГц; $\lambda = 7,5 \cdot 10^{-2}$ м; $c\tau = 1,5$ м; $\theta_{0,7} = 0,23$ рад) и для высокочастотного тракта ($f = 136$ кГц; $\lambda = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м; $c\tau = 0,45$ м; $\theta_{0,7} = 0,05$ рад) в выражения, приведенные в табл. 4.2, получим следующие ориентировочные граничные значения:

– для низкочастотного тракта ГАС «Сарган» предельные плотности рыбных скоплений при элементарном сигнале $\rho_{\text{эл}} = 3,3 \cdot 10^{-3}$ экз/м, при групповом $\rho_{\text{гр}} = 3,2 \cdot 10^{-2}$ экз/м³, при рэлеевском $\rho_{\text{рэл}} = 1,3$ экз/м³; при сложном $\rho_{\text{сл}} = 1,3 \cdot 10^{-2}$ экз/м³;

– для высокочастотного тракта $\rho_{\text{эл}} = 0,2$ экз/м³; $\rho_{\text{гр}} = 2,3$ экз/м³; $\rho_{\text{рэл}} = 3,8 \cdot 10^2$ экз/м³; $\rho_{\text{сл}} = 3,8 \cdot 10^4$ экз/м³.

Результаты расчетов показывают, что при регистрации скоплений разными трактами ГАС «Сарган» граничные значения плотностей концентраций могут отличаться на несколько порядков. Следовательно, характер эхосигналов от скоплений может изменяться в больших пределах в зависимости от типа рыбопоискового прибора, его параметров.

РАЗДЕЛ 2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ, РАБОТЫ, УСТРОЙСТВО, РАБОТА И ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Работа средств рыбохозяйственной гидроакустики неразрывно связана с процессами излучения, распространения и приема акустических колебаний. В предыдущем разделе основное внимание уделялось рассмотрению второго из указанных процессов.

Большая часть этих средств базируется на методе эхолокации с использованием разверток времени для измерения временных промежутков от момента излучения зондирующего сигнала до момента приема эхосигнала.

Временное запаздывание эхосигнала может измеряться по-разному в зависимости от того, что представляет собой зондирующий сигнал. Если он представляет собой непрерывно излучаемую акустическую волну, то для измерения временного запаздывания эхосигнала и определения расстояния до объекта могут применяться различные методы.

Фазовый метод основан на том, что разность фаз зондирующего сигнала и эхосигнала в каждый конкретный момент времени пропорциональна временному запаздыванию эхосигнала. Если зондирующий сигнал представляет собой непрерывную синусоидальную акустическую волну со звуковым давлением:

$$p_3(t) = p_m \cos \omega_0 t,$$

то звуковое давление эхосигнала $p_э$ будет:

$$p_э = p_{mэ} \cos[\omega_0(t + t_э) + \psi],$$

где ψ – приращение фазы эхосигнала при отражении зондирующего сигнала от объекта.

Разность фаз $\Delta\varphi$ эхосигнала и зондирующего сигнала будет $\Delta\varphi = \omega_0 t_э + \psi$.

Отсюда получаем:

$$t_э = \frac{\Delta\varphi - \psi}{\omega_0}.$$

С учетом этого согласно известной формуле по определению расстояния r в водной среде при средней скорости звука c $r = (ct_э)/2$ получаем:

$$r = \frac{(\Delta\varphi - \psi)c}{2\omega_0}.$$

Таким образом, при определении расстояния фазовым методом необходимо измерить разность фаз эхосигнала и зондирующего импульса. Но необходимо еще знать и приращение фазы при отражении, что осложняет ситуацию, т. к. приращение фазы при отражении неизвестно и независимому измерению не поддается. От этой проблемы можно избавиться, если проводить измерения на двух близких частотах ω_{01} и ω_{02} .

В результате будем иметь две разности фаз, отнесенные к одному и тому же моменту времени:

$$\Delta\varphi_1 = \omega_{01}t_3 + \psi,$$

$$\Delta\varphi_2 = \omega_{02}t_3 + \psi.$$

В этих разностях фаз по причине независимости от частоты набега фазы при отражении значения ψ могут быть приняты равными на обеих частотах. Следовательно, разность фаз $\Delta\varphi_{12}$ уже не будет содержать приращения фазы при отражении:

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = (\omega_{02} - \omega_{01})t_3 = \Delta\omega 2r/c,$$

где $\Delta\omega = \omega_{02} - \omega_{01}$.

Таким образом, при двух частотах имеем:

$$r = \Delta\varphi_{12}c / 2\Delta\omega.$$

В соответствии с этим выражением шкалу фазометра можно проградуировать непосредственно в единицах расстояния. Поскольку разность фаз можно измерить достаточно точно, то фазовый метод обладает потенциально высокой точностью измерения расстояний.

Частотный метод состоит в излучении непрерывной модулированной по частоте акустической волны. Закон модуляции чаще всего выбирается линейным (рис. 2.1), т. е. частота излучаемых акустических колебаний изменяется по пилообразной форме в некотором диапазоне частот от f_1 до f_2 . Период повторения пилообразного изменения частоты устанавливается таким, чтобы акустические колебания успели пройти путь до цели, удаленной на расстояние, равное предельной дальности действия аппаратуры, и вернуться обратно в точку излучения-приема. За это время излучаемая частота изменится от f_1 до f_2 . Если на пути распространения акустических волн окажется отражающий их объект, например, рыба или косяк рыбы, то в точку приема будут возвращаться отраженные колебания. Отраженная от объекта волна будет иметь тот же характер изменения частоты, но она будет отличаться от частоты излучаемого сигнала в момент приема. Величина разности частот зависит от дистанции между излучающей и приемной антеннами и целью, т.е. пропорциональна величине временного запаздывания t_3 эхосигнала и служит для определения расстояния до объекта [Лоуренс, 1969]. Если за период модуляции T_m девиация частоты составляет Δf_m , то разность Δf_t частот зондирующего сигнала и эхосигнала составит:

$$\Delta f_t = \Delta f_m (t_3 / T_m).$$

Таким образом, измерив значение Δf_t , можно получить t_3 , а следовательно, и расстояние r до объекта:

$$r = \Delta f_t (c T_m / 2 \Delta f_m) = \Delta f_t (r_{\text{макс}} / \Delta f_m),$$

где $r_{\text{макс}} = c T_m / 2$ – максимальное расстояние, которое возможно измерить при данном периоде модуляции.

В гидроакустической аппаратуре подобного типа используются две отдельные антенны – излучающая и приемная. Наличие отдельных антенн обязательно для таких станций в связи с тем, что одновременно выполняются как непрерывное излучение, так и непрерывный прием акустических колебаний.

Поступающие на передающую антенну колебания переменной частоты одновременно подаются на смеситель приемного тракта. Отраженные от цели колебания поступают на приемную акустическую антенну, а с нее – на смеситель (балансный модулятор), в котором происходит выделение разностной частоты между излучаемыми и принимаемыми колебаниями. Разностная частота, пропорциональная расстоянию до цели, фильтруется и усиливается (рис. 2.1).

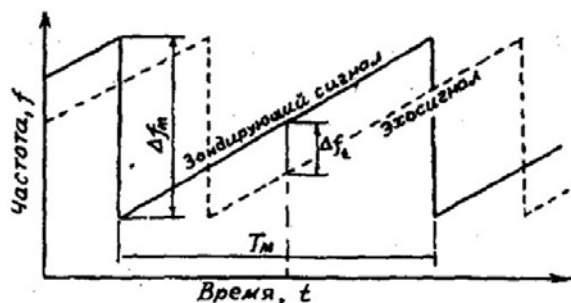


Рис. 2.1. Частотная модуляция при непрерывном излучении:
 — частота зондирующего сигнала; ---- — частота эхосигнала

типа использовалась в рыбохозяйственных исследованиях при изучении быстро перемещающихся биологических объектов, в частности тунцов [Hester, 1970; Кудрявцев, 1978].

К недостаткам такой аппаратуры относятся невысокая помехоустойчивость, наличие перекрестных искажений и наводок, относительно небольшая дальность действия.

Корреляционный метод заключается в излучении непрерывной шумоподобной акустической волны [Букатый, 2003]. Шумоподобной, но отстающей на временное запаздывание эхосигнала будет и отраженная от объекта акустическая волна (рис. 2.2). Для измерения временного запаздывания эхосигнала используется корреляционная экстремальная система автоматического регулирования, в состав которой входят блок регулируемой задержки БРЗ, коррелятор К и экстремальный регулятор ЭР. Коррелятор оценивает тесноту статистической связи между излучаемыми и принимаемыми сигналами как случайными процессами. Напряжение на выходе коррелятора пропорционально коэффициенту взаимной корреляции зондирующего сигнала и эхосигнала. На один вход коррелятора через блок БРЗ поступает напряжение огибающей зондирующего сигнала, на второй — непосредственно напряжение, соответствующее огибающей эхосигнала. Если излучаемый сигнал задержать на время, равное временному запаздыванию эхосигнала, то на входы коррелятора будут поступать почти одинаковые случайные напряжения, а на его выходе будет максимум напряжения. ЭР отслеживает этот максимум на выходе коррелятора и автоматически поддерживает в БРЗ временную задержку, равную запаздыванию эхосигнала. По шкале БРЗ, отградуированной в единицах расстояния, можно вести отсчет расстояний до объекта.

Фазовый, частотный и корреляционный методы измерения расстояния имеют высокую потенциальную точность, позволяют непрерывно получать информацию, дают

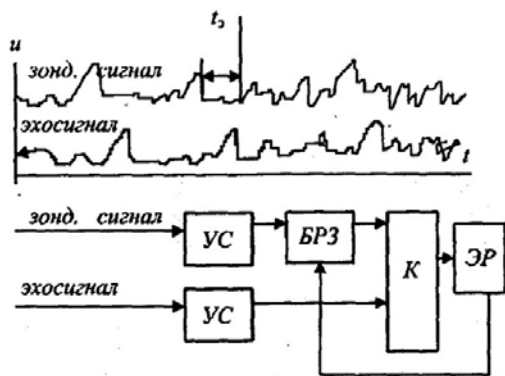


Рис. 2.2. Корреляционный метод измерения расстояния

После усиления сигнал может подаваться на акустический индикатор для его прослушивания и классификации и на многоканальный анализатор спектра, в котором сигнал разностной частоты поступает на гребенку из многочисленных полосовых фильтров с узкой полосой пропускания для увеличения разрешающей способности по дистанции. Чем более узкими будут полосы пропускания фильтров, тем более высокой будет разрешающая способность аппаратуры по дистанции. Антенны должны быть достаточно широкополосными, чтобы обеспечивалось пропускание значительного диапазона частот. Аппаратура подобного

возможность усреднять результаты за значительный промежуток времени. Но уже указанные и другие недостатки не способствуют сколь-либо широкому их применению в аппаратуре рыбохозяйственной гидроакустики. Наиболее широко в ней используется импульсный метод благодаря простоте его реализации. Он заключается в излучении зондирующих сигналов в виде относительно коротких импульсов (обрывков синусоиды) с длительностями от долей миллисекунд до нескольких десятков и более миллисекунд.

Для излучения и приема акустических колебаний в системах рыбохозяйственной

гидроакустики используются гидроакустические преобразователи, представляющие собой электромеханическую колебательную систему, способную преобразовывать как электрические колебания в механические, так и механические колебания в электрические. Это свойство гидроакустического преобразователя называется свойством обратимости. При излучении в колебательной системе такого преобразователя под влиянием воздействия приложенных сил электрического и магнитного полей возникает переменное движущее усилие, которое сообщается излучающей поверхности. В результате в преобразователе-излучателе происходит преобразование электрических колебаний в механические. В преобразователе-приемнике преобразование колебаний совершается в обратном порядке, т. е. механические (акустические) колебания преобразуются в электрические. Преобразователи, используемые лишь для приема акустических колебаний, называются гидрофонами.

Под воздействием поля падающих акустических волн принимающая поверхность и соединенная с ней колебательная система приходят в состояние колебаний. В результате этого на выходе приемного преобразователя появляется электрическое напряжение, которое в конечном счете воспринимается индикатором устройства. Гидроакустические преобразователи имеют акустические сопротивления, в 10–30 раз превышающие акустическое сопротивление воды. Хотя такое различие нельзя считать малым, они обеспечивают более эффективную передачу подводимой к ним электроэнергии в виде акустической энергии в воду, чем электроакустические преобразователи, рассчитанные на работу в воздухе.

В настоящее время имеется много разных типов средств рыбохозяйственной гидроакустики. Общим обязательным блоком (устройством) любых этих технических средств являются гидроакустические антенны, основным элементом которых являются гидроакустические преобразователи. Современные гидроакустические антенны, особенно многоканальных систем, могут включать сотни гидроакустических преобразователей.

ГЛАВА 5. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В процессе развития и совершенствования гидроакустической техники для применения в рыбном хозяйстве в ней использовались различные материалы для преобразования электрической энергии в механическую и обратно: сегнетовая соль, никель, ферриты (последние два — магнестрикционные) и пьезокерамика. Из-за ряда недостатков предыдущих материалов в конце концов предпочтение получили пьезокерамические. Когда внешнее переменное осциллирующее напряжение подается на акустический преобразователь, керамика расширяется и сжимается, в результате в воду излучаются акустические колебания.

Пьезоэлектрические гидроакустические преобразователи основаны на использовании пьезоэффекта, которым обладают некоторые естественные и синтетические материалы. Основное применение в гидроакустических преобразователях в настоящее время находят титанат бария и цирконат-титанат свинца (ЦТС) — пьезокерамика, представляющая собой поликристаллическое вещество, состоящее из отдельных элементарных кристалликов (доменов). При изготовлении пьезокерамики входящие в нее материалы предварительно тонко измельчают и смешивают в надлежащем количественном соотношении. Из полученной массы прессуют заготовки для пьезоэлементов той или иной формы. Затем заготовки обжигают при 1350–1450 °С. После обжига участки поверхности заготовки, предназначенные для нанесения электродов, покрывают слоем серебра. В процессе охлаждения после обжига в пьезокерамике при температуре около 1200 °С начинают возникать самопроизвольно поляризованные области — домены. Суммарная поляризация изготовленного образца, однако, остается равной 0, поскольку поляризации доменов распределяются в пространстве равномерно по всем направлениям. Иная картина получается при внесении образца пьезокерамики в постоянное электрическое поле (порядка 15–20 кВ/см), под влиянием которого большинство доменов ориентируется по направлению поля. Возникшая ориентация самопроизвольной поляризации продолжает сохраняться в образце и по

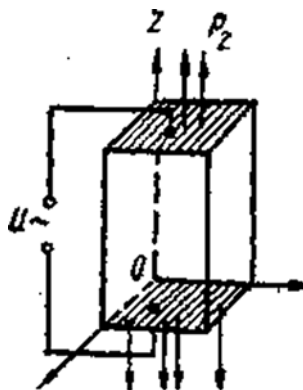


Рис. 5.1. Пьезоэффект

прекращении действия поля. Предварительно поляризованные керамические пьезоэлементы обладают хорошо выраженными пьезоэлектрическими свойствами, которые через 2–3 суток после поляризации стабилизируются, оставаясь во времени практически неизменными (рис. 5.1).

Возможность проводить поляризацию керамики в любом направлении позволяет изготавливать из нее излучатели и приемники любой формы и размеров. Следующим достоинством пьезокерамики по сравнению с другими пьезоэлектриками являются ее высокие механическая прочность и влагостойкость. В отношении упругих и диэлектрических свойств пьезокерамика ведет себя как изотропная.

У пьезоэлектрических материалов различают продольные и поперечные пьезоэффекты. Если в пьезокерамической пластинке, поляризованной по оси Z (рис. 5.2 а), создать электрическое поле E_z , то в ней возникает деформирующее усилие p_{ZM} , действующее по направлению этой оси (прямой продольный пьезоэффект).

Прямой поперечный пьезоэффект состоит в следующем (рис. 5.2 б): если в закрепленных длинных и тонких стержневых пьезоэлементах, толщины которых направлены по оси Z , а длины соответственно по осям X и Y , создать электрическое поле E_z (в направлении оси Z), то в пьезоэлементах возникнут механические усилия вдоль осей X и Y (p_{ZM} и p_{YM}), соответственно, перпендикулярные к направлению оси Z , совпадающему с направлением предшествующей поляризации. Если пьезокерамическую пластинку деформировать внешним усилием, приложенным в направлении оси X (или оси Y), то в направлении оси Z возникает электрическое поле. Такое явление называется обратным поперечным пьезоэффектом (рис. 5.2 в).

Если пьезокерамическую пластинку деформировать внешним усилием, приложенным в направлении оси Z (рис. 5.2 в), то в направлении этой оси возникнет электрическое поле. Такое явление называется обратным продольным пьезоэффектом.

В качестве элементарных пьезокерамических преобразователей находят применение цилиндрические, дисковые, в виде призм и стержневые. Цилиндрический излучатель, основанный на использовании прямого поперечного пьезоэффекта, представляет собой керамический цилиндр, на внутреннюю и внешнюю стороны которого наносятся электроды. Под влиянием приложенного к электродам переменного напряжения периодически изменяется длина средней окружности цилиндра, что приводит к возникновению у него радиальных колебаний. В других типах электроды наносят на соответствующие грани элементов.

На рис. 5.3 представлены основные типы применяемых пьезоэлементов.

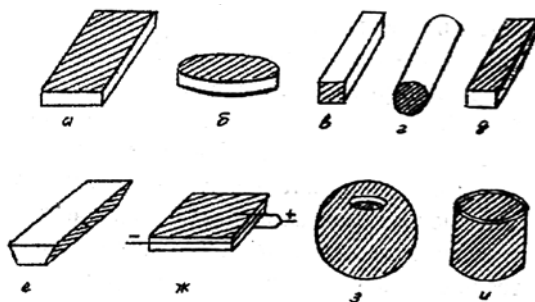


Рис. 5.3. Основные типы отдельных пьезоэлементов: а, в, д – пластины, б – диск, г – стержень, е – призма, ж – сфера, з – биморф, и – цилиндр

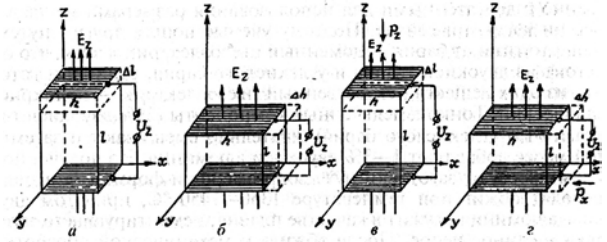


Рис. 5.2. Прямой и обратный продольный и поперечный пьезоэффекты пьезокерамики

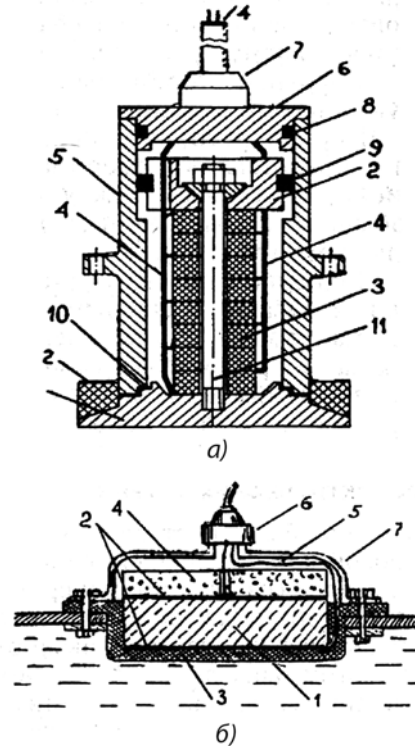


Рис. 5.4. Примеры конструкций пьезокерамических преобразователей: а – армированный преобразователь;

1, 2 – накладки, 3 – пьезоэлементы, 4 – провода, 5 – корпус, 6 – крышка, 7 – сальниковое уплотнение, 8, 9, 10 – резиновые уплотнения, 11 – шпилька, 12 – амортизатор; б – полуволновой преобразователь: 1 – керамический диск, 2 – серебряные электроды, 3 – резиновая мембрана, 4 – заглушка, 5 – провода, 6 – сальниковое уплотнение, 7 – корпус

На рис. 5.4 представлены некоторые конструкции пьезокерамических преобразователей, которые в одноканальной гидроакустической аппаратуре выполняют и роль акустических антенн. На рис. 5.4 *a* показан пьезокеамический преобразователь с увеличенной механической прочностью пьезоэлементов на растяжение с помощью их статического сжатия армирования шпилькой, проходящей через центры дисков. Пьезокерамические диски при этом выполняются с отверстиями в центрах. Каждый преобразователь состоит из пьезокерамических дисков, размещенных между двумя стальными массами (прокладками), одна в головной и другая в хвостовой частях преобразователя. Указанные прокладки служат для эффективной передачи энергии в воду. Материал низкой плотности с тыльной стороны обеспечивает, чтобы бо́льшая часть акустической энергии излучалась в воду.

На рис. 5.4 *б* представлен полуволновой пьезокерамический преобразователь.

В последнее время в качестве материала для гидроакустических преобразователей все более широко используется композитная пьезокерамика. Ее применение позволяет достичь лучшего согласования акустических сопротивлений преобразователя и водной среды, а также более широких частотных полос пропускания. Композитный слой имеет акустический импеданс, соответствующий геометрическому среднему импедансов основной части преобразователя и воды. Такой слой толщиной $1/4\lambda$ существенно улучшает передачу акустической энергии в воду по сравнению с обычными конструкциями, в которых имеется лишь одна граница с определенным рассогласованием между твердыми и жидкими средами.

5.1. НАПРАВЛЕННОЕ ДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Точечный элементарный акустический преобразователь излучает сферические волны, одинаковой интенсивности во всех направлениях, т. е. создает в окружающем пространстве на равных расстояниях от источника равномерное акустическое поле. При наличии двух и более точечных излучателей картина акустического поля в окружающем источнике пространстве изменяется, что обусловлено интерференцией акустических колебаний. При рассмотрении интерференции колебаний двух элементарных излучателей было показано (рис. 2.1), что амплитуда результирующего колебания в точках, удаленных на равные расстояния от середины дистанции между излучателями, имеет ряд чередующихся минимумов и максимумов при изменении угла отклонения лучей от нормали к линии, соединяющей источники колебаний. Максимумы находятся в тех точках, где разность хода лучей (или разность фаз) колебаний двух источников равна целому числу волн, а минимумы — в точках, где разность хода лучей равняется нечетному числу полуволн. При использовании двух идентичных синфазных точечных излучателей результирующие максимумы в однородной среде имеют одинаковую величину. Таким образом, система из двух одинаковых и ненаправленных синфазных излучателей обладает направленным действием, которое является следствием интерференции колебаний, приходящих в одни и те же точки от разных источников. При увеличении количества точечных источников и изменении расстояний между ними можно сократить число результирующих максимумов.

Эффект направленного действия акустических преобразователей принято оценивать характеристиками направленности, выражающими зависимость физической величины акустического поля (например, амплитуды колебаний, давления, интенсивности) от угла α между нормалью к активной поверхности преобразователя и направлением от преобразователя на заданную точку. При этом рассматриваемая физическая величина должна определяться на одном и том же расстоянии от центра преобразователя (или от центра системы источников колебаний).

Если амплитуда результирующего колебания, наблюдаемого по нормали к поверхности преобразователя (т. е. при $\alpha = 0$), равна A_0 , а по какому-либо другому направлению (под углом α) равна A_α , тогда для относительного изменения A можно записать:

$$R_\alpha = A_\alpha / A_0.$$

Величина R_α называется характеристикой или диаграммой направленности. Очевидно, что значение R_α по нормали, т. е. при угле $\alpha = 0$, равно 1.

Если для данного преобразователя-излучателя имеем характеристику направленности по давлению, то его характеристика направленности по интенсивности будет выражаться квадратом характеристики направленности по давлению, т. е. если $R_\alpha = p_\alpha / p_{\text{макс}}$, то $R_{\alpha I} = -I_\alpha / I_{\text{макс}} = p_\alpha^2 / p_{\text{макс}}^2 = R_\alpha^2$.

Таким образом, если давление в точке, расположенной под углом α , будет $p_\alpha = p_0 R_\alpha$, то интенсивность в той же точке будет $I_\alpha = I_0 (R_\alpha)^2$, где p_0, I_0 — соответственно, давление и интенсивность на оси излучателя.

Характеристики направленности могут задаваться аналитически или графически (в виде диаграмм, построенных в полярных или в прямоугольных координатах).

Направленность характеризуется следующими основными факторами:

- половинным углом $\theta/2$ раствора основного максимума, в пределах которого величина A изменяется от максимума до первого нулевого значения (или до первого минимального значения). Угол θ обуславливает ширину раствора главного максимума и иногда называется остротой направленного действия;

- остротой главного максимума (основного лепестка), характеризующей быстроту спада величины R_α по мере увеличения угла α (начиная от $\alpha = 0$) и представляет собой угол Δ_α , в пределах которого R_α уменьшается от своего максимального до некоторого заданного значения. Часто за такие значения принимают $R_\alpha = 0,7$ или $0,5$, чему соответствует падение амплитуды R_α на 3 или 6 дБ, соответственно;

- числом добавочных максимумов (лепестков), их амплитудой и распределением.

Акустические приемники, как и излучатели, также обладают направленностью. Применительно к приемному преобразователю характеристика направленности определяет зависимость его чувствительности от угла прихода к нему акустических колебаний. Характеристики направленности у приемника и излучателя, имеющих одинаковые размеры и работающих на одной и той же частоте, одинаковы.

Рассмотрим теперь группу из n -точечных источников, расположенных по прямой линии на одинаковом расстоянии d один от другого (рис. 5.5 а). Из рис. 5.5 а видно, что разность хода l соседних лучей равна $\Delta = d \sin \alpha$. Основной результирующий максимум находится по направлению нормали к линии, соединяющей точечные преобразователи ($\alpha = 0^\circ$ и $\Delta = 0$). Указанный максимум называется главным или первичным лепестком. По мере отклонения лучей от направления нормали разность хода лучей Δ возрастает. В моменты, когда разность хода лучей проходит через значения, равные целому числу длин волн, колебания складываются в фазе и амплитуда результирующего колебания вновь принимает максимальное значение. Получаем так называемый дополнительный (добавочный) максимум или боковой лепесток. Добавочные максимумы, равные основному, появляются при условии:

$$D \sin \alpha = \Delta = \lambda i \quad (i=1, 2, 3...).$$

При изменении α от 0 до $\pm 90^\circ$ разность хода лучей Δ изменяется от 0 до d . Число добавочных максимумов, лежащих в пределах углов $\pm 90^\circ$, следовательно, будет равно целой части отношения d/λ , т. е. будет определяться этим отношением и, естественно, будет зависеть только от расстояния между преобразователями и длины волны излучаемых (или принимаемых) колебаний. Например, при $d = \lambda$ в каждом квадранте переднего

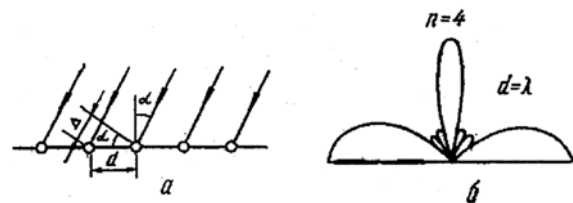


Рис. 5.5. Направленное действие акустических преобразователей:

а — линейка изотропных точечных преобразователей; б — характеристика направленности при $n = 4$ и $d = \lambda$

полупространства имеется один добавочный 100%-ный максимум, расположенный под углом 90° по направлению нормали к базе (рис. 5.5 б).

Характеристика направленности такой группы определяется выражением

$$R_\alpha = \frac{\left| \sin \left(n\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha \right) \right|}{n \sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha \right)}. \quad (5.1)$$

При перемещении отдаленной (т. е. находящейся на достаточно большом расстоянии по сравнению с λ и d) точки наблюдения (или точечного источника колебаний для варианта приема) по дуге окружности некоторого радиуса r вправо и влево от нормали к данной линейке, т. е. при изменении угла α , будут иметь место и такие направления, при которых происходит противофазное сложение колебаний и амплитуда поля уменьшается до 0. В характеристике направленности линейки образуются нулевые уровни. Условие минимумов определяется выражением:

$$\Delta = (\lambda/n)i,$$

где i – целое число, за исключением чисел, кратных n ; n – число элементов в линейке.

Количество минимумов равно $n - 1$ (между двумя 100%-ными максимумами).

Между лепестками со 100%-ным уровнем располагается $n - 1$ минимумов, значит между ними должно укладываться $n - 2$ боковых лепестков, уровень которых меньше 100%. Направления 100%-ных максимумов, т. е. равных основному, определяются из уравнения:

$$\sin \theta_{\max} = \pm(\lambda i/d), \quad i=1, 2, 3, \dots,$$

а направления минимумов по формуле:

$$\sin \theta_{\min} = \pm(\lambda i/dn), \quad i=1, 2, 3, \dots, \text{ кроме кратных } n.$$

С достаточной степенью точности можно считать, что малые боковые лепестки располагаются примерно посередине между минимумами в соответствии с равенством:

$$\sin \theta_6 = \frac{\Delta_i + \Delta_{i+1}}{2d} = \frac{1}{2d} \left[\frac{\lambda}{n} i + \frac{\lambda}{n} (i+1) \right] = \frac{\lambda}{2d}.$$

Знаки «плюс» в вышеприведенных выражениях относятся к максимумам и минимумам вправо от нормали к антенне, а «минус» – к левым по отношению к нормали или основному лепестку.

Уровни малых боковых лепестков, располагающихся в промежутках между 100%-ными боковыми лепестками, могут быть найдены по формуле:

$$R_a = \frac{1}{n \sin \left(\frac{2i+1}{2n} \right)}, \quad i=1, 2, 3, \dots,$$

кроме кратных n , справедливой при $(d/\lambda) > 0,5$.

Уровень промежуточных боковых лепестков при увеличении угла α в направлении от основного к 100%-ному добавочному максимуму сначала уменьшается, а при достижении значения, равного половине углового отстояния 100%-ных максимумов, вновь растет по тому же закону.

Уровни всех промежуточных боковых лепестков также уменьшаются с ростом числа элементов, составляющих антенну, и в пределе стремятся к уровням боковых лепестков сплошной линейной антенны.

Отношение амплитуды малых добавочных максимумов к амплитуде основного максимума (и равных ему больших добавочных максимумов) зависит от числа n излучателей в группе и уменьшается по мере увеличения их количества. При $n=3$ это отношение равно 0,33; при $n=4$ составляет 0,3; для $n \geq 6$ отношение амплитуды наибольшего из малых добавочных максимумов к амплитуде основного максимума равно примерно 0,2.

Выражение (5.1) для случая двух одинаковых точечных излучателей с расстоянием между ними, равным d , может быть представлено в более простой форме:

$$R_a = \cos \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha \right).$$

Малых добавочных максимумов эта характеристика не имеет, т. к. $n-2=0$. Между 100%-ными максимумами существует всего один минимум, так как $n-1=1$ при $\Delta = \lambda/2$. Максимумы получаются при $\Delta = 0$ и $\Delta = \lambda$. Число больших добавочных максимумов будет равно целому числу отношения d/λ . Для данной частоты f (или λ) излучаемых колебаний число добавочных максимумов будет возрастать по мере увеличения расстояния между излучателями. Для очень малого отношения d/λ оба источника как бы сливаются в один, и система практически лишена направленности. Если расстояние равно половине длины волны, то диаграмма описывается соотношением $R_\alpha = \cos(\pi/2) \sin \alpha$ и имеет нули при $\alpha = \pm(\pi/2)$, т. е. при условии $(d/\lambda) \leq 1/2$ будут отсутствовать большие добавочные максимумы [Орлов, Шабров, 1974].

На рис. 5.6 *a, б, в* представлены в полярных координатах диаграммы направленности группы из двух точечных излучателей для $(d/\lambda) = 0,5; 1; 2$ и 3.

Характеристика направленности линейной группы из трех излучателей выражается общей формулой (5.1) при $n=3$. Основные соотношения будут теми же, что и для $n=2$, минимумы будут при $\Delta = (\lambda/3)$ и $\Delta = (2/3)\lambda$, максимумы при $\Delta = 0$ и $\Delta = \lambda$. Однако здесь уже появляются малые добавочные максимумы, число которых между двумя смежными большими максимумами будет равно $n-2=1$.

На рис. 5.6 *г, д, е, ж* представлены амплитудные диаграммы линейных систем из трех и четырех излучателей при различных соотношениях d к λ .

Большие добавочные 100%-ные максимумы будут отсутствовать (т. е. не будут входить в область углов $0 - \pm 90^\circ$ даже частично), если отношение расстояния между двумя соседними излучателями к длине волны удовлетворяет условию:

$$(d/\lambda) \leq (n-1)/n.$$

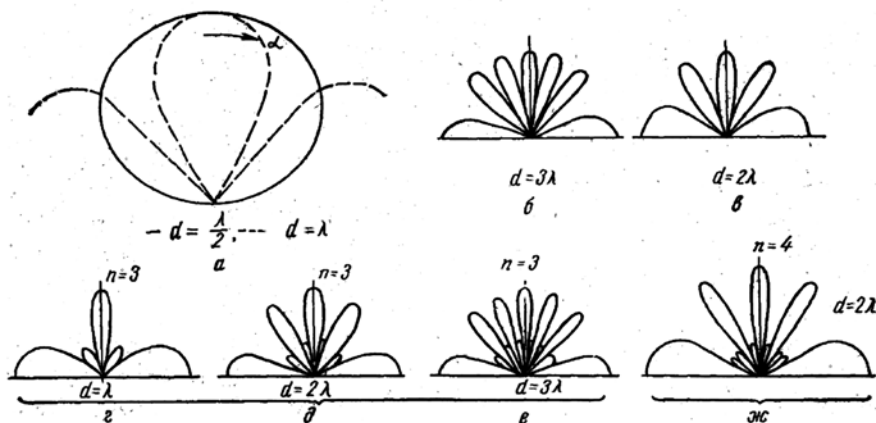


Рис. 5.6. Характеристики направленности двух точечных преобразователей (*a, б, в*); трех точечных преобразователей (*г, д, е*) и четырех точечных преобразователей (*ж*)

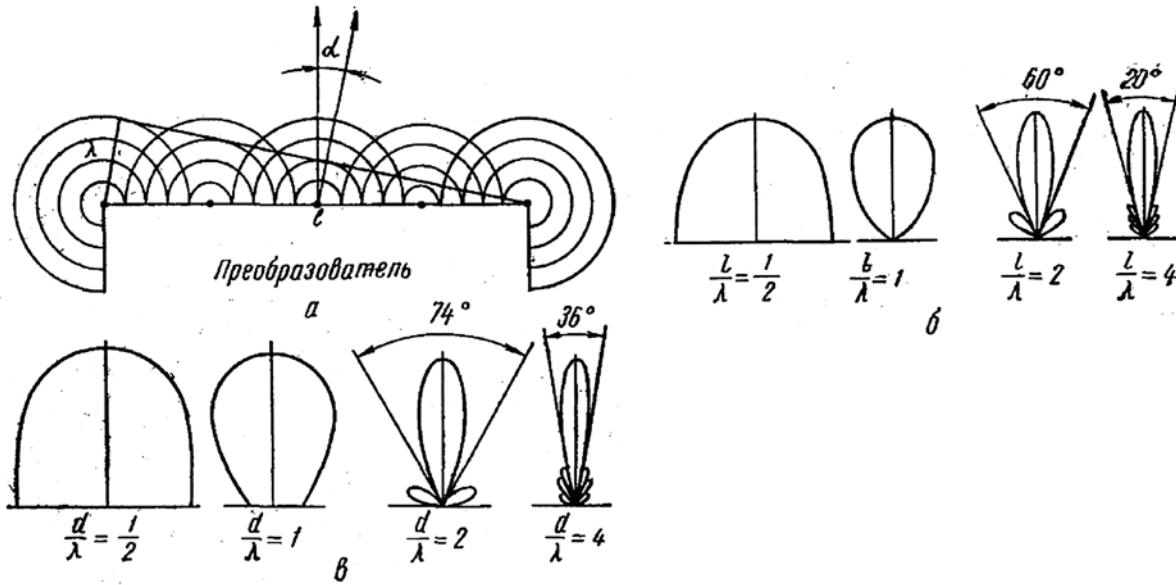


Рис. 5.7. К формированию характеристик направленности:

a – формирование характеристики; *б* – характеристика линейного преобразователя; *в* – то же, кругового преобразователя

Так, например, при $n=4$ первый добавочный максимум будет отсутствовать при $d \leq (3/4)\lambda$. Таким образом, увеличивая число источников и уменьшая промежутки между ними, можно уменьшать количество дополнительных 100%-ных максимумов.

Острота направленного действия линейной системы из n -точечных источников определяется углом расхождения θ главного максимума. Чем меньше угол θ , тем больше острота направленного действия. При изменении разности хода Δ от нуля на величину λ/n возникнет первый минимум величины A_α , т. е.

$$D \sin \alpha = (\lambda / n) \text{ или } \sin \alpha = (\lambda / nd).$$

Полагая $\alpha = (\theta/2)$, получаем

$$\sin \theta / 2 = (\lambda / nd). \quad (5.2)$$

Выразим длину антенны l через расстояние d и число n элементов $l = (n-1)d$. Подставляя в формулу (5.2) $d = l/(n-1)$, находим

$$\sin \theta / 2 = [\lambda(n-l)/(ln)] = (\lambda/l)[1 - (l/n)]. \quad (5.3)$$

Формула (5.3) определяет остроту направленного действия при заданных размерах линейной антенны и числе точечных преобразователей n .

При большом числе элементов n имеем $\sin(\theta/2) \approx (\lambda/l)$.

В пределе любой реальный источник (или преобразователь) акустических колебаний можно рассматривать как бесконечное количество элементарных точечных источников, излучающих расходящиеся сферические волны, как показано, например, на рис. 5.7 *a*, где для того, чтобы не загромождать рисунок, на линии поверхности преобразователя выделено пять таких элементарных источников из бесконечного их множества. Результирующее колебание в данной точке окружающего пространства является итогом сложения колебаний, приходящих от бесконечного числа точечных элементарных излучателей излучающей поверхности реального источника.

Фактически процесс в данном случае является еще более сложным, если учитывать, что каждая точка волнового фронта сферических волн, излучаемых бесконечным множеством элементарных точечных источников колебаний реальной излучающей поверхности, рождает новые сферические волны и т. д. В результате того, что в некоторых направлениях колебания усиливаются (фазы колебаний совпадают), а в других они в той

или иной степени гасятся или компенсируются (фазы колебаний не совпадают), создается распределение в пространстве энергии, излучаемой реальным источником акустических колебаний.

Характеристика направленности непрерывного излучателя в виде прямой линии определяется выражением:

$$R_{\alpha} = \frac{\sin(\pi \frac{l}{\lambda} \sin \alpha)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha}, \quad (5.4)$$

где l — длина излучателя.

Из этого выражения видно, что характеристика направленности будет иметь минимумы при таких углах α , для которых:

$$\sin \alpha = (\lambda/l)/i, \quad i=1, 2, 3...$$

Половинный угол раствора основного максимума определится как:

$$\sin \theta = \lambda/l \text{ из выражения (5.4) при } R_{\alpha} = 0.$$

При $l > \lambda$ будут появляться добавочные малые максимумы (лепестки). Число добавочных малых максимумов будет расти по мере увеличения l/λ , т. е. по мере увеличения длины излучателя l при неизменной длине волны λ излучаемых колебаний или по мере уменьшения λ при неизменной длине l .

Амплитуда добавочных максимумов будет убывать по мере возрастания порядкового номера максимума, а именно: относительная амплитуда первого максимума $A_{1\text{макс}}/A_0 = 0,22$, второго $A_{2\text{макс}}/A_0 = 0,13$, третьего $A_{3\text{макс}}/A_0 = 0,09$ и т. д. Добавочные максимумы будут отсутствовать при условии, что длина излучателя $l \leq \lambda$, но с соответствующим значительным ухудшением направленности. Диаграммы направленности непрерывного прямолинейного излучателя при значениях $l/\lambda = 1/2, 1, 2$ и 4 приведены на рис. 5.7 б. Острота направленного действия зависит от отношения l/λ : чем оно больше, тем меньше угол θ , определяющий остроту направленного действия.

Диаграмма направленности, определяемая выражением (5.4), симметрична относительно вертикальной оси, перпендикулярной излучателю и проходящей через его середину.

Характеристика направленности поршневого излучателя в виде круга определяется выражением:

$$R_{\alpha} = \frac{2J_1(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha}, \quad (5.5)$$

где J_1 — функция Бесселя первого порядка; d — диаметр излучающего круга.

Половинный угол раствора основного максимума определяется выражением:

$$\sin \theta = 1,2(\lambda/d).$$

При диаметре круга $d > 1,2\lambda$ начинают появляться малые добавочные максимумы. Число добавочных максимумов растет с увеличением отношения d/λ , т. е. по мере увеличения диаметра круга d при неизменной длине волны или по мере уменьшения длины волны при неизменном диаметре. Амплитуда добавочных максимумов также убывает с увеличением порядкового номера этих максимумов. Относительная амплитуда добавочного максимума: первого $A_{1\text{макс}}/A_0 = 0,13$, второго — $A_{2\text{макс}}/A_0 = 0,06$, третьего $A_{3\text{макс}}/A_0 = 0,04$ и т. д.

Добавочные максимумы отсутствуют, если диаметр излучателя $d \leq 1,2\lambda$. Направленное действие становится практически ощутимым лишь при $d/\lambda > 1/2$. Первый нулевой уровень находится при значении аргумента $(\pi d/\lambda) \sin \theta = 3,8$.

На рис. 5.7 в приведены диаграммы направленности поршневого излучателя в виде круга диаметром d при $d/\lambda = 0,5, 1, 2$ и 4 .

Характеристика направленности поршневого излучателя в виде прямоугольника (с прямоугольным раскрытием), рассматриваемая в пространстве, определяется выражением:

$$R_{\alpha, \gamma} = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \cos \gamma \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \cos \gamma \sin \alpha} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \gamma \sin \alpha\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \gamma \sin \alpha}, \quad (5.6)$$

где l и b — соответственно длина и ширина излучателя; α и γ — углы, отсчитываемые, как это указано на рис. 5.8.

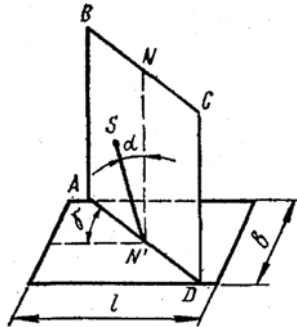


Рис. 5.8. К формуле характеристики направленности прямоугольного преобразователя

Характеристика направленности прямоугольного излучателя не будет иметь пространственной симметрии относительно нормали к его поверхности, в т. ч. и для квадратного излучателя, т. е. когда $l=b$.

Выражение для характеристики направленности излучателя в плоскости, параллельной его длине l и перпендикулярной к его поверхности, можно получить из формулы (5.6) при угле $\gamma = 0$, откуда:

$$R_{\alpha_l} = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha}. \quad (5.7)$$

Точно такое же выражение для характеристики направленности излучателя в плоскости, перпендикулярной поверхности излучателя и параллельной его ширине, можно получить из формулы (5.6), полагая угол $\gamma = \pi/2$

$$R_{\alpha_b} = \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \alpha}. \quad (5.8)$$

Выражения (5.7, 5.8) соответствуют формуле для линейного устройства. Для квадратного поршневого излучателя со стороной a выражение (5.6) будет иметь вид:

$$R_{\alpha_{ab}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \alpha}.$$

Расчетная характеристика направленности прямоугольного плоского поршня в плоскостях, параллельных его сторонам (в главных плоскостях), имеет первый нулевой уровень при значении аргумента $[\pi l \text{ (или } b)/\lambda] \sin \theta = 3,14$.

Боковые лепестки имеют такой же уровень, как и у линейного устройства.

Характеристика направленности квадратного поршневого излучателя в плоскости, проходящей через его диагональ и перпендикулярной к его поверхности, определяется выражением:

$$R_{\alpha_0} = \frac{\sin\left(\frac{\pi\sqrt{2}a}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi\sqrt{2}a}{\lambda} \sin \alpha},$$

полученным из формулы (5.6), так как в этом случае $\gamma = 45^\circ$ и $\sin \gamma = \cos \gamma$ и длина диагонали равна $\sqrt{2}$, умноженному на длину стороны квадрата a .

Нулевые уровни находятся при тех же значениях аргумента, что и у характеристики прямоугольного поршня в главных плоскостях. Основной лепесток на более высоких уровнях в диагональной плоскости уже, так как диагональ квадрата в 1,41 больше его стороны. Боковые лепестки существенно меньше: 4,9; 1,7; 0,8% [Орлов, Шабров, 1974].

Изменение характеристик направленности в диагональной плоскости обусловлено естественным неравномерным амплитудным распределением, имеющимся в раскрытие квадратного (также и прямоугольного) поршня вдоль диагонального направления. Если спроектировать элементарные излучающие точки раскрытия на диагональ (рис. 5.9), то плотность их распределения будет неравномерной вдоль диагонали; максимальная плотность, а следовательно и амплитуда создается в центре диагонали (площадь участка $1 > 2 > 3$ и т. д.). По краям она уменьшается по линейному закону. Возникает симметричное треугольное распределение.

В промежуточных сечениях между главными и диагональными, в т. ч. и в диагональных, расположенных не у квадратного прямоугольного поршня, амплитудные распределения асимметричны (см. рис. 5.9, пунктирная линия).

Чем больше крутизна амплитудного распределения, тем существеннее оно влияет на форму характеристики направленности. Спадающее от центра к краям амплитудное распределение уменьшает уровень боковых лепестков и расширяет основной лепесток. Наоборот, возрастающее к краям распределение увеличивает боковые лепестки и сужает основной лепесток. Несимметричное амплитудное распределение приводит к тому, что в области боковых лепестков (бокового поля) уровень характеристики направленности не уменьшается до нулевых значений. Любое амплитудное распределение, отличное от равномерного, снижает коэффициент концентрации синфазной антенны.

Характеристика направленности группы из n равномерно распределенных по прямой линии одинаковых и синфазных направленных излучателей (приемников) определяется произведением характеристики направленности линейной группы из n -точечных ненаправленных излучателей на характеристику направленности одиночного направленного излучателя – теорема умножения (при этом не обязательно, чтобы сила источников была одинаковой у всех отдельных излучателей). Теорема умножения справедлива, если взаимные сопротивления излучения составляющих антенну преобразователей пренебрежимо малы. Так, например, характеристика направленности линейной группы из n направленных плоских излучателей длиной l выражается в виде:

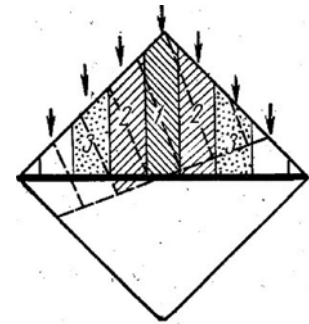


Рис. 5.9. Неравномерное амплитудное распределение

$$R_{\alpha} = R_1 R_2 = \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha},$$

где d – расстояние между центрами излучателей; R_1 (первый множитель) – характеристика направленности группы из n ненаправленных излучателей; R_2 (второй множитель) – характеристика направленности одиночного направленного излучателя.

Эффект направленного действия акустических преобразователей позволяет определять направления приходящих сигналов, разделять и выделять звуковые волны, поступающие с различных направлений (от разных точек окружающего преобразователь пространства). В то же время направленность позволяет уменьшить воздействие нежелательных источников акустических волн, создающих так называемый шумовой фон в районе расположения преобразователей. В акустических излучателях эффект направленного действия служит для обеспечения концентрации создаваемых ими акустических колебаний в требуемом направлении.

5.2. КОЭФФИЦИЕНТ ОСЕВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИЛИ КОЭФФИЦИЕНТ НАПРАВЛЕННОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Коэффициент концентрации характеризует энергетическую эффективность акустического преобразователя – его способность в режиме излучения концентрировать излученную энергию в заданном направлении. Для приемных акустических преобразователей более целесообразно пользоваться термином коэффициент направленности, характеризующем их способность выделять полезные акустические колебания на фоне окружающих шумов и помех.

Коэффициент концентрации показывает, во сколько раз интенсивность в осевом направлении на расстоянии r , созданная направленным излучателем с акустической мощностью P_a , превышает интенсивность, создаваемую на этом же расстоянии ненаправленным излучателем той же мощности. Он определяет также соответственно отношение акустических мощностей, излучаемых ненаправленным и направленным акустическими преобразователями, которые создают одинаковые интенсивности звука в направлении оси направленного преобразователя на равном удалении от центров излучения (рис. 5.10 *a*).

Коэффициент направленности для приемных акустических преобразователей определяется как отношение мощностей, развиваемых направленным и ненаправленным преобразователями, находящимися в поле изотропных помех при равных чувствительностях. Чувствительность (в мкВ/Па) характеризует способность приемного акустического преобразователя преобразовывать акустическую энергию в электрическую и является отношением напряжения, возникающего на выходе антенны, к звуковому давлению, действующему на нее.

Так как один и тот же преобразователь может использоваться как для излучения, так и для приема акустической энергии (обратимость), то для одного и того же преобразователя численные значения коэффициента концентрации и направленности равны. Если размеры излучающей (или активной) поверхности D преобразователя велики по сравнению с длиной волны $D \geq 1,5\lambda$, то коэффициент концентрации γ можно определить по формуле:

$$\gamma = (4\pi S)/\lambda^2,$$

где S – площадь излучающей поверхности.

На рис. 5.10 *б* приведена номограмма [Urik, 1974] для определения коэффициента направленности преобразователя с круглым раскрывом и линейного преобразователя

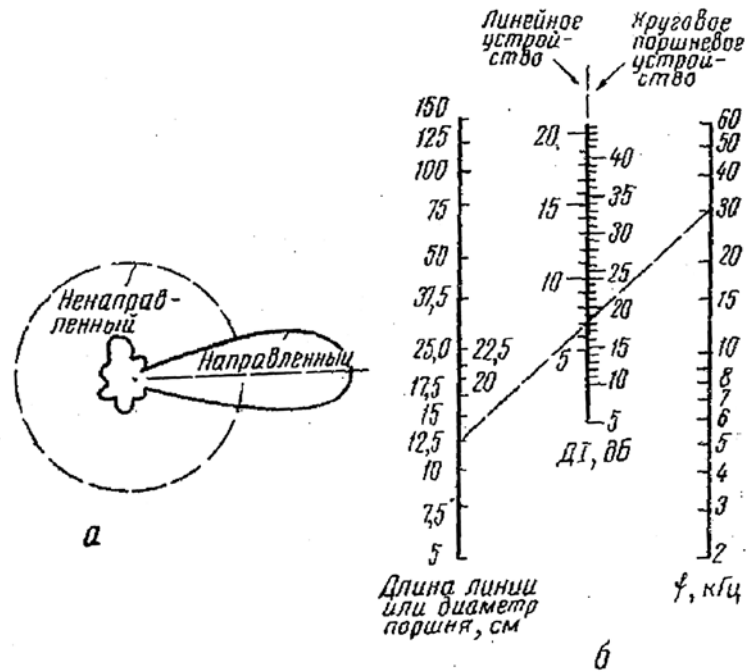


Рис. 5.10. Коэффициент направленности:

a – характеристика направленного и ненаправленного преобразователей; *б* – номограмма для оценки коэффициента направленности

в зависимости от их размеров и частоты (в бесконечном жестком экране), определяемого как

$$DI = 10 \log(\gamma_{\text{ненапр}} / \gamma_{\text{напр}}).$$

Коэффициент направленности данного преобразователя соответствует точке пересечения средней шкалы линией, соединяющей точки, определяемые размером и рабочей частотой антенны. В качестве примера приведем процесс определения указанного параметра для преобразователя с круглым раскрывом диаметром порядка 125 мм, работающего на частоте 30 кГц. DI этого преобразователя соответственно равен 18 дБ (как для передачи, так и для приема).

На практике бесконечные экраны, естественно, не используются. У плоских преобразователей с размерами больше половины длины волны тип экрана оказывает пренебрежимо малое влияние на характеристику направленности и теория хорошо согласуется с экспериментом (Боббер, 1974).

ГЛАВА 6. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

Выше были рассмотрены основные свойства и характеристики направленности отдельных элементарных гидроакустических преобразователей и их групп. В простейших рыбопоисковых системах и некоторых других средствах рыбохозяйственной гидроакустики (например, в гидроакустических системах биотелеметрии) антенны могут состоять из одного элементарного преобразователя.

В то же время следует отметить, что в большинстве промышленной современной аппаратуры рыбохозяйственной гидроакустики акустические антенны включают n -е количество гидроакустических преобразователей (рис. 6.1).

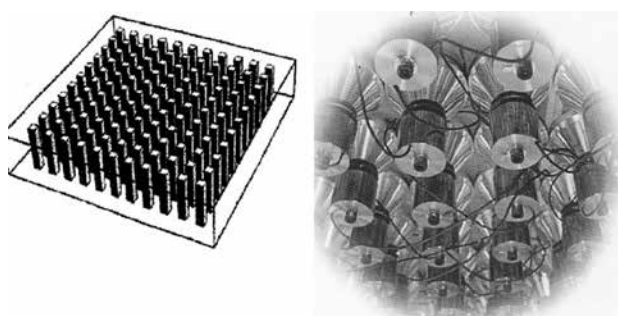


Рис. 6.1. Одна из схем расположения пьезокерамических преобразователей в антенне многоканальной эхолокационной гидроакустической аппаратуры — слева и рабочее расположение преобразователей в антенне эхолота фирмы Симрад — справа

Как и элементарные преобразователи, акустические антенны также предназначены как для преобразования электрической энергии, вырабатываемой генераторными устройствами аппаратуры, в акустическую энергию и излучения ее (передачи) в водную среду, так и для обратного преобразования принимаемых акустических колебаний в электрические (исключение составляют гидроакустические метки, в которых используются практически ненаправленные антенны). В первом случае чаще всего от антенны требуется излучение энергии в определенных направлениях. Указанный направленный эффект определяется характеристикой направленности антенны. В режиме приема характеристика направленности определяет эффективность преобразования акустической энергии в электрическую в зависимости от направления прихода звуковых волн.

Форма характеристики направленности меняется с изменением расстояния от антенны. Антенна излучает волны, фронт которых совпадает по форме с ее поверхностью. Так, например, плоская синфазно колеблющаяся антенна с размером раскрытия D излучает плоские волны, сохраняющие свою форму до расстояния примерно $D/16\lambda$, называемого прожекторной зоной [Орлов, Шабров, 1974]. Дальше начинается расхождение волнового фронта (ближняя зона дифракции, зона Френеля), вызываемое дифракцией волн на краях пучка лучей из-за конечности размеров реальной антенны и длины волны.

В этой зоне резко выражены интерференционные явления, наблюдаются флуктуации звукового давления и искажения характеристики направленности. Ближняя зона простирается до расстояния, которое принято называть критическим, оно равно примерно $2D^2/\lambda$ (D — максимальный размер антенны). На этом расстоянии волны становятся сферическими, и характеристика направленности практически стабилизируется

по форме (дальняя зона дифракции, зона Фраунгофера). Дальняя зона излучения антенны — это область пространства, простирающаяся от границы зоны Френеля в принципе до бесконечности.

Развиваемое звуковое давление, являясь функцией направления в пространстве и расстояния от антенны, в дальней зоне излучения может быть представлено выражением из двух сомножителей: коэффициента, обратно пропорционального расстоянию от антенны, и не зависящей от этой дистанции функции направления в пространстве, соответствующей характеристике направленности антенны. Граница между дальней зоной излучения и зоной Френеля явно не выражена. Звуковое давление в ближней зоне обычно имеет неоднородную структуру. Характерной особенностью акустического поля в этой зоне является наличие локальных максимумов распределения амплитуд звукового давления, в которых значения могут превышать средний уровень в два и более раз.

Акустические антенны характеризуются рядом параметров: формой характеристики направленности, шириной основного лепестка, уровнем боковых лепестков, неравномерностью характеристики направленности, коэффициентом концентрации, чувствительностью, электроакустическим коэффициентом полезного действия, частотной характеристикой, полосой пропускания, удельной акустической мощностью, раскрытом антенны и ее выходным сопротивлением.

Чувствительность антенны — это напряжение на ее зажимах, вызываемое плоской волной единичного акустического давления (обычно в мкВ/Па). Она может быть выражена в децибелах относительно 1В при воздействии акустического давления в 0,1 Па. В последнем случае она записывается в виде децибел относительно 1В/0,1 Па. Таким образом, если указана чувствительность антенны 80 дБ относительно 1 тВ, то это означает, что на ее зажимах появляется среднеквадратичное значение напряжения (при разомкнутой электрической цепи, т. е. на холостом ходу) 10^{-4} В при помещении антенны в звуковое поле плоской волны, имеющее действующее значение акустического давления 0,1 Па. Если единичным давлением является другая величина, например 1 Па, то должно быть указано, относительно чего выражена чувствительность в децибелах. Чувствительность современных гидроакустических антенн, применяемых в рыбопоисковых приборах, составляет 200–500 мкВ/Па.

Излучающие антенны (или обратимые антенны в режиме излучения) могут оцениваться характеристикой передачи, которая представляет собой давление, создаваемое антенной на расстоянии 1 м от нее в направлении оси своей характеристики направленности при подаче единичного значения тока в антенну. Указанная характеристика может выражаться в децибелах относительно единицы давления, например, 0,1 Па при измерении на эталонном расстоянии 1 м и подаче на ее зажимы тока в 1 А и записывается как децибел относительно 0,1 Па.

Гидроакустические антенны не могут излучать сколь угодно большую акустическую мощность. Это обусловлено тем природным явлением (ультразвуковой кавитацией), которое может сопровождать процесс излучения акустических колебаний в жидкости, в т. ч. и в воде.

Ультразвуковая кавитация заключается в возникновении газовых полостей (пузырьков) под действием больших звуковых давлений, когда в отрицательные фазы звукового давления образуются местные разрывы воды, тут же заполняемые газами, содержащимися в ней. Вода и жидкости слабо сопротивляются деформации растяжения. Поэтому при акустических давлениях, превышающих гидростатическое давление в отрицательные фазы звукового давления, когда появляются разрежения, в воде образуются местные разрывы. Казалось бы, как только звуковое давление превысит гидростатическое, сразу должна наступать кавитация. Но на самом деле для образования кавитации требуется существенно большее акустическое давление, т. к. этот процесс зависит еще и от частоты колебаний, длительности акустического импульса, состояния воды. Чем выше частота, чем короче длительность излучаемого импульса, чем больше гидростатическое

давление (глубина), чем меньше газонасыщенность воды, тем при более высоких значениях звукового давления развивается кавитация.

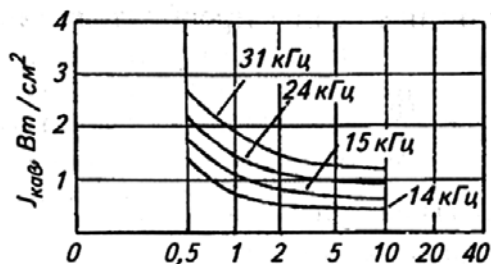


Рис. 6.2. Зависимость кавитационного порога морской воды от частоты и длительности излучаемых импульсов

Интенсивность $I_{\text{кав}}$, при которой начинает развиваться процесс кавитации, называют кавитационным порогом. На рис. 6.2 представлена зависимость кавитационного порога морской воды от длительности акустического импульса (мс) и частоты колебаний для поверхностных слоев отстоявшейся морской воды. Как видно, с повышением частоты и уменьшением длительности импульса кавитационный порог повышается. На очень высоких частотах (сотни кГц — мегагерцы) кавитация вообще не развивается.

Антенны средств рыбохозяйственной гидроакустики обычно (за исключением их применения при технологических исследованиях, которые рассматриваются в последнем разделе) не должны излучать акустические колебания, интенсивность которых превышает порог кавитации, по следующим причинам.

Во-первых, кавитационное облако (пелена газовых пузырьков) находясь перед антенной, будет сильно гасить на себя (рассеивать) излучаемую акустическую энергию. В результате антенна будет излучать много энергии, а распространяться вперед она будет мало, т. е. фактически будет ниже уровень источника.

Во-вторых, кавитационный процесс динамичен: пузырьки то возникают, то захлопываются в положительные фазы акустического давления. При захлопывании кавитационных пузырьков создается широкополосный и довольно сильный кавитационный шум, на слух через звуковой индикатор, воспринимаемый как чириканье огромной стаи воробьев. Этот шум может создавать помеху, на фоне которой будет практически невозможно выделить полезные эхосигналы.

В-третьих, при захлопывании кавитационных полостей происходит так называемая кавитационная эрозия рабочей поверхности антенны, подобная тому, как разрушаются лопасти гребного винта судна от гидродинамической кавитации¹.

Чтобы антенна работала в докавитационном режиме, излучаемая ею акустическая мощность должна быть ограничена в соответствии с условием

$$P_{\text{а.макс}} \leq I_{\text{кав}} S_{\text{изл}},$$

где $S_{\text{изл}}$ — площадь излучающей поверхности антенны.

При проектировании рыбопоисковой аппаратуры ориентируются на $I_{\text{изл.}} = 1-3 \text{ Вт/см}^2$.

Полное входное сопротивление $Z_{\text{вх}}$ определяется соотношением между приложенным напряжением U и током, протекающим в электрической цепи антенны. На практике стараются подключить антенну к генератору так, чтобы реактивная часть входного сопротивления компенсировалась.

Имеются и определенные ограничения, обусловленные нелинейными явлениями, имеющими место при распространении акустических колебаний в водной среде. При рассмотрении основных вопросов теории распространения акустических волн обычно вводятся определенные допущения, которые сводятся к следующему:

– подразумевается, что на плотность ρ среды, в которой распространяется звук, не влияют эффекты сжатия и расширения волны;

¹ Кавитация — отрицательное явление в гидроакустике. Но в ультразвуковой технике она с успехом используется для очистки различных деталей самой сложной формы, разрушения ледяной корки у замороженной рыбы, помещаемой для этого в специальные ультразвуковые ванны.

– принимается упрощение, что среда остается несжимаемой под действием акустического возмущения, возникающего в ней. Сжимаемость среды (т. е. изменение объема, вызываемое единичным значением давления) есть обратная величина модуля объемной упругости k .

В то же время очевидно, что если давление увеличивается, то среда сжимается, и ее плотность должна увеличиваться, хотя бы и на очень небольшую величину, и наоборот. Известное выражение о том, что вода несжимаема, не совсем соответствует действительности и фактически только подтверждает тот факт, что в жидкости указанный эффект имеет весьма малую величину. Строго говоря, вода сжимаема.

При сравнительно небольших интенсивностях акустических колебаний указанные допущения вполне оправданы, тем более, что они значительно упрощают анализ целого ряда явлений. Процессы с такими допущениями становятся линейными, т. е. сохраняется линейная пропорциональность прилагаемым возмущениям.

В результате, если в среде существует несколько волн с различными частотами, то считается, что они вообще не взаимодействуют, все характеристики определяются только суммой эффектов каждой отдельной волны и новые частоты не возникают.

Скорость распространения колебаний c равна $\sqrt{k/\rho}$, при указанных допущениях она

считается постоянной для всех акустических возмущений в среде и зависит только от характеристик среды – солёности, температуры, давления, но не от параметров самих акустических волн. Фактически же c является функцией мгновенного значения амплитуды волны. Скорость частиц алгебраически добавляется к номинальной скорости распространения, т. е. когда скорость частиц имеет свою максимальную положительную величину, фактическая скорость распространения максимальна, а когда скорость частиц имеет максимальную отрицательную величину, фактическая скорость распро-

странения минимальна. Так как в выражении $c = \sqrt{k/\rho}$ как k , так и ρ изменяются в зави-

симости от акустического давления p (например, если p увеличивается, среда сжимается и ее ρ должна увеличиваться и наоборот), то и c будет меняться в зависимости от мгновенного значения амплитуды волны.

Физическая картина искажения акустической волны при ее распространении показана на рис. 6.3 [Кудрявцев, 1978; Simmonds and MacLennan, 2005]. Пусть в некоторой точке среды с помощью плоской гидроакустической антенны сравнительно больших волновых размеров генерируется акустическое колебание синусоидальной формы (рис. 6.3 а). Будем считать, что благодаря большим размерам антенны создаваемая волна является плоской, т. е. распространяется без расширения и, кроме того, в среде отсутствует поглощение акустической энергии. С учетом принятых допущений (об отсутствии расширения волны и поглощения энергии в среде) можно считать, что волна в точке наблюдения будет иметь тоже самое пиковое значение (амплитуду), что и у источника. Однако вследствие изменения ρ и сжимаемости среды в зависимости от p , c различна для разных значений (амплитуд) давления. В результате этого положительные полуволны (гребни) акустического колебания движутся быстрее, чем отрицательные, и при удалении от источника форма волны искажается. В соответствии с этим синусоидальное колебание источника (рис. 6.3 а) в удаленной точке наблюдения будет иметь вид, показанный на рис. 6.3 б, т. е. волна перестает быть синусоидальной (монокроматической), а имеет сложную форму, которая, как известно, содержит большое число гармонических составляющих, в т. ч., если первоначальное колебание имело частоту f , в ней присутствуют также и частоты $2f$, $3f$ и т. д. Для упрощения допустим, что c определяется своим номинальным значением с небольшими плюсовыми или минусовыми значениями, примерно пропорциональными мгновенным величинам p (соответственно положительного или отрицательного). Тогда в точке наблюдения на некоторой

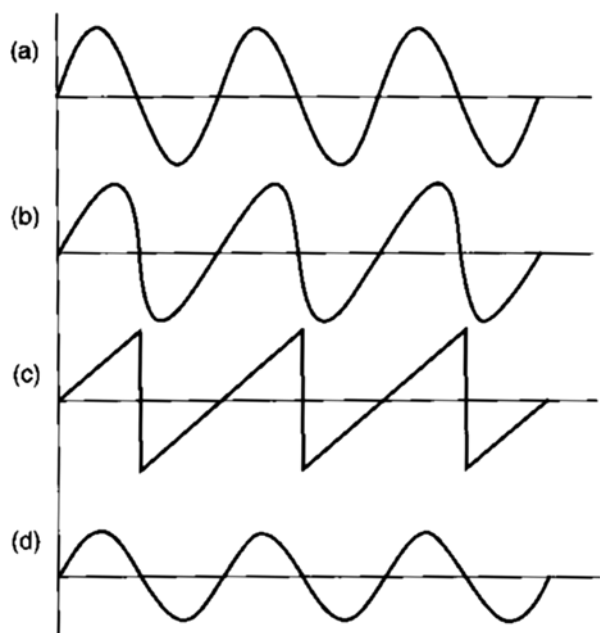


Рис. 6.3. Искажение акустической волны при ее распространении

эффекты незначительны, при больших амплитудах эффекты взаимодействия звука со звуком становятся существенными.

Заслуживает внимания проверка возможностей использования аппаратуры нелинейной гидроакустики для траверсной горизонтальной локации рыб в мелководных районах в связи с практическим отсутствием у нее боковых лепестков [Тимошенко, Кудрявцев, 1981; Новиков, Руденко, Тимошенко, 1981; Кудрявцев и др., 1987].

дистанции от антенны будет иметь место разное время прихода для разных элементов волны в зависимости от величины создаваемого ими давления и, соответственно, имеет место ее искажение (рис. 6.3 б). В пределе она приобретает форму, близкую к треугольной (рис. 6.3 в).

В работе Симмон и МакЛеннан [2005] приведен график допустимых значений уровня источника акустических колебаний в зависимости от рабочей частоты, при которых можно не принимать во внимание указанные нелинейные эффекты (для морской воды – более толстая линия и для пресной – тонкая линия) (рис. 6.4).

Таким образом, в общем случае, если в среде существует две или несколько волн, то они взаимодействуют друг с другом, и общий эффект в любой точке среды уже не является простой суммой эффектов каждой из волн, взятых отдельно, более того, могут возникать новые акустические волны на других частотах. При небольших амплитудах волн нелинейные

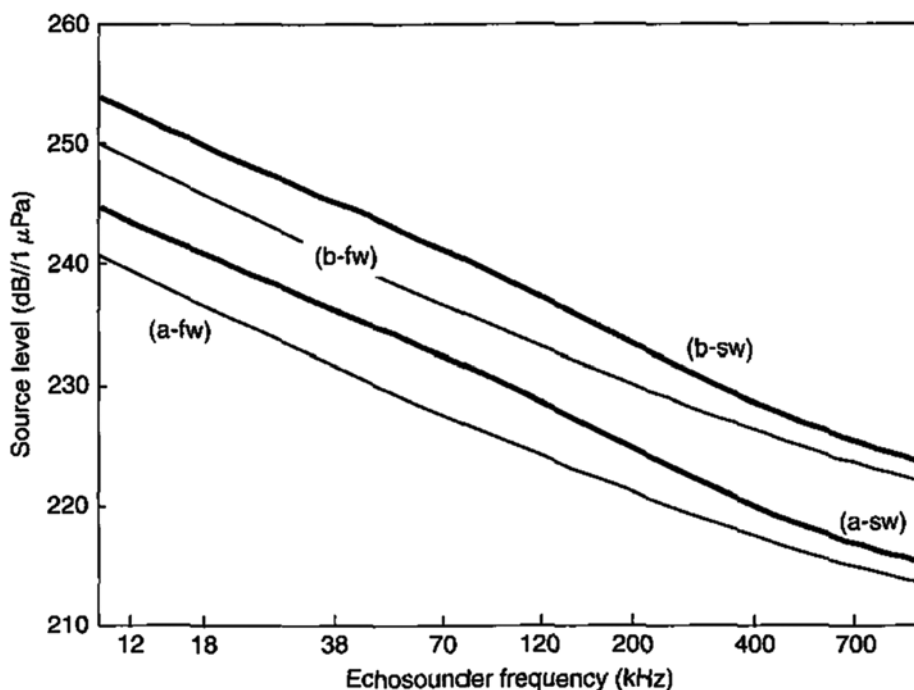


Рис. 6.4. Допускаемые пределы интенсивности звука в водной среде, при которых можно не учитывать нелинейные эффекты

Хорошие результаты при ее использовании были получены в процессе натуральных испытаний гидроакустической аппаратуры «Пескарь» [Сидько и др., 1987; Кудрявцев, 2013]. В малогабаритной рыбопоисковой аппаратуре «Пескарь» была предусмотрена модификация с параметрическим излучающим трактом, работающим по принципу нелинейного взаимодействия высокочастотных акустических волн накачки в канале распространения. Преобразователь накачки тракта излучает в водную среду акустические колебания двух частот $f_1 = 250$ кГц и $f_2 = 300$ кГц в пределах характеристики направленности на этих частотах, составляющей $2\theta_{0,7} = 6^\circ$. В результате нелинейного взаимодействия волн накачки в воде генерируется сигнал разностной частоты $F_p = f_1 - f_2 = 50$ кГц. Образованная таким образом параметрическая антенна имела практически ту же направленность, что и на частотах накачки, т. е. $2\theta_{0,7} = 6^\circ$, при этом уровень боковых лепестков в диаграмме направленности незначителен и составлял -40 дБ. При работе с параметрической антенной в режиме приема и регистрации эхосигналов полностью использовался приемный тракт аппаратуры «Пескарь». Диаграмма направленности в режиме приема составляла $2\theta_{0,7} = 45^\circ$. Введение в состав прибора параметрического излучающего тракта позволило при небольшом увеличении затрат, размеров и массы станции существенно расширить поисковые возможности аппаратуры, особенно на малых глубинах, при поиске рыбы в стороне от судна в режиме горизонтального лоцирования.

Общими техническими характеристиками антенны и для режима излучения, и для режима приема являются рабочая частота f_0 , полоса пропускания Δf , длительность переходного процесса колебаний τ_n , ширина диаграммы направленности θ , коэффициент осевой концентрации γ .

Рабочая частота антенны — это та частота, на которой колебательная система развивает максимально возможную амплитуду колебаний. Максимальная амплитуда колебаний достигается в режиме резонансной работы колебательной системы. Следовательно, рабочая частота — это резонансная частота антенны.

Резонансная частота любой механической колебательной системы зависит от ее массы и упругости. Чем больше масса и меньше упругость, тем ниже резонансная частота. Поэтому низкочастотные гидроакустические антенны массивны и крупногабаритны, а высокочастотные — менее массивны и малогабаритны.

Антенна способна излучать и принимать акустические волны не только на резонансной частоте, но и на частотах, отличающихся от нее. На частотах, отличающихся от рабочей частоты, амплитуда ξ_m колебаний излучающей или принимающей поверхности антенны будет тем меньше по отношению к максимально возможной резонансной амплитуде, чем дальше от резонансной частоты находится частота внешней возбуждающей антенну силы.

Зависимость амплитуды колебаний антенны от частоты называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) или резонансной кривой (рис. 6.5).

Острота АЧХ зависит от потерь энергии в колебательной системе, чем меньше потери энергии (меньше активное механическое сопротивление), тем острее АЧХ и тем больше максимум амплитуды при одном и том же внешнем воздействии на антенну. Как видно из рис. 6.5, при разных значениях потерь энергии антенна неодинаково реагирует на действующее на нее

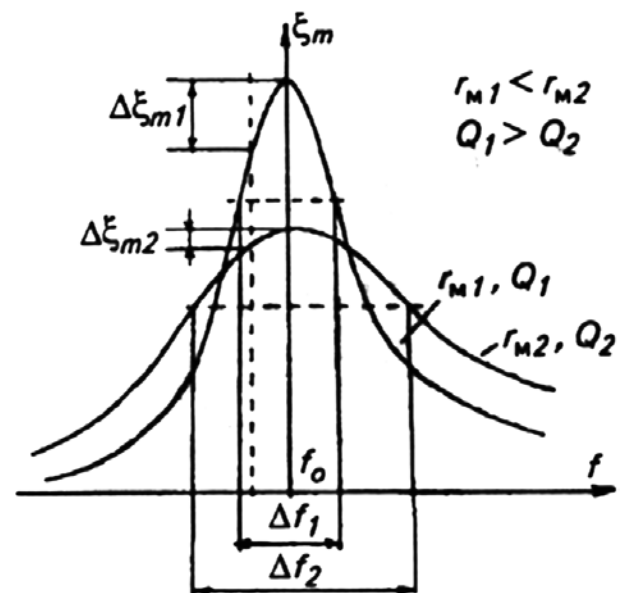


Рис. 6.5. АЧХ гидроакустической антенны

акустическое давление, частота которого немного отличается от резонансной частоты. При малых потерях энергии (острая АЧХ) уменьшение амплитуды $\Delta\xi_{m1}$ окажется существенным, в то время как при больших потерях энергии (тупая АЧХ) уменьшение амплитуды $\Delta\xi_{m2}$ окажется не столь существенным. В связи с этим вводится такая техническая характеристика антенн, как полоса пропускания частот.

Полосой пропускания частот антенны называется частотный интервал Δf , на границах которого справа и слева от рабочей частоты амплитуда колебательной системы $\Delta\xi_m$ составит 0,707 от максимально возможной резонансной амплитуды $\Delta\xi_{m\text{макс}}$.

Так как интенсивность (мощность, энергия) пропорциональна квадрату амплитуды, то уровень 0,07 спада амплитуды соответствует уровню 0,5 спада интенсивности (мощности, энергии). Поэтому полосой частот называют также частотный интервал справа и слева от рабочей частоты антенны, на границах которого интенсивность излучения уменьшается на 50%.

Как видно из рис. 6.5, чем меньше потери энергии в колебательной системе антенны, тем уже будет полоса пропускания частот и, наоборот, чем больше потери энергии в колебательной системе, тем шире будет полоса пропускания частот.

Потери энергии в колебательных системах принято характеризовать добротностью Q — числом, которое показывает, сколько свободных колебаний совершит система, пока амплитуда ее не уменьшится в e^π раз, т. е. приблизительно в 23 раза. Следовательно, чем больше добротность колебательной системы, тем уже полоса пропускания частот антенны и наоборот. Полоса пропускания определяется как:

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q}.$$

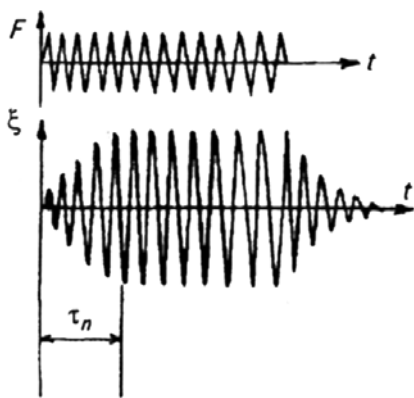


Рис. 6.6. Переходной процесс в колебательной системе

Основное демпфирующее влияние на колебательные системы гидроакустических антенн оказывает вода (акустическое сопротивление воды). В связи с этим их добротности приблизительно одинаковы и невелики, имея значения порядка 10 и, соответственно, полосы пропускания частот составляют около 10% рабочей частоты. Ни в какой антенне колебательная система не способна мгновенно набрать максимально возможную амплитуду колебаний. Процесс раскочки колебательной системы называют переходным процессом колебаний, а промежуток времени τ_n от момента появления внешней силы до набора максимальной амплитуды — временем переходного процесса колебаний (рис. 6.6).

Чем более узкополосна колебательная система, т. е. чем больше ее добротность, тем больше время переходного процесса колебаний. Оказывается, что на резонансе время переходного процесса колебаний обратно пропорционально полосе пропускания частот:

$$\tau_n = \frac{1}{\Delta f}.$$

Время переходного процесса колебаний определяет минимальную длительность воздействия внешней силы, которая определяет эффективную работу антенны. Если длительность внешнего воздействия меньше времени переходного процесса колебаний, то колебательная система антенны не успеет набрать возможную для заданного внешнего воздействия амплитуду колебаний (будет неэффективно излучать и принимать короткие акустические импульсы). Соответственно, на низких частотах (примерно

12–30 кГц) нецелесообразно излучать зондирующие импульсы длительностью менее 0,5 мс, на высоких (100–200 кГц) – менее 0,1 мс.

Пространственная избирательность излучения и приема акустических колебаний антенной характеризуется диаграммой направленности, которая показывает, как от направления θ зависит амплитуда излучаемого антенной акустического давления или как от направления θ прихода звукового сигнала зависит напряжение на выходе антенны. Диаграмма направленности антенны одинакова и для режима излучения, и для режима приема. Обычно она имеет вид лепестковой фигуры с одним главным лепестком (максимальным) и несколькими убывающими по уровню боковыми лепестками. Однако в расчетах пользуются не самой диаграммой направленности, а нормированным по максимуму ее значением, которое называют характеристикой направленности. Таким образом, характеристика направленности – это отношение звукового давления $p(\theta)$ или развиваемого антенной напряжения $u(\theta)$ по произвольному направлению θ к звуковому давлению $p(\theta^\circ)$ или напряжению $u(\theta^\circ)$ по оси главного максимума.

6.1. ЭЛЕКТРОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

Примерно до 80-х гг. в рыболокационной аппаратуре, как правило (за отдельными исключениями), применялись акустические антенны простейшего вида с одной достаточно широкой характеристикой направленности (иногда с двумя – широкой и второй переключаемой, более узкой).

Стремление к повышению качества получаемой от средств рыбохозяйственной гидроакустики информации привело к появлению и использованию в них новых, более сложных, но и более эффективных акустических антенн. К ним относятся антенные системы с веерообразными характеристиками направленности и с электронным сканированием характеристик направленности, которые наиболее широкое применение нашли в рыбопоисковых гидролокаторах одновременного секторного и кругового обзора, в аппаратуре для обнаружения придонных рыб в стороне от судна. Антенны с электронным управлением положением характеристик направленности применяются и в современных рыболокааторах вертикального действия для глубоководного поиска рыбы, для обнаружения рыбы вблизи грунта с пространственной электронной стабилизацией узкой характеристики и для расширения зоны просмотра придонного слоя в плоскости миделя судна при вертикальном зондировании пространства. Применение таких антенн позволяет значительно увеличить площадь и сократить время обзора просматриваемого пространства, повысить разрешающую способность аппаратуры, увеличить скорость получения информации о распределении объектов в окружающем аппаратуру пространстве. Подобного типа антенны получили название многоэлементных дискретных антенн (антенных решеток), т. к. состоят из n -го количества отдельных преобразователей небольших волновых размеров.

Антенные решетки позволяют формировать характеристики направленности различной формы и управлять их ориентацией в пространстве не механическим, а электронным способом [Вендик, 1965; Бененсон, 1966].

По принципу построения антенны с немеханическим перемещением характеристики направленности существенно отличаются от антенн с электромеханическим изменением их положения в пространстве. При механическом сканировании в случае необходимости излучить сигнал в каком-либо направлении или принять сигнал с этого направления проводится соответствующий поворот антенны с определенной неизменяемой характеристикой направленности. В принципе и электронное сканирование можно реализовать подобным способом: иметь антенны на каждое направление и быстро переключать их с помощью электронного коммутатора (рис. 6.7). Не рассматривая детально все характеристики такой системы, можно сразу указать на ее непригодность для промысловых судов из-за габаритов. Например, если одна такая ан-

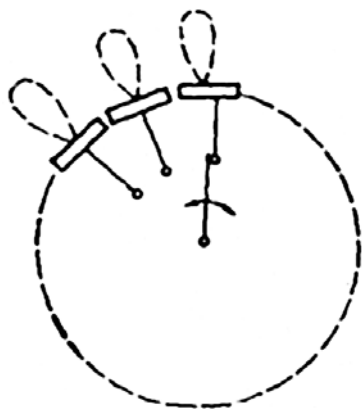


Рис. 6.7. Схема формирования кругового обзора с антеннами на каждое направление

тенны. Успехи в развитии радио- и микроэлектроники во многом способствовали внедрению аппаратуры с многоэлементными акустическими антеннами в рыбной промышленности благодаря возможности значительного снижения габаритов и повышения надежности необходимых при этом достаточно сложных трактов управления процессами формирования и электронного сканирования характеристик направленности.

В большинстве случаев прямолинейные, дуговые, цилиндрические и сферические антенные решетки применяются для формирования веера или сканирующих характеристик направленности в одной плоскости (азимутальной) исходя из особенностей их использования на промысловых судах: линейные – в ограниченном секторе, как правило, не более 90° , дуговые в секторе до 180° , цилиндрические в секторе до 360° , сферические (рис. 6.8) – во всех направлениях водной среды. В то же время (такие) дискретные антенные системы позволяют осуществлять одновременное немеханическое изменение наклона характеристик направленности в вертикальной плоскости. При цилиндрических антеннах в гидролокаторах одновременного кругового обзора обычно предусматривается возможность электронного наклона характеристик направленности в диапазоне от 0 до $45\text{--}60^\circ$. В одной из последних разработок норвежской фирмы Симрад SX90 применена цилиндрическая антенна с шаровым сегментом в нижней части, позволяющая обеспечивать обзор всей нижней полусферы водной среды относительно судна. В гидролокаторе FSV-30 японской фирмы Фуруно со сферической антенной системой также обеспечивается одновременное озвучивание целей в секторе 360° вокруг судна как в горизонтальных направлениях, так и при наклоне акустических лучей от -5° (вверх) до $+90^\circ$ (вниз).

Сканирование или формирование веера характеристик направленности такими антеннами осуществляется путем подачи на акустические преобразователи изменяющихся фазовых и амплитудных распределений с помощью электронных схем. Антенная система в данном случае представляет собой совокупность акустических преобразователей, обеспечивающих получение в ее раскрытии управляемого амплитудно-фазового распределения акустического поля, способного изменяться в заданных пределах по определенному закону. Положение характеристики направленности (или характеристик направленности) зависит от того, в каком состоянии находятся управляющие электронные устройства, обеспечивающие выработку и подачу в антенную систему соответствующих сигналов (управляющего воздействия). Таким образом, положение характеристики направленности является функцией управляющего воздействия.

Антенну в гидроакустической системе можно считать не только преобразователем принимаемой акустической энергии в электрические сигналы, но и звеном обработки

тенна имеет характеристику направленности 18° (в горизонтальной плоскости) и размер ~ 40 см, то для кругового обзора требуется, по крайней мере, 20 таких антенн (и даже больше с учетом перекрытия), располагаемых по периметру круга диаметром более 2 м.

В связи с этим указанные задачи решаются другими методами. В формировании характеристики направленности в разных направлениях участвует в каждый момент времени, как правило, значительное количество акустических преобразователей, составляющих антенну, или сразу все элементы. В рыбохозяйственной гидроакустике в настоящее время наибольшее применение находят прямолинейные, дуговые, цилиндрические и сферические ан-

информации, поступающей в систему из окружающего пространства. Действительно, на антенну (в т. ч. и сканирующую) могут поступать акустические колебания с различных направлений, однако только колебания, пришедшие с одного направления, создадут полезный сигнал на входе приемного тракта, подключенного к антенне. Таким образом, антенна разделяет сигналы, поступающие на нее из внешнего пространства. Это разделение выполняется подбором фазовых сдвигов в управляющих устройствах, отвечающих распределению фаз в плоской волне, падающей на антенну в заданных направлениях.

Каждый акустический преобразователь антенны с немеханическим перемещением характеристики направленности представляет собой самостоятельную элементарную антенну. Излучение i -й элементарной антенны характеризуется ее характеристикой направленности $R_{\alpha i}$ — складывая в дальней зоне акустические поля n отдельных излучателей, мы получаем суммарное поле, которое характеризуется суммарной характеристикой направленности антенны:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Как известно, получение направленных свойств любой антенны основано на интерференции акустических колебаний. Для получения главного максимума излучения в требуемом направлении нужно управлять процессами интерференции, т. е. управлять распределением амплитуд и фаз излучаемых акустических колебаний.

В общем случае амплитудно-фазовое распределение управляющих воздействий в антенне может быть непрерывной или дискретной (разрывной) функцией координат. В первом случае его изменение (токов или напряжений) под действием управляющих факторов происходит таким образом, что функция остается непрерывной. Во втором случае антенна представляет собой систему преобразователей, в пределах каждого из которых амплитудно-фазовое распределение остается неизменным, а действие управляющих устройств приводит к изменению амплитуд и фаз скачкообразно (дискретно) от преобразователя к преобразователю.

Антенны с дискретным распределением представляют собой систему расположенных в пространстве преобразователей, в цепи питания которых включены управляющие устройства, изменяющие амплитудно-фазовое распределение в антенне. Как уже говорилось, колебания, поступающие на отдельные преобразователи, составляющие антенну, при передаче подготавливаются управляющими устройствами — электронными схемами, создающими на выходе требуемое амплитудно-фазовое распределение. При приеме процесс управления амплитудами и фазами сигнала протекает в обратном порядке: до того как сигналы, принятые разными преобразователями, будут сложены в распределителе, их амплитуда и фаза будут изменены соответствующим устройством. Этот процесс изменения амплитуд и фаз сигналов в отдельных излучателях может быть назван обработкой сигнала. При обработке сигнала могут использоваться линейные системы с неизменными по времени параметрами, позволяющие получить антенну со многими выходами, каждому из которых соответствует своя характеристика направленности. Такие системы называют многолучевыми (или системами со статическими характеристиками направленности). Применяются также линейные системы с произвольно меняющимися параметрами, представляющие собой обычные фазовращатели или коммутаторы, действие которых позволяет характеристику направленности антенны перемещать в пространстве, сохраняя в основном ее форму. Это и есть антенны с движением луча. В первом случае сигналы, поступающие к антенне с различных направлений, разделяются при поступлении на различные выходы антенны, т. е. разделяются в пространстве. Во втором случае они разделяются по времени, так как в результате действия управляющих устройств главный максимум характеристики направленности в разные моменты времени может быть сформирован в различных направлениях.

Для немеханического поворота (или вращения) характеристики направленности или формирования веера статических характеристик направленности в гидроакустической аппаратуре применяется способ управления с изменяющимся по элементам (преобразователям) фазовым распределением антенны. Используемые при этом антенны часто называют антеннами с искусственными или компенсированными характеристиками направленности. Рассмотрим физическую сущность процесса формирования подобных характеристик вначале на примере приведенной ранее линейной антенны из n точечных элементарных преобразователей, расположенных один от другого на расстоянии d , однако в данном случае возбуждение преобразователей вдоль линии будет не синфазным, но с одинаковыми амплитудами. Распределение фаз по элементам антенны рассчитывается таким образом, чтобы колебания складывались с одинаковой фазой

не в направлении β_0 (как было в синфазной антенне), а в заданном направлении β (направлении компенсации). По этому направлению будет ориентироваться максимум основного лепестка, все остальные лепестки характеристики направленности тоже поворачиваются на углы, пропорциональные β . Антенна при этом как бы разворачивается на угол β , а ее действующий раскрыв (по направлению β) уменьшается на величину $D(1 - \cos\beta)$, где D — линейный размер антенны (в данном случае ее длина).

Для получения волны с плоским фронтом в заданном направлении β в режиме излучения (в режиме приема по характеру процесс протекает в общем аналогично) необходимо, чтобы колебания всех излучателей антенны достигли линии ae в одно и то же время или же с одинаковыми фазами в точках выхода лучей под углом β на эту линию (рис. 6.8 *a*). С этой целью в цепь элемента a следует ввести электрическую задержку f_e , равную времени прохождения акустической волной расстояния fe . В цепях элементов gd , nc , ib задержки должны быть меньше и соответствовать времени прохождения акустическими колебаниями в воде расстояний соответственно gd , hc , ib (для приведенных в примере пяти отдельных излучателей), а в цепи элемента f задержки быть не должно. В результате по антенне возникнет линейное f_k дискретное фазовое распределение ступенями, соответствующими фазовому сдвигу, создаваемому задержкой ib . В результате максимум основного лепестка будет располагаться в направлении угла β к нормали антенны. Подобным образом осуществляется поворот основного лепестка в других задаваемых направлениях. Компенсация, выполненная таким способом, называется

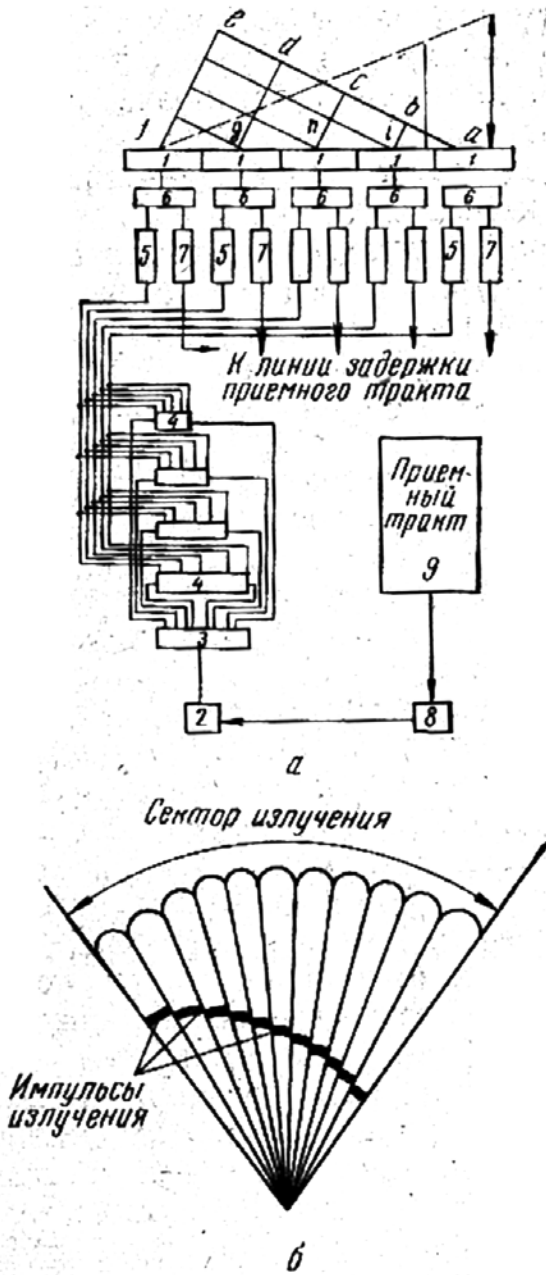


Рис. 6.8. Электронное сканирование в излучении: *a* — блок-схема гидролокатора со сканированием в излучении; *b* — процесс сканирования

временной и обеспечивает постоянство угла поворота характеристики направленности на любой частоте (в пределах частотной полосы системы задержки). Иногда применяется фазовая непосредственная компенсация (так как временная компенсация тоже приводит к компенсации фаз), заключающаяся в непосредственном изменении фаз возбуждения элементов антенны по линейному закону (в цепи элементов включаются фазовращатели). Необходимые значения фаз по элементам можно найти, если вычесть из расстояний, проходимых акустическими колебаниями в воде от элементов антенны до линии, перпендикулярной заданному направлению компенсации (расстояний, выраженных, например, в волновом измерении), целое число длин волн, а оставшиеся доли волн перевести в градусное или радианное измерение (длина волны соответствует 360° или 2π радиан). Чтобы сохранить угол поворота характеристики направленности постоянным, фазовое распределение следует менять с изменением частоты.

Угол поворота характеристики направленности при временной и чисто фазовой компенсациях связан со скоростью звука в воде и может меняться в зависимости от температуры и солености (для подкильных систем), а также от глубины (для буксируемых). Для изменения угла поворота характеристики направленности требуется изменение характера компенсации. Таким образом, количество различных временных задержек в цепи каждого элемента антенны или положений каждого фазовращателя должно быть равным числу направлений характеристики направленности. Чем меньше дискретность изменения фазы от одного элемента антенны к другому и протяженность по антенне участка с постоянной фазой или задержкой, тем ближе форма повернутой характеристики направленности к той, которую она имеет при $\beta = 0^\circ$.

Дискретное (ступенчатое) изменение задержки или фазы на каждом элементе во времени вызывает шаговый (ступенчатый) немеханический поворот характеристики направленности, а быстрая электронная коммутация направлений образует веер статических характеристик направленности. Для плавного поворота (сканирования характеристики направленности) необходимо непрерывное изменение фазы на каждом элементе антенны во времени, например с помощью фазовращателей. Плавное изменение направления характеристики направленности может быть получено также, если элементы антенны возбуждать на разных частотах, изменяющихся линейно вдоль антенны в небольших пределах. Так как частота определяет изменение фазы возбуждающего напряжения во времени, то по элементам антенны образуется периодически повторяющееся фазовое распределение, обуславливающее быстрое сканирование характеристики направленности.

Нормированная к максимальному значению характеристика направленности указанной линейной антенны с компенсацией определяется формулой

$$R_a = \frac{\sin \left[n\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \alpha - \sin \beta) \right]}{n \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \alpha - \sin \beta) \right]},$$

где $d \sin \beta$ – компенсируемая разность хода.

При $d > (\lambda/2)$ – линейка изотропных излучателей может иметь несколько максимумов излучения, равных по интенсивности главному максимуму. При нахождении максимумов и минимумов характеристики направленности в формулах, приведенных ранее для линейной антенны без компенсации, необходимо заменить разность хода Δ с учетом угла компенсации, т. е. вместо Δ указать $\Delta - \Delta \beta$.

100%-ные максимумы (или 100%-ные боковые лепестки) будут иметь место под углами $\beta \delta_i$, при которых выполняется условие:

$$(\pi d/2)(\sin \beta \delta_i - \sin \beta) = i\pi, \text{ или } \sin \beta \delta_i = \sin \beta \pm (\lambda/d)i,$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$

Ближайший к нормали максимум получится при $i = 1$

$$\sin\beta\delta_{-1} = -(\lambda/d) + \sin\beta.$$

Появление дифракционных максимумов при движении характеристики направленности антенны в виде линейки изотропных излучателей является чрезвычайно важным в теории антенн с немеханическим перемещением характеристики. Основной максимум располагается в том направлении, в котором разность хода лучей компенсирует сдвиг фаз токов ψ_0 в излучателях, т. е.

$$(2\pi d/\lambda) \sin\beta = \psi_0,$$

а дифракционный минимум появляется в том направлении, в котором разность хода лучей Δ дополняет сдвиг фаз в пространстве до 360° , т. е.

$$(2\pi d/\lambda) \sin|\beta_{\delta-1}| + \psi_0 = 2\pi.$$

Заметим, что в указанной формуле $\beta_{\delta-1}$ — отрицательная величина, так как ближайший побочный максимум расположен по другую сторону от нормали, чем β .

На рис. 6.9 показана графически зависимость положения первого (ближайшего) 100%-ного дополнительного бокового лепестка (первого добавочного максимума) от угла поворота основного лепестка (максимума) характеристики направленности линейной антенны. По оси абсцисс отложен угол поворота основного лепестка, по оси ординат — угол поворота ближайшего 100%-ного бокового лепестка (график относится к боковому лепестку, располагающемуся с противоположной стороны направления поворота основного лепестка с другой стороны нормали к линейке (см. на рис. 6.9 в правом нижнем углу).

Цифры при кривых означают волновые расстояния между элементами антенны d/λ (на рис. 6.9 они обозначены (l/λ)).

Углы ориентации минимумов характеристики направленности могут быть найдены из равенства:

$$\Delta - \Delta\beta = \pm(\lambda/n)l \text{ или } \sin\alpha_{\text{мин}i} = \sin\beta \pm (\lambda/nd)i, \quad i = 1, 2, 3, n, \text{ кроме } i, \text{ кратных } n.$$

Таким образом, при обеспечении немеханического перемещения (поворота) характеристики направленности (основного лепестка) линейной эквидистантной антенны элементарных точечных излучателей в общем случае имеют место два вида боковых лепестков. Первый вид — это обычные

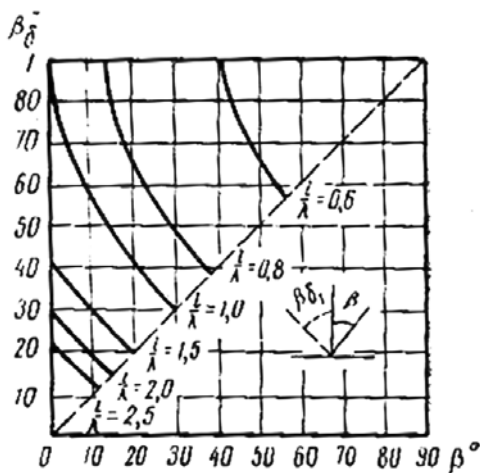


Рис. 6.9. Зависимость положения ближайшего максимума $\beta_{\delta 1}$ линейки изотропных излучателей от угла поворота β основного лепестка [Орлов, Шабров, 1974].

боковые лепестки (малые), свойственные всем видам антенн. При равномерном амплитудном распределении у сплошной линейной антенны уровень бокового излучения (и приема, соответственно) этого вида достигает 22%. Второй вид — боковые лепестки, возникающие в тех направлениях, в которых, как указывалось, разность хода лучей от отдельных излучателей кратна целому числу этих волн с амплитудой, достигающей амплитуды основного лепестка.

Если говорить о линейках с неизменным расстоянием между элементами (с так называемым эквидистантным расположением), используемых для немеханического перемещения характеристики направленности, то наличие указанных дополнительных 100%-ных максимумов при пово-

роте характеристики является серьезным фактором, ограничивающим максимально возможные углы немеханического (электронного) разворота характеристики направленности (и сектор электронного сканирования). При немеханическом повороте характеристики направленности также происходит некоторое изменение ширины характеристики антенны при изменении угла ее отклонения от нормали. Это связано с уменьшением эффективного размера линейки, т. е. в формуле для $\sin(\alpha/2) = (\lambda/L)$ длину антенны необходимо брать равной $L\cos\beta = L_{\text{эф}}$ (размер как бы уменьшается на $L(1 - \cos\beta)$). Ширина характеристики направленности определяется размером проекции линейки на направление, перпендикулярное направлению основного лепестка.

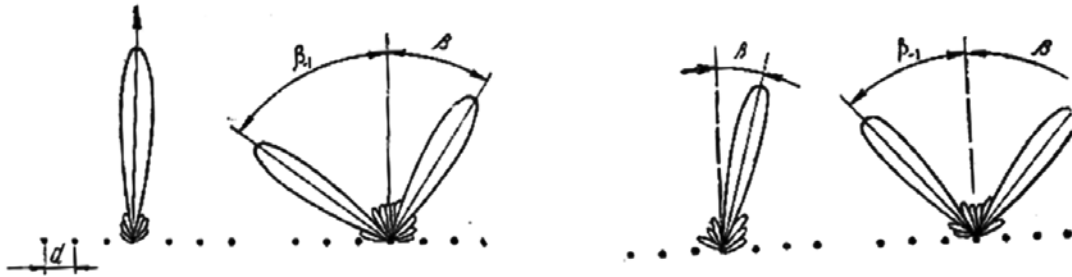


Рис. 6.10. Изменение величины дополнительного максимума при изменении β при $d=3/4\lambda$

На рис. 6.10 показана характеристика направленности линейки излучателей при $d=3/4\lambda$ и различных β . Из рис. 6.10 видно, что дополнительный максимум (под углом β_{-1}) отсутствует только при небольших отклонениях характеристики (при малых β). При $d < \lambda/2$ дополнительный 100%-ный максимум не появится ни при каких β , при $d > \lambda$ этот боковой максимум будет даже при $\beta = 0$. Естественно, что для нормально работающей антенны появление побочного максимума, равного по интенсивности главному, совершенно неприемлемо. Следовательно, если антенна составлена из ненаправленных элементов-преобразователей, то их нужно располагать один от другого на расстоянии, не превышающем $\lambda/2$. Это приводит к необходимости использовать большое число элементов и соответственно большое число управляющих устройств. Размер линейки (ее длина) задается шириной главного лепестка, и если преобразователи располагаются через $\lambda/2$, то их число зависит только от ширины характеристики. Для уменьшения числа элементов антенны их нужно располагать на большем расстоянии один от другого. Для подавления возникающего при этом дифракционного максимума вместо ненаправленных преобразователей применяются направленные элементы. При подавлении дополнительного максимума решающую роль играет диаграмма направленности отдельного излучателя. В рыболокационной аппаратуре линейки ненаправленных излучателей практически не применяются в связи с малой излучающей поверхностью. Из-за необходимости заполнения всего раскрыва антенны преобразователями для получения максимально возможной излучающей (активной) поверхности реальные гидроакустические антенны выполняются из элементов (секций), имеющих вполне определенную протяженность и, следовательно, обладающих направленным действием. Если секции антенны идентичны, расположены эквидистантно и между ними отсутствует (или мало) взаимодействие, то характеристика направленности линейной компенсированной антенны, состоящей из n -направленных элементов с характеристикой $R_0(a)$, в соответствии с теоремой умножения определяется следующим выражением:

$$R_a = \frac{\sin \left[n\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \alpha - \sin \beta) \right]}{n \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \alpha - \sin \beta) \right]} \times R_c(a).$$

Первый множитель – характеристика направленности компенсированной линейной антенны ненаправленных излучателей с расстоянием d между ними (и соответственно между центрами реальных секций).

Обычно протяженность электронносканирующей (с немеханическим перемещением характеристик) антенны значительно превышает длину секции, а характеристика направленности секции является слабонаправленной, т. е. шире характеристики направленности всей антенны (основного лепестка). В результате этого общая характеристика направленности может существенно отличаться от характеристики направленности антенны из ненаправленных элементов, особенно при немеханическом сканировании.

Рассмотрим в качестве примера реальную плоскую линейную акустическую антенну, состоящую из девяти одинаковых секций ($n=9$), характеристика направленности каждой из которых выражается в виде (см. рис. 6.11 *a* [Tucker, 1967])

$$R_{\alpha} = \frac{\sin \left[\left(\frac{\pi d}{\lambda} \right) \sin \alpha \right]}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha}.$$

Общая характеристика направленности R_{α} антенны имеет вид

$$R_{\alpha} = \frac{\sin \left(9 \frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha \right)}{9 \frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha} \times \frac{\sin \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha \right)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha}.$$

Первый множитель в этой формуле представляет собой характеристику направленности некомпенсированной линейки точечных излучателей расстоянием между ними d (обе характеристики нормированные). Из рис. 6.11 *a* видно, что общая характеристика направленности, равная произведению двух указанных диаграмм 1 и 2, имеет всего

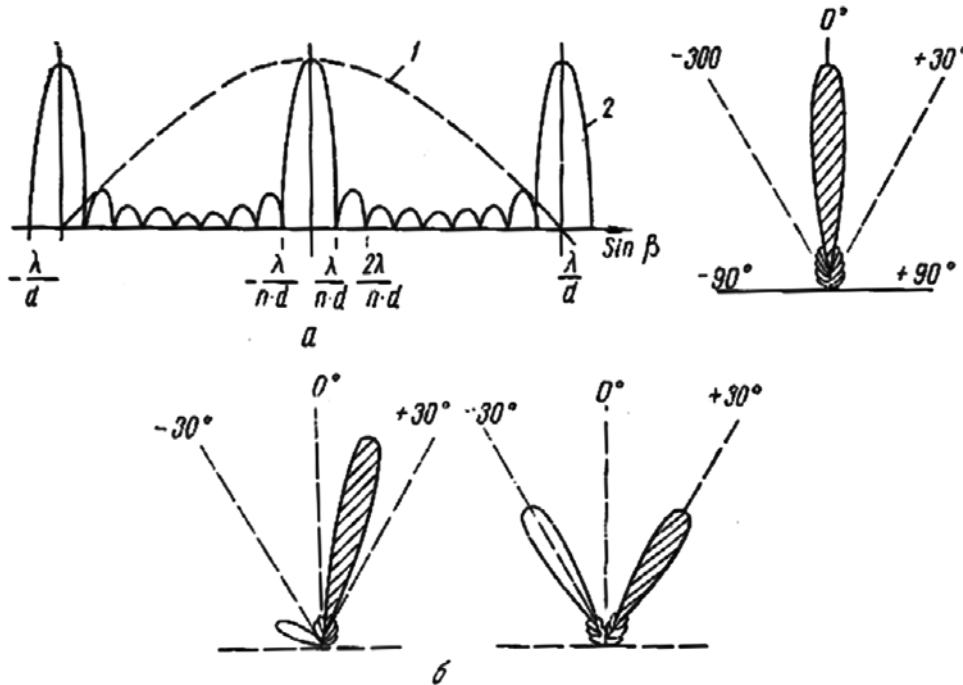


Рис. 6.11. Общая характеристика направленности линейной дискретной антенны:
a – при $\beta = 0^\circ$; *б* – при электронном сканировании

один максимум (хотя первая характеристика имеет три равных максимума), так как при тех значениях β , при которых характеристика 2 имеет добавочные максимумы, значения характеристики 1 равны нулю.

При немеханическом сканировании общей характеристики направленности (посредством, например, временных задержек) происходит только изменение характеристики 2, так как фазовые отношения меняются лишь при переходе с одного элемента (секции) на другой. Поэтому характеристика 1 будет фиксированной в пространстве. В результате характеристика 2 будет перемещаться относительно характеристики 1, которая является в некотором смысле огибающей. В связи с этим при изменении (увеличении) угла отклонения или компенсации (например, вправо) происходит следующее:

а) высота или амплитуда основного лепестка результирующей характеристики направленности, уменьшается при увеличении β ;

б) дополнительный максимум характеристики 2, в исходном состоянии (т. е. при $\beta = 0^\circ$) находящийся в положении $\sin^{-1}(\lambda/d)$, перемещается вправо, благодаря чему результирующий отклик общей характеристики начинает увеличиваться на некотором угловом расстоянии от основного лепестка.

Когда основной лепесток отклонится на угол $\sin^{-1}(\lambda/2d)$, его высота уменьшается приблизительно на 3 дБ, а дополнительный максимум (левый) увеличивается по амплитуде. При дальнейшем увеличении угла β (отклонения) он становится равным основному лепестку (который уменьшается по амплитуде) и далее может даже его превысить. Таким образом, становится ясным, что предел практического отклонения основного лепестка (или половина ширины сканирования сектора) равен:

$$\beta_0 = \sin^{-1}(\lambda/2d).$$

Указанное положение иллюстрируется полярной диаграммой немеханического сканирования характеристики направленности рассмотренной реальной антенны с $n=9$ и $d=\lambda$ (рис. 6.11 б). Из рис. 6.11 б видно, что в данном случае максимальная ширина сектора сканирования будет не более $60^\circ (\pm 30^\circ)$ и что имеются неоднозначные эффекты на краях сектора [Tucker, 1967].

Поворот основного лепестка ограничен падением его уровня в результате воздействия направленности секций, ростом уровней боковых лепестков в местах расположения сниженных 100%-ных, расширением основного лепестка в связи с уменьшением действующего раскрытия при повороте (рис. 6.12) и неточностью компенсации.

У антенн с $d=0,7\lambda$ при $\beta = \pm 26^\circ$ максимум 100%-ного бокового лепестка возникает при угле, равном -90° . Поворот же основного лепестка (если уровень бокового излучения должен быть меньше 30%) оказывается возможным на угол не более $20-23^\circ$ в зависимости от волнового размера антенны, так как чем меньше размер антенны, тем больше в область углов, больших -90° , заходит нижний уровень правой половины 100%-ного бокового лепестка. Больших углов поворота характеристики направленности можно достичь при $d=0,6\lambda$ — до $35-38^\circ$, а при $d=0,5\lambda$ — примерно до 60° . Таким образом, с увеличением ширины сектора сканирования требуется увеличение количества секций (т. е. более мелких элементов) в антенне и, следовательно, числа каналов в электронной части аппаратуры.

Когда требуется более узкий луч на той же частоте для получения более высокой угловой разрешающей способности в пределах сектора, длина плоской антенны должна

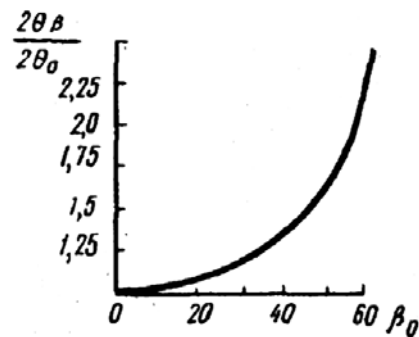


Рис. 6.12. Зависимость ширины основного лепестка от угла β [Орлов, Шабров, 1974]

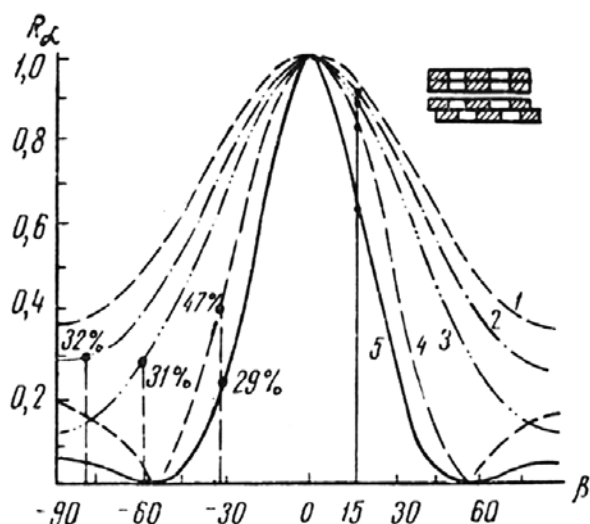


Рис. 6.13. Влияние направленности секции на компенсированную характеристику направленности: 1 – при $d=0,7\lambda$; 2 – при $d=0,8\lambda$; 3 – при $d=0,9\lambda$; 4 – при $d=1,25\lambda$; 5 – при $d=1,25\lambda$ [Орлов, Шабров, 1974]

сти секции при неизменном расстоянии между фазовыми центрами секций. Как видно из рис. 6.13 (кривая 5), ширина основного лепестка у этой секции меньше, чем у подобных секций при характеристике направленности вида $\sin z/z$ (рис. 6.13, кривая 4).

Характеристику направленности с заданной шириной основного лепестка при сохранении расстояния d между фазовыми центрами секций неизменным можно получить, если сдвинуть часть антенны вдоль ее максимального размера (рис. 6.13, в правый верхний угол). Однако при этом происходит большее снижение уровня основного лепестка при его повороте.

Для линейки слабонаправленных излучателей плоской антенной системы считается целесообразным максимальное отклонение $\beta_{\text{макс}}$, составляющее не более $\pm 45^\circ$ (сектор сканирования 90°) из-за совокупного воздействия вышеприведенных ограничений (в т. ч. с учетом сильного уменьшения эффективного раскрытия антенны). При таком угле отклонения преобразователи секции можно располагать на расстоянии примерно $0,55\lambda$ одну от другой. Идеальной формой диаграммы направленности отдельного преобразователя (или секции) была бы характеристика в виде прямоугольника, ширина которого равнялась бы сектору перемещения (поворота) общей характеристики направленности. Тогда главный лепесток при движении не ослаблялся бы, а побочные боковые максимумы были бы надежно подавлены.

При меньших секторах движения характеристики расстояние между центрами элементов антенны можно увеличивать, но обычно не более, чем до $d=\lambda$, так как при больших d лепестки дифракционного происхождения будут большими. В этом случае целесообразно использование и более направленных преобразователей, обеспечивающее лучшее подавление боковых лепестков без ослабления главного максимума, в результате может быть уменьшено число элементов в антенне.

Оптимальную характеристику направленности секции антенны с уменьшенным числом каналов в антенне и соответственно в гидроакустической системе можно подбирать, пользуясь следующей схемой. По известной (заданной) ширине основного лепестка характеристики направленности антенны при $\beta = 0^\circ$ и требуемому углу его поворота определяется минимально допустимое число каналов (секций). Длина антенны может быть определена по ширине основного лепестка при $\beta = 0^\circ$. Таким образом, оказывается известным расстояние d между фазовыми центрами секций. Затем антенну (секцию)

быть больше. Если при этом требуется перекрыть при немеханическом перемещении характеристики тот же самый сектор, то необходимо еще большее число секций в антенне.

При ограниченном числе каналов ограничен и угол максимального электронного сканирования характеристики направленности. Так, при $d=0,8-0,9\lambda$ и уровне боковых лепестков примерно 30% (в том числе и дополнительного максимума) поворот характеристики направленности может быть в пределах $\beta \pm 15^\circ$. Если же поворачивать характеристику направленности на $+15^\circ$ при размере секции $l=1,25\lambda$ с характеристикой ее направленности, аналогичной $\sin z/z$, уровень боковых лепестков составит 47% (рис. 6.13).

Более приемлемое соотношение уровней бокового максимума и основного лепестка можно получить в этом случае изменением характеристики направленности

разбивают на два-три ряда по вертикали и сдвигают один или два ряда по горизонтали (вдоль длины антенны), чтобы получить ширину основного лепестка характеристики направленности секции в горизонтальной плоскости такой же или несколько большей полного сектора качания общей характеристики направленности антенны.

Управление формой характеристики направленности секции в результате взаимного сдвига ее частей становится возможным благодаря изменению общего размера секции и амплитудного распределения, возникающего на секции с фигурным раскрытием. Идентичные характеристики направленности могут быть получены при различных соотношениях длины секции и формы амплитудного распределения. Выбор окончательной формы секции определяется из конструктивных соображений.

В отличие от обычных акустических антенн с однолепестковыми диаграммами направленности, антенны с электронным (немеханическим) сканированием характеристик направленности являются многоканальными. Поэтому выход из строя или резкое ухудшение параметров какой-либо одной или нескольких секций не всегда приводит к невозможности дальнейшей работы с аппаратурой до ремонта антенны. Выход из строя преобразователей на краях антенны вызывает расширение основного лепестка характеристики направленности. Отказ центральных секций (элементов) увеличивает уровень ближайших к основному боковых лепестков. Периодический отказ каждой второй секции (через один элемент) приближает 100%-ные боковые максимумы к основному с соответствующим увеличением их амплитуды.

На рис. 6.14 представлены характеристики направленности антенны (из эквидистантно расположенных на расстояниях $1,25 \lambda$ секций, оптимальных для случая качания основного лепестка в секторе $\pm 15^\circ$ (рис. 6.13, кривая 5) со всеми нормально работающими и отказавшими (через один элемент) преобразователями. На рис. 6.14 б светлыми кружками обозначены места расположения работающих секций половины антенны (штрихпунктирная ось проведена через центр симметрии), темными – отказавших. При $\beta = 15^\circ$ (т. е. при повороте характеристики направленности) первый левый

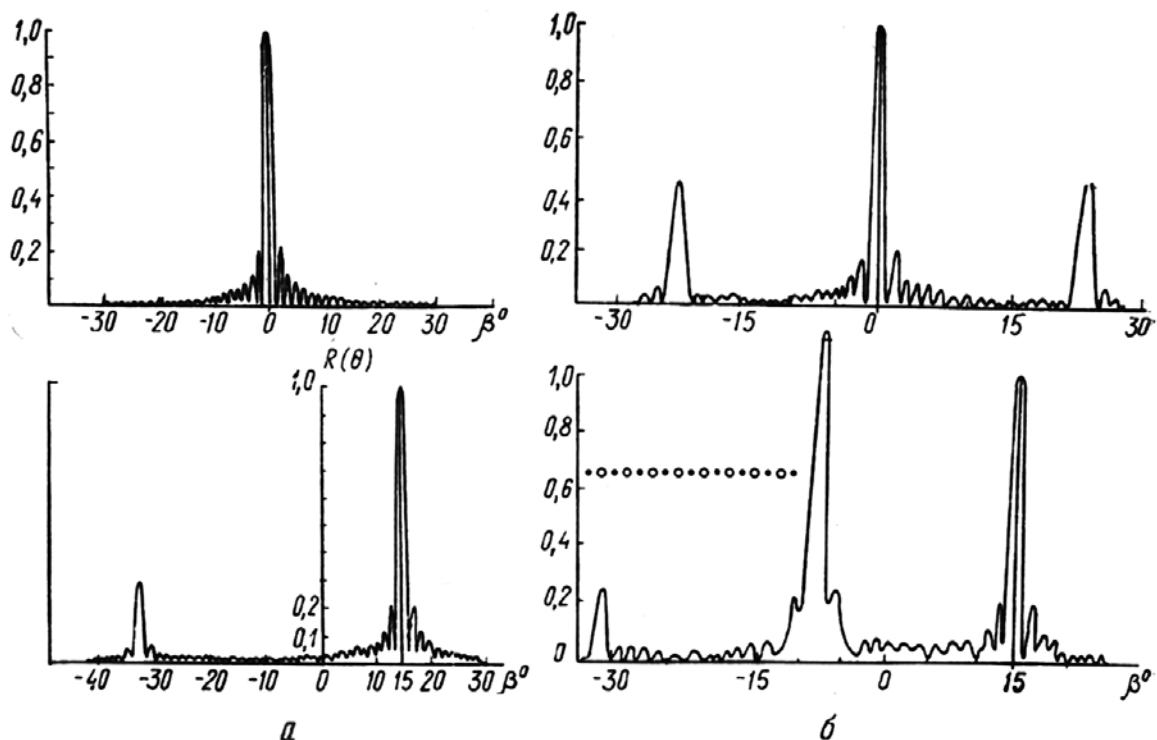


Рис. 6.14. Влияние отказов элементов на форму характеристики направленности антенн с электронным сканированием (при $\beta = 0^\circ$ и $\beta = 15^\circ$ [Орлов, Шабров, 1974]):

а – все элементы функционируют; *б* – периодический отказ элементов (через один)

максимальный боковой лепесток располагается уже под углом $\beta\delta_1 = -8^\circ$, и его уровень превышает уровень основного лепестка (образуется большой ложный максимум). При больших промежутках между неработающими секциями вдоль антенны наблюдается возрастание ряда боковых лепестков на разных углах. Влияние отказов на общую характеристику направленности усиливается с увеличением угла отклонения основного лепестка от нормали. Вредное влияние выходов элементов из строя ослабляется, если амплитуда акустических колебаний неисправных преобразователей уменьшается не до нулевого значения [Орлов, Шабров, 1974].

Цилиндрические и дуговые антенны

В связи с ограниченными возможностями плоских акустических антенн при обеспечении немеханического поворота характеристики направленности в больших секторах вокруг судна в гидролокаторах одновременного кругового обзора находят применение цилиндрические многоэлементные антенны. Они используются для реализации в станциях как кругового, так и секторного обзора. В силу симметрии антенны характеристики направленности получаются в основном идентичными при любой их ориентации в плоскости направляющей цилиндра. Антенны этого типа выполняются в виде замкнутого цилиндра или части его (последние еще носят название дуговых антенн) в зависимости от требуемого сектора обзора.

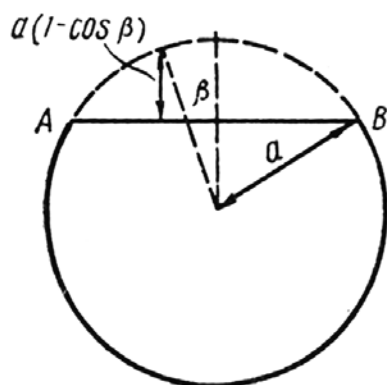


Рис. 6.15. Схема цилиндрической и дуговой антенны

В сравнении с плоскими антеннами цилиндрические и дуговые антенны более сложны по конструкции и имеют несколько меньший коэффициент концентрации при равновеликих размерах. В цилиндрических и дуговых многоэлементных антеннах отдельные преобразователи располагаются по окружности или дуге направляющей цилиндра (рис. 6.15). Применяя линии задержки, компенсирующие фазовые сдвиги колебаний каждого из преобразователей относительно плоскости, перпендикулярной какому-либо направлению, можно добиться того, чтобы некоторый сектор (или сегмент) цилиндра создавал диаграмму направленности, точно соответствующую характеристике направленности плоской линейной антенны. Таким образом, дуговая база преобразователей приводится к линейной базе. На рис. 6.15 изображен такой сектор цилиндрической системы преобразователей. При введении временных задержек, эквивалентных времени прохождения акустическими колебаниями в воде расстояний от каждого элемента до линии (хорды) AB — расстояние $a(1 - \cos\beta)$, сектор цилиндра приблизительно эквивалентен плоской антенне. Самая большая задержка требуется для среднего элемента, наименьшая для крайних элементов сектора, показанного на рис. 6.15 (рассмотренный вариант относится к приему акустических колебаний; при излучении явления те же). Для немеханического поворота полученной характеристики направленности применимы те же методы и способы, которые используются при электронном сканировании в линейных антеннах. При цилиндрических антеннах применим и другой метод немеханического изменения положения характеристики направленности — быстрое последовательное отключение крайнего элемента-преобразователя и подключение с другого края сектора нового элемента (тем самым обеспечивается круговое движение характеристики или перемещение в заданном секторе).

На рис. 6.16 показан пример простой шестисекционной цилиндрической антенны из ненаправленных приемников. В режиме приема сигналы (акустические колебания), прибывающие к антенне, например, с направления a (в виде плоской волны, что вполне справедливо при достаточно большом удалении источника колебаний от ан-

тенны), максимально задерживаются линией задержки в цепи секции 1,1 и 1,6 на время, за которое звук проходит расстояние от указанных секций до секций 1,3–1,4. Колебания, принятые секциями 1,2 и 1,5, задерживаются на меньшее время, а в цепи секций 1,3 и 1,4 задержки не вводятся. Электронный коммутатор направления подключает к основному усилителю различные задерживающие цепи, обеспечивая тем самым компенсацию характеристики направленности в соответствующих направлениях.

При круговой цилиндрической антенне (при полном цилиндре) таким образом может быть обеспечен немеханический поворот характеристики направленности на 360° . При дуговой (части цилиндра) антенне в принципе может быть получен большой сектор немеханического поворота характеристики направленности по сравнению с линейной антенной в случае комбинирования двух методов поворота (вращения) – применение после приведения части сектора к линейной системе фазовой компенсации поворота характеристики, а также последовательного отключения секций с одного края сектора и подключения секций с другого края (при использовании только последнего метода необходима антенна с угловым размером, превышающим сектор одновременного обзора).

Минимум числа каналов у цилиндрической антенны с компенсированной характеристикой направленности ограничивается необходимостью расположения фазовых центров секций на расстоянии d , близком к $0,5\lambda$. При больших расстояниях растет уровень боковых лепестков на углах более 90° и падает коэффициент концентрации. Эти изменения проявляются особенно сильно, если расстояние между центрами секций превышает $0,6\lambda$. Соответственно число секций цилиндрической антенны диаметром D в плоскости направляющей определяется по следующей формуле:

$$n = \frac{2\pi D}{\lambda}.$$

Размер самой секции по возможности выбирается максимальным в пределах расстояния d между секциями цилиндрической антенны.

Особенностью цилиндрической антенны является существование оптимального компенсируемого раскрытия – рабочего сектора антенны в каждый момент времени (т. е. в каждый момент времени работает только часть антенны), равного примерно 120° .

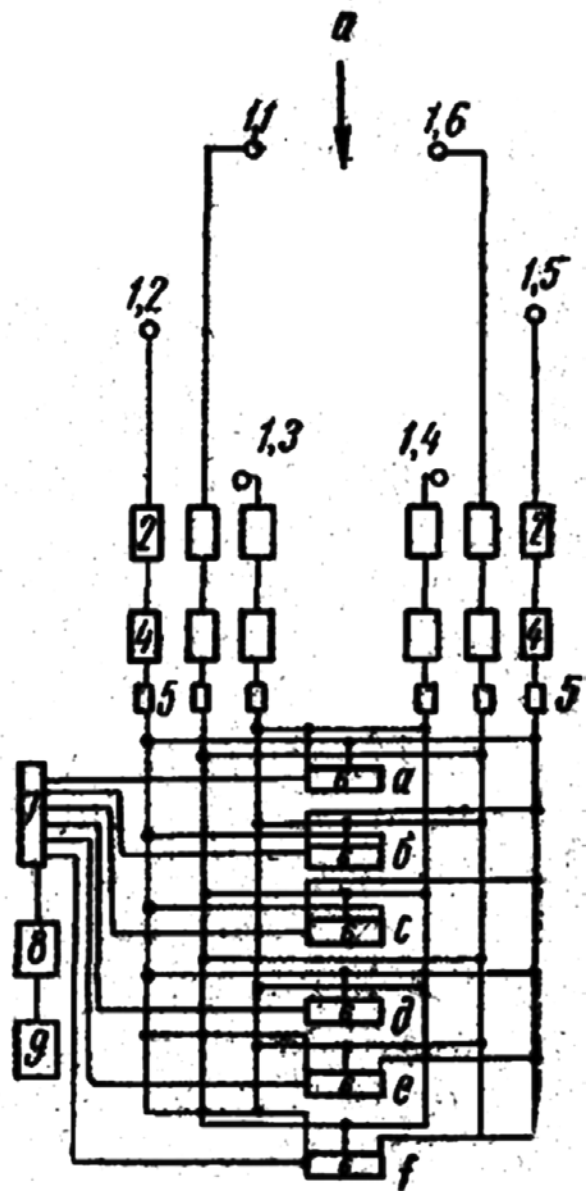


Рис. 6.16. Схема формирования направлений приема эхосигналов: блок-схема формирования приемных характеристик:

1,1–1,6 – секции антенны; 2 – коммутаторы приема-передачи; 4 – предварительные усилители приемного тракта; 5 – развязывающие устройства; 6 – цепи задержки a–f; 7 – электронный коммутатор направлений; 8 – основной усилитель; 9 – устройство отображения

Величина этого угла определяется двумя факторами. И меньший и больший секторы уменьшают коэффициент использования площади антенны: при меньшем секторе расширяется основной лепесток характеристики направленности, при большем увеличивается уровень боковых и тыльных лепестков на углах более 120° . Последнее происходит вследствие большой дискретности фаз между соседними секциями, доходящей при скользящих углах падения звука на антенну до 180° .

6.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ

Идеальная антенна должна концентрировать всю излучаемую ею энергию в главном лепестке, однако у реальных антенн часть энергии рассеивается за пределами основного пучка, образуя боковое излучение, характеризующееся уровнем боковых лепестков. Наличие бокового излучения (и приема) или боковых лепестков акустических антенн нежелательно в любой аппаратуре промысловой гидроакустики и в ряде случаев сильно влияет на ее эффективность. Это относится, например, к работе гидролокаторов горизонтального действия во время поиска рыбы в приповерхностных слоях воды при волнении моря или при работе на сравнительно небольших глубинах (практически во всей шельфовой зоне). Боковое излучение (и прием) существенно влияет на эффективность обнаружения рыбы рыбопоисковой аппаратурой вертикального действия при сильноизрезанных грунтах с резкими перепадами глубин, при работе на склонах или свалах глубин. Даже при наличии узконаправленных систем в случае работы на свалах глубин полезные эхосигналы от рыб могут сильно маскироваться отражениями, принятыми боковыми лепестками антенны.

Применяемые ранее в аппаратуре промысловой гидроакустики сплошные одно- или двухэлементные антенны в силу своих конструктивных особенностей не позволяли существенно снижать уровень бокового излучения. Все более широкое внедрение многоэлементных акустических антенн, набираемых из преобразователей небольших размеров в виде мозаики, обеспечивает возможность регулирования характеристик их направленности, в т. ч. и для снижения уровней боковых лепестков.

Наиболее простым способом уменьшения уровня боковых лепестков является придание антенне соответствующей формы раскрыва. Так, например, применение антенн с круглым раскрывом позволяет получить уровень боковых лепестков почти в два раза меньший, чем у плоских антенн с прямоугольным раскрывом. При наборе антенны из n -го количества преобразователей можно достаточно легко получить более пригодную форму раскрыва антенны. Существующие при этом возможности варьирования расположением элементов и групп элементов по раскрыву антенны и отдельного управления их возбуждением позволяют достигнуть еще большего эффекта. Идеальной антенной была бы антенна с характеристикой направленности без боковых или вторичных лепестков. На практике такую идеальную антенну создать нельзя, однако ослабить боковое излучение или снизить его влияние вполне возможно.

Эффективным и достаточно не сложно реализуемым способом уменьшения уровня боковых лепестков является использование неравномерного амплитудного распределения возбуждения элементов антенны. Влияние регулируемого амплитудного распределения на характеристику направленности может быть рассмотрено путем сравнения диаграмм направленности шестиэлементного линейного антенного устройства при различных вариантах такого распределения (рис. 6.17 *a*; на оси абсцисс — углы в град.; на оси ординат — уровень в децибелах). Первая характеристика относится к обычной антенне с равномерным амплитудным распределением (одинаковым), которое, например, может быть записано, как 1, 1, 1, 1, 1, 1. Когда с одинаковой амплитудой возбуждаются только крайние элементы, а на остальные ничего не подается, амплитудное распределение может быть записано в виде 1, 0, 0, 0, 0, 1. В этом случае характеристика состоит из ряда лепестков равной амплитуды (подобно антенному устройству из двух точечных излучателей). При возбуждении только центральных элементов способом, показанным

как 0, 0, 1, 1, 0, 0, боковые лепестки исчезают и остается один широкий главный лепесток (подобно устройству из двух точечных источников при близком отстоянии одного от другого). Таким образом, введение амплитудного распределения, спадающего от центра к краям антенны, расширяет основной лепесток и уменьшает боковые лепестки; действие обратного спадания от краев к центру приводит к сужению главного лепестка за счет увеличения боковых дополнительных лепестков. Имеются законы спадания амплитудного распределения, позволяющие получить необходимое подавление боковых лепестков (типа, например, 0,1; 0,5; 1,1; 0,5; 0,1 – биномиальное распределение или 0,3; 0,69; 1; 0,69, 0,30 – чебышевское распределение и др.) [Urik, 1967]. Спадающее амплитудное распределение может быть, например, получено при использовании у краев раскрыва элементов с меньшими коэффициентами полезного действия.

Достаточно легко может быть реализовано в антеннах средств рыбохозяйственной гидроакустики так называемое естественное неравномерное амплитудное распределение, подобное рассмотренному при оценке характеристики направленности антенны с квадратным раскрывом в диагональной плоскости. Неравномерное амплитудное распределение, спадающее к краям, одновременно со снижением уровня боковых лепестков приводит как к расширению основного лепестка, так и к уменьшению его амплитуды (за счет уменьшения общей энергии, как бы снимаемой с поверхности антенны). На рис. 6.17 б приведены характеристики направленности акустических антенн с одинаковой волновой длиной 8λ , одна из которых не имеет регулируемой характеристики направленности, а другая имеет спадающее к краям амплитудное распределение (амплитуда колебаний поверхности антенны имеет максимум в центре и уменьшается к краям).

Рассмотрим некоторые методы получения естественного изменяющегося амплитудного распределения, которое образуется в результате создания специальной формы контура раскрыва антенны [Орлов, Шабров, 1974]. Необходимо учитывать, что в результате осуществляется регулирование – изменение характеристики направленности не во всех направлениях в пространстве, а только в некоторых; во многих случаях применения антенн этого вполне достаточно. Пусть имеются два идентичных прямоугольных преобразователя, сдвинутых относительно друг друга на расстояние d (рис. 6.17 в). На основании теоремы умножения характеристика направленности такой составной антенны определяется выражением:

$$R_{\alpha} = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha} \cos\left(0,35 \frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right), \quad (6.1)$$

т.е. является произведением характеристик направленности линейной непрерывной антенны длиной l и антенны (дипольного вибратора) из двухточечных источников, разнесенных на расстояние d . Первый множитель в выражении (6.1) обуславливает расположение наибольшего бокового лепестка (первого бокового) при значении аргумента $(\pi l/\lambda) \sin \alpha = 4,5$. В связи с этим целесообразно выбирать d таким, чтобы минимум, определяемый вторым множителем, располагался в месте нахождения амплитудного значения первого (наибольшего) бокового максимума. Исходя из этого условия и равенства $(\pi d/\lambda) \sin \alpha = \pi/2$ (у антенны из двух точечных источников положение первого минимума находится из этого условия), видно, что $d = 0,35l$.

График функции (6.1), отвечающий поставленным условиям, показан пунктиром на рис. 6.17 з (3). Из него видно, что ближайший боковой лепесток с уровнем 22% разбился на два с уровнями по 4%. Антенна такого типа фактически составлена из трех частей. По протяженности средняя часть, имеющая вдвое большую амплитуду, примерно в 2 раза больше крайних частей. Это можно представить, если спроектировать все элементарные излучающие точки раскрыва на линию, соединяющую указанные два преобразователя. Плотность распределения точек не будет равномерной вдоль указанной линии,

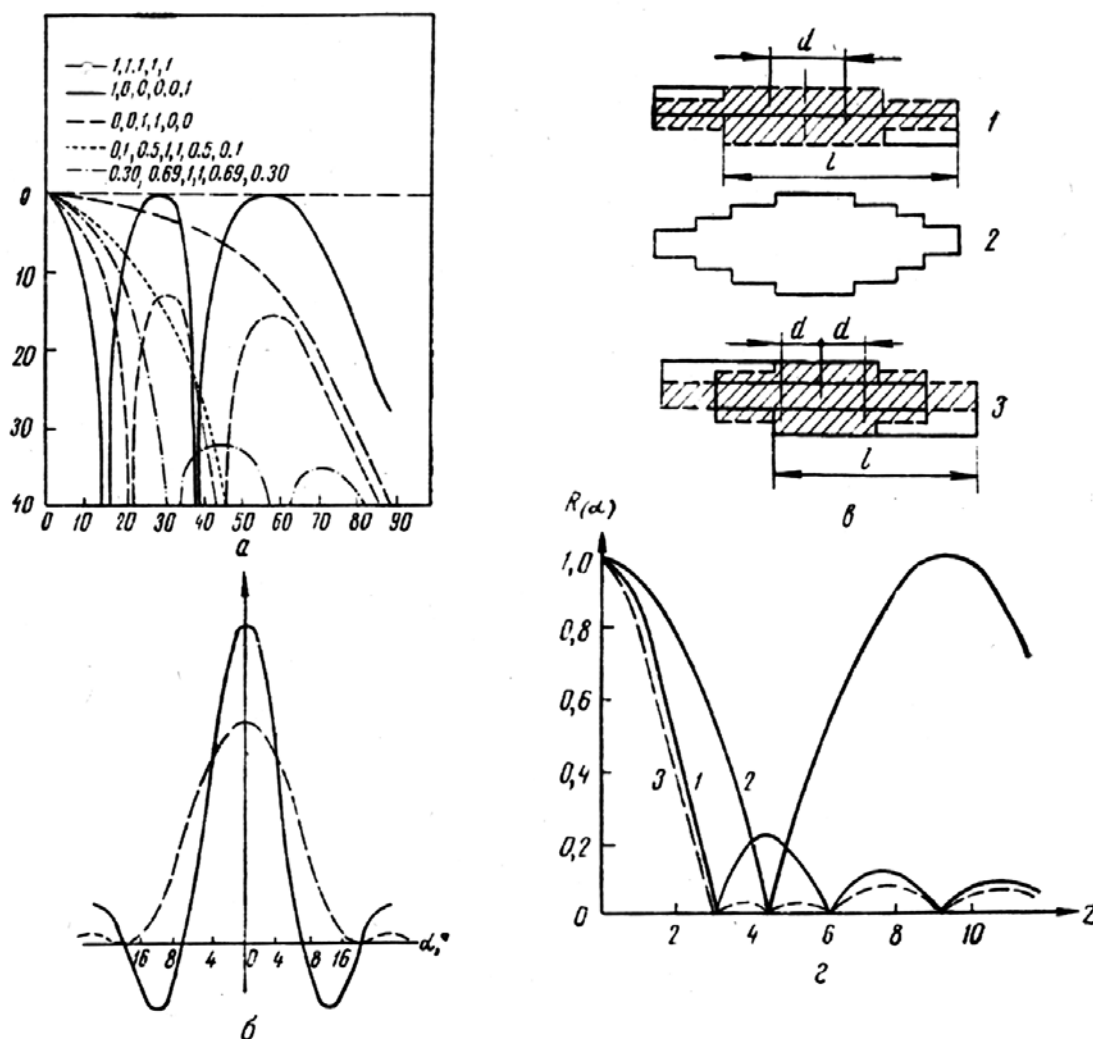


Рис. 6.17. Влияние на характеристику направленности неравномерного амплитудного распределения возбуждения (а) и (б), неравномерного распределения элементов (в) и (г):

1 – $\sin z/z$; 2 – $\cos(0,35z)$; 3 – $(\sin z/z) \cos(0,35z)$ [Urik, 1967; Орлов, Шабров, 1974].

максимальная плотность (следовательно и амплитуда) создается в центральной части, где оба преобразователя соприкасаются. Общую антенну можно представить в виде, показанном пунктиром на рис. 6.17 в (1).

Для уменьшения последующих 10%-ных лепестков и снижения их общего уровня (больше чем на 4%) процесс дробления продолжают. Можно, например, скомбинировать две антенны только что рассмотренного вида, сдвинув их центры на $d = 0,2 l$. Получается база (рис. 6.17 в, 2) с соотношением протяженностей ступеней 4: 3: 4: 9: 4: 3: 4 и амплитуд, соответственно, 1: 2: 3: 4: 3: 2: 1, а характеристика направленности описывается выражением:

$$R_{\alpha} = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha} \cos\left(0,35 \frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right) \cos\left(0,2 \frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right).$$

У этой антенны уровень наибольшего бокового лепестка составляет примерно 4%. Если продолжить дробление по такому же принципу, то добавляется множитель $\cos\left(0,143\left(\frac{\pi l}{\lambda}\right) \sin \alpha\right)$ и т. д. [Urik, 1967; Орлов, Шабров, 1974].

Чем больше ступеней, тем ближе непрерывное распределение и ниже боковые лепестки. Однако практически бывает вполне достаточно выполнить три ступени. Может быть удобным применение и антенны, показанной на рис. 6.17 в (3), у которой соотношение протяженностей ступеней 1:1:2:1:1, амплитуд – 1:2:3:2:1, а характеристика направленности определяется формулой:

$$R_{\alpha} = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha} \times \frac{\sin\left(3 \frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{3 \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}.$$

Второй сомножитель в последнем выражении – есть характеристика направленности базы из трех точечных излучателей с расстоянием d между ними. При выполнении условия, что второй сомножитель дает 0 там, где первый определяет максимальный (первый) боковой лепесток, необходимо принять $d=0,23l$.

Еще меньший уровень боковых лепестков можно получить комбинированием формы и смещением трапеций и треугольников, что в пределе приводит к параболическому амплитудному распределению [Орлов, Шабров, 1974]. Уменьшение амплитуды основного лепестка у подобных антенн по сравнению с амплитудой бокового лепестка соответствующих антенн с прямоугольным раскрывом (со сторонами, определяемыми максимальными размерами ступенчатых антенн) обуславливается уменьшением площади активной поверхности.

Другим методом подавления боковых лепестков, а также сужения характеристики направленности основного лепестка является логическая обработка или логический синтез характеристик [Вендик, 1965; Бененсон, 1966], осуществляемый только при работе на прием. Основу этого метода составляет применение соответствующей обработки эхосигналов, полученных от антенны в целом или от отдельных ее частей, т. е. преобразователей или групп преобразователей, и получение желаемой формы характеристики направленности, которая не может быть создана путем линейной комбинации сигналов от отдельных преобразователей, составляющих антенну. Наиболее распространенный способ логического синтеза состоит в том, что на специальные электронные схемы аппаратуры воздействуют колебания с двух различных групп преобразователей антенны. В приемном тракте аппаратуры имеются канал суммы и канал разности, на выходе которых, соответственно, вырабатывается сумма и разность колебаний – сигналов, принятых указанными выше группами преобразователей (секций антенны). Соответственно имеют место диаграммы направленности суммарного и разностного каналов (рис. 6.18).

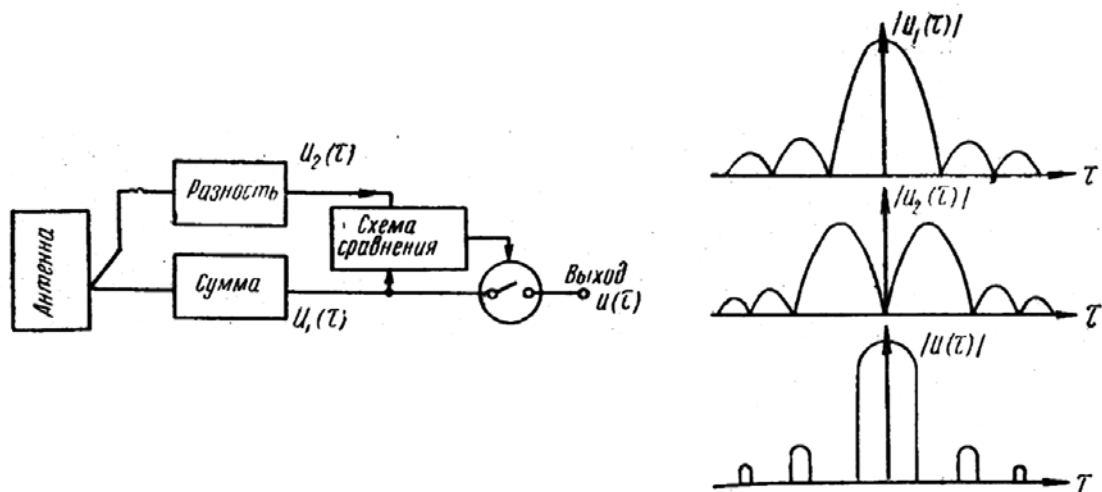


Рис. 6.18. Логический синтез характеристик направленности [Вендик, 1965; Бененсон, 1966].

Рассмотрим, как можно осуществить логический синтез характеристики направленности при использовании суммарного и разностного каналов антенны в соответствии с рис. 6.18. Подадим колебания с обеих групп антенны на два различных тракта приемного устройства (суммы и разности) и после детектирования и усиления – на вход порогового устройства. Это устройство при $U_2(\tau) > U_1(\tau)$ включено, а при $U_2(\tau) < U_1(\tau)$ выключено. На рис. 6.18 показан вид $U(\tau)$ после логической обработки. Основной лепесток характеристики направленности стал уже. Его можно еще более сузить, если коэффициенты усиления обоих трактов сделать разными, увеличив тем самым амплитуду сигнала, полученного от разностного канала (или сделать регулируемым одно из пороговых устройств).

Характеристики обычных антенн не зависят от последующих методов обработки принятого сигнала и определяются лишь их электроакустическими свойствами. Существует, однако, класс антенн, в которых принятый сигнал подвергается специальной обработке для увеличения количества извлекаемой информации о его пространственных формах или для улучшения чисто антенных параметров (коэффициент направленности, разрешающая способность, снижение боковых лепестков и др.). В некоторых случаях применение систем с обработкой сигнала позволяет улучшить какой-либо заданный параметр, не оказывая воздействия на остальные. Например, если требуется высокая точность определения направления, а коэффициент концентрации может быть небольшим, то применение обычных антенн нецелесообразно, т. к. в них эти два параметра жестко связаны и антенна окажется громоздкой и дорогостоящей. Многоэлементная же антенна с обработкой сигнала, спроектированная определенным образом, может иметь умеренные размеры. Подобным образом можно с помощью такой антенны сравнительно небольших габаритов получить узкую характеристику направленности и более высокую точность определения направления по сравнению с получаемой с помощью обычной антенны при одинаковых размерах [Вендик, 1965].

Следующим методом регулирования характеристик направленности акустических антенн является так называемая нелинейная обработка сигнала. Антенны с нелинейной обработкой сигнала – это многоэлементные антенны, сигнал на выходе которых является произведением, степенью или корреляционной функцией сигналов от отдельных элементов или групп элементов (секций). В обычной многоэлементной антенне (аддитивной) результирующий сигнал получается путем сложения или линейного суммирования сигналов, принятых каждым элементом (принятых акустических давлений, преобразованных в напряжение или ток), и их линейной обработки. Амплитуда и фаза их могут изменяться линейными устройствами (коммутаторами, аттенюаторами, усилителями и др.).

Особенность всякого линейного прибора заключается в том, что выходной сигнал, полученный при воздействии на устройство суммы сигналов, равен сумме сигналов, каждый из которых получился бы при воздействии на устройство каждого входного сигнала в отдельности.

Целью нелинейной обработки является увеличение направленности при неизменном раскрытии², уменьшение числа излучающих элементов, снижение уровня боковых лепестков и т. д.

Рассмотрим антенны с перемножением сигналов, которые еще носят название мультипликативных (от слова multiplier – множитель). Такие системы имеют свойства, отличающие их от линейных антенных устройств. В качестве примера рассмотрим антенную систему, представленную на рис. 6.19 *a* [Tucker, 1967]. Приемная акустическая антенна длиной l разделена на две одинаковые секции с расстоянием между их центрами $l/2$. Выходы секций подключены отдельно к схеме, вырабатывающей выходное напряжение, в каждый момент времени пропорциональное произведению двух напряже-

² Также может решаться и обратная задача – обеспечение или сохранение неизменной направленности при уменьшенном по сравнению с обычной антенной раскрытием.

ний, подаваемых на нее одновременно. Если акустические колебания приходят к антенне с направления, имеющего угол β с плоскостью антенны или с нормалью к ней (рис. 6.19 *a*), то синусоидальную волну в точке А с амплитудой давления p можно записать в виде $p \cos \omega t$.

Для упрощения будем считать, что волна в точке А имеет нулевую фазу, т. е. примем ее за опорную. Считая, что секция А является преобразователем давления в напряжение (т. е. антенна пьезоэлектрическая), можем записать, что от этой секции к умножителю будет поступать электрическое напряжение в виде $U \cos \omega t$. Волна, прибывающая в точку В из достаточно удаленной точки пространства, проходит дополнительное расстояние СВ, равное $l/2 \sin \beta$, т. е. волна в точке В запаздывает по фазе на угол θ_E (на рис. 6.19 *a* обозначен буквой β):

$$\theta_E = \frac{\pi l}{\lambda} \sin \beta, \quad (6.2)$$

где λ — длина волны.

Волну давления в этой точке можно записать как $p \cos(\omega t - \theta_E)$, а электрический сигнал, подаваемый на другой вход умножителя, может быть записан как $U \cos(\omega t - \theta_E)$. Результат перемножения двух указанных сигналов показан на рис. 6.19 *б*: для случая, когда $\theta_E = \pi/3$ — радиан (или 60°) и $U=1$ В. Две принимаемые волны 1 и 2 показаны на рис. 6.13 *б*. Цифрой 3 обозначено их произведение. Например, при $t=0$ волна 1 равна 1, а волна 2 — 0,5. Их произведение, следовательно, равно 0,5 и далее оно наносится на диаграмму в точке $t=0$. После перемножения всех значений кривых волн 1 и 2 в соответствующие одинаковые моменты времени окажется, что кривая 3 является волной (синусоидальным колебанием) удвоенной частоты по сравнению с исходными волнами (а именно 2ω), и среднее значение ее частоты уже равно не нулю (как колебаний 1 и 2), а 0,25 В. Если колебание 3 пропустить через фильтр нижних частот с граничной частотой ниже 2ω (или $2f$) (рис. 6.19 *a*), то на выходе системы остается только постоянная со-

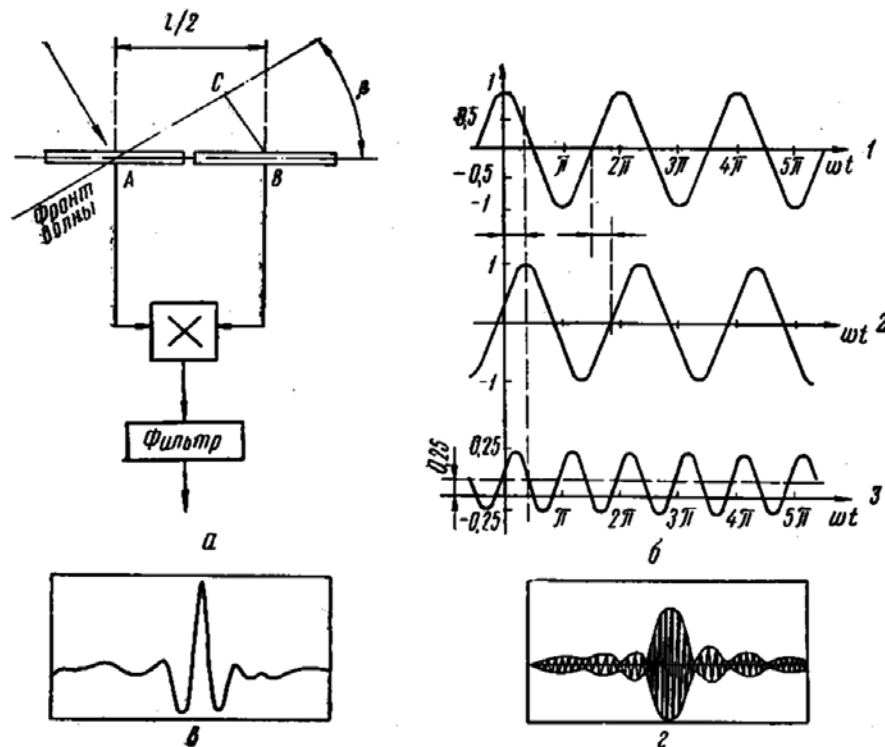


Рис. 6.19. Принцип действия мультипликативной системы (*a*); изменение напряжений в системе (*б*); характеристики направленности мультипликативной (*в*) и аддитивной (*г*) антенных систем (одинаковых) из восьми элементов [Tucker, 1967]

ставляющая, соответствующая в приведенном примере 0,25 В. Когда падающая волна приходит из других направлений, угол θ_E изменяется и, следовательно, меняется уровень постоянной составляющей. При постоянных амплитуде акустической волны и выходном напряжении секций (принято равным 1 В) уровень постоянной составляющей изменяется от 0,5 В при $\theta_E = 0$ и до 0 В, когда $\theta_E = \pi/2$ – радиан (или 90°).

График этого изменения образует характеристику направленности перемножающей или мультипликативной системы, конечно, также с учетом направленных свойств секций, в данном случае не являющихся ненаправленными точечными преобразователями (т. к. имеют конечную длину).

Выразим указанный процесс в математической форме. Если принять амплитуду акустического давления p постоянной, то напряжение U на выходе каждой половины антенны (т. е. секции) будет изменяться с изменением угла β вследствие наличия направленного действия секции. Если антенна имеет равномерную чувствительность по длине и обе ее секции идентичны, то характеристика направленности каждой половины такой линейной антенны выражается как:

$$\frac{\sin\left(\frac{\pi l}{2\lambda} \sin \beta\right)}{\frac{\pi l}{2\lambda} \sin \beta}.$$

Изменение электрического напряжения в точках А и В будет выражаться формулами:

$$U_A = U_0 \frac{\sin\left[\left(\frac{\pi l}{2\lambda}\right) \sin \beta\right]}{\frac{\pi l}{2\lambda} \sin \beta} \cos \omega t;$$

$$U_B = U_0 \frac{\sin\left[\left(\frac{\pi l}{2\lambda}\right) \sin \beta\right]}{\frac{\pi l}{2\lambda} \sin \beta} \cos(\omega t - \theta_E).$$

При перемножении получается произведение двух косинусов $\cos \omega t' \cos(\omega t - \theta_E)$, которое можно записать как:

$$1/2 \cos \theta_E + 1/2 \cos(2\omega t - \theta_E).$$

Учитывая, что составляющая удвоенной частоты отсекается фильтром нижних частот, и подставив полное выражение для θ_E из формулы (6.2), получим следующее выражение для выходного сигнала (т. е. для постоянной составляющей):

$$\frac{1}{2} U_0^2 \left\{ \frac{\sin \left[\left(\frac{\pi l}{2\lambda} \right) \sin \beta \right]}{\left(\frac{\pi l}{2\lambda} \right) \sin \beta} \right\}^2 x \cos \left[\left(\frac{\pi l}{\lambda} \right) \sin \beta \right]. \quad (6.3)$$

Формула (6.3) является математическим выражением для характеристики направленности мультипликативной антенной системы. Она представлена в виде функции $\sin \beta$ на рис. 6.19 в. Для сравнения на рис. 6.19 г изображена характеристика направленности такой же антенны длиной l , используемой обычным способом (т. е. обе секции антенны соединены). Из рис. 6.19 в, г можно видеть, что система с перемножением имеет характеристику с шириной основного лепестка, равной половине ширины главного

максимума обычной антенны. Следует также учитывать, что составляющая мультипликативной системы с удвоенной частотой менее чувствительна к направлению прихода сигнала, чем постоянная составляющая [Подводная акустика, 1965, 1970].

Таким образом, умножение можно рассматривать как способ удвоения направленности системы или, наоборот, способ получения равной направленности при меньших габаритах антенны. В данном случае имеются и другие дополнительные преимущества. В обычной (аддитивной) системе с выхода антенны снимается напряжение с частотой сигнала, которое необходимо продетектировать для подачи на конечные устройства аппаратуры, поэтому все лепестки характеристики направленности получаются одной полярности (большой частью положительной).

В мультипликативной антенне выходной сигнал является сигналом постоянного напряжения, причем основные (первые к главному) вторичные боковые лепестки характеристики направленности имеют отрицательную полярность (рис. 6.19 в). Поэтому роль сигналов, приходящих по направлениям, соответствующим этим лепесткам, может быть сведена к нулю с помощью ограничителя, включенного после умножителя и фильтра нижних частот (то же получается и при индикации на ЭЛТ с модуляцией интенсивности луча: сигналы, пришедшие из этих направлений, не будут подсвечивать экран.) Недостатком мультипликативной системы является меньшее, чем у подобной аддитивной системы, отношение сигнал/шум (примерно на 3 дБ).

В случае когерентных сигналов полезной может быть также и удвоенная частота на выходе умножителя. Если выходной сигнал удвоенной частоты продетектировать и сложить с сигналом постоянного тока, о котором шла речь выше, то отношение сигнал/шум в максимуме характеристики направленности может быть частично восстановлено и сделано равным 1,6 дБ. Если произвести не сложение, а вычитание этих сигналов, то произойдет дальнейшее сужение главного лепестка характеристики.

При использовании способа нелинейной обработки сигнала с перемножением может быть в принципе синтезировано антенное устройство всего из двух элементов с характеристикой направленности, эквивалентной характеристике произвольного числа линейно расположенных элементов с одинаковыми промежутками между ними [Бененсон, 196]. Такая техника используется при необходимости существенно уменьшить количество элементов приемной антенны (с сохранением равной направленности).

Следует учитывать, что использование мультипликативных систем наиболее целесообразно при высоких соотношениях сигнал/шум. Исследования [Urik, 1967] показали, что при малых сигналах оптимальным устройством из n элементов, обеспечивающим оптимальное соотношение сигнал/шум, является аддитивное устройство из n элементов. Если n элементов разделены на два аддитивных устройства из $n/2$ элементов (преобразователей или секций) и на выходе их находится перемножающее устройство, то коэффициент концентрации антенного устройства в некоррелированном шуме равен $10 \log(n/2)$ или на 3 дБ меньше, чем при использовании системы сложения сигналов [Urik, 1967]. Преимущества мультипликативной обработки заключаются в возможности сужения характеристик направленности и повышения угловой разрешающей способности.

В линейных антенных устройствах ширина характеристики направленности, коэффициент концентрации или усиление антенны и разрешающая способность являются связанными между собой параметрами. В мультипликативных устройствах прямого непосредственного соотношения (связи) между указанными параметрами антенны нет. Они должны рассчитываться для определенных типов умножителей и усреднителей (фильтров).

При мультипликативной обработке, например, может быть получена высокая угловая разрешающая способность в случае применения двух линейных антенных систем равной длины, располагаемых перпендикулярно одна к другой (каждая из которых имеет n элементов). Если характеристики направленности обеих линеек обозначить как

$R_1(\alpha, \varphi)$ и $R_2(\alpha, \varphi)$, что соответствует характеристике направленности плоской сплошной системы со сторонами, равными длине каждой линейки. Подобная антенна называется крестом Миллса и имеет в $n/2$ раз меньше элементов, чем эквивалентная по ширине основного лепестка и разрешающей способности указанная плоская сплошная антенна [Urik, 1967]. Узкие линейные антенны, например, легче установить на судне, чем сплошные антенны с прямоугольным раскрытием больших размеров. Повышение угловой разрешающей способности происходит за счет уменьшения коэффициента концентрации (в данном случае значительного вследствие существенно меньшего количества элементов в антенне типа креста, так как большая часть, принимаемая вне области пересечения обеих линеек, не фиксируется приемным трактом). В мультипликативных системах с многократным перемножением сигналов от n элементов можно получить и значительно большее сужение характеристики направленности антенны.

К недостаткам подобных систем, кроме ухудшения соотношения сигнал/шум (зависящего от полученного сужения характеристики направленности по сравнению с подобной аддитивной системой), относятся также нелинейные искажения, возникающие при наличии нескольких источников принимаемых сигналов, способных уменьшить получаемый выигрыш в разрешающей способности и обуславливающие зависимость ее от относительной интенсивности сигнала от цели. Влияние указанного эффекта увеличивается с ростом числа перемножений в системе [Бененсон, 1966]. Как показывают результаты применения подобных систем, в активных гидролокационных устройствах влияние указанных факторов не проявляется [Tucker, 1967].

Мультипликативная обработка использовалась, например, в рыболокаторе вертикального действия фирмы «Круп Атлас» 790 DS, предназначенном для обнаружения рыбы на больших глубинах, имеющем узкие характеристики направленности 4 и 8° с электронной стабилизацией положения их акустической оси [Schwarz, 1975; Кудрявцев, 1978]. При этом из принимаемых эхосигналов, кроме частоты, соответствующей несущей частоте излучаемых колебаний, вырабатывались сигналы различной частоты (в частности, удвоенной частоты и частоты, равной половине несущей), которые затем подвергались мультипликативной обработке [Ziese, 1976]. Перемножение полученных сигналов частоты, равной несущей при излучении, с сигналами удвоенной частоты позволяло получить характеристику направленности с большей остротой направленности основного лепестка, но с более высоким уровнем боковых лепестков. Перемножение полученных указанных сигналов с сигналами вдвое меньшей частоты позволяло получить характеристику направленности с более широким основным лепестком и с подавленными боковыми лепестками. Перемножение обоих указанных произведений приводило к характеристике с узким основным лепестком и сильно подавленными боковыми лепестками.

Важным достоинством данного метода является возможность применения его в уже существующих и эксплуатируемых рыболокаторах, имеющих многоэлементные плоские антенны.

Как и любая радиоэлектронная и гидроакустическая аппаратура технические средства рыбохозяйственной гидроакустики обычно работают в условиях воздействия различных мешающих помех. Среди них можно выделить реверберационные и так называемые шумовые помехи.

ГЛАВА 7. РЕВЕРБЕРАЦИЯ МОРЯ

Ревверберацией называется послезвучание или изменение во времени суммарного рассеянного звукового поля в точке приема после излучения акустического импульса, заключающееся в том, что после прекращения действия источника в течение определенного промежутка времени (от долей секунды до нескольких секунд) в некоторой области пространства существует постепенно убывающий по силе звук. Для целей рыбо-локации имеет значение только часть реверберации, представляющая собой обратное рассеяние звука в направлении источника от всех частиц, неоднородностей, воздушных пузырьков и неровностей в водной среде, на ее поверхности и на дне. В точке приема реверберация в общем случае проявляется в виде флуктуирующего и постепенно спадающего во времени процесса.

Хотя реверберация часто мешает работе рыболокаторной аппаратуры, в ряде случаев она может служить источником полезной информации о промысловых и других биологических объектах, например, при локации (обнаружении) разреженных рыбных скоплений, мелких промысловых объектов (криля), молоди рыб (рассеяние которыми акустической энергии нередко носит реверберационно подобный характер). Исследование и оценка последних проводятся ихтиологами для определения возможных сырьевых ресурсов на последующие годы и т. д. Характер рассеяния звука дном моря в некоторых случаях может оказывать существенную помощь при оценке характеристик грунта, неровностей дна.

В то же время указанное явление нередко оказывает существенное отрицательное влияние на работу любых средств активной гидролокации, в т. ч. и на рыболокаторную аппаратуру, особенно при горизонтальном и наклонном зондировании, когда, как правило, излучаются импульсы большой длительности. Ревверберация может маскировать принимаемый полезный эхосигнал. Если, например, при работе рыболокатора уровень реверберации к моменту прихода эхосигнала от объекта окажется выше его уров-

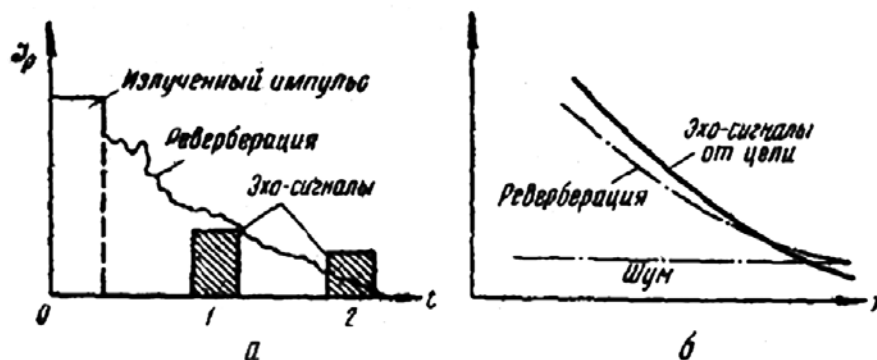


Рис. 7.1. Ревверберация:

а — кривая реверберационного процесса; б — влияние реверберационных помех на обнаружение эхосигналов.

ня (рис. 7.1 *a*), то выделение эхосигнала будет невозможно¹. И наоборот, если реверберация к моменту приема спадает настолько, что эхосигнал превышает ее, то он может быть принят и выделен. В общем случае различного типа рассеиватели — пузырьки воздуха, микроорганизмы, планктон, твердые взвешенные частицы, температурные неоднородности и т. д. — достаточно широко распределены по углу и дистанции, поэтому реверберация создает шумовой фон в течение длительного времени после излучения импульса источником. Основным отличием реверберационной помехи от шумовой является то, что она создается вследствие работы самой гидролокационной аппаратуры.

Обычно различают реверберацию объемную, донную и поверхностную. Существует и другая классификация типов реверберации: объемная реверберация, реверберация от слоя и граничная [Ольшевский, 1966]. Последняя классификация более удобна с точки зрения описания математических законов: убывания ее среднего уровня от времени, в то время как первая классификация представляется более целесообразной для физического рассмотрения и оценки при практическом использовании аппаратуры. Под объемной подразумевается реверберация, обусловленная рассеянием звука малыми частицами и другими неоднородностями в толще морской среды. Здесь основную роль играют такие рассеиватели, как газовые пузырьки, твердые взвешенные частицы, температурные неоднородности и др. Поверхностная реверберация обусловлена рассеянием звука на воздушных пузырьках приповерхностного слоя и на волнующейся морской поверхности. Опыт показывает, что в глубоком море на малых расстояниях (меньше 0,5 км) и при больших скоростях ветра преобладает поверхностная реверберация, при малых скоростях ветра — объемная. Донная реверберация вызывается рассеянием на неоднородностях морского грунта и неровностях его поверхности. При объемной реверберации рассеиватели, как правило, распределены во всем объеме, охваченном характеристиками направленности акустических антенн и излучаемыми колебаниями в водной среде.

Под реверберацией от слоя во второй классификации понимается рассеяние на неоднородностях, сосредоточенных в слое, охваченном характеристиками направленности акустических антенн, а в качестве граничной — реверберация, обусловленная рассеянием на границе раздела двух сред (вода–воздух и вода–грунт).

В общем случае реверберация является потенциальной помехой обнаружения полезного эхосигнала на всех дистанциях. Энергия эхосигнала и энергия реверберации пропорциональны энергии излученного импульса. В связи с этим, если возможность выделения полезного эхосигнала определяется уровнем его энергии по сравнению с уровнем реверберации, то обнаруживаемость эхосигнала не может быть улучшена посредством повышения излучаемой энергии.

Следует, однако, заметить, что обнаружение эхосигнала от сравнительно небольшой плотной цели — объекта (каким может быть, например, косяк рыбы) — в отличие от протяженной диффузной цели (какой является, например, разреженное скопление достаточной протяженности) зависит не столько от интенсивности эха, сколько от амплитуды давления эха (и, следовательно, от напряжения). Увеличение амплитуды излучаемого импульса будет, конечно, лишь увеличивать амплитуду реверберации и эха в той же самой пропорции, и обнаруживаемость эха не будет улучшена. Но если вместо этого уменьшать длительность импульса при постоянной амплитуде (с соответствующим расширением полосы пропускания приемного тракта и антенны), излученная энергия уменьшится, что снижает интенсивность реверберации. Интенсивность эхосигнала также уменьшается, но его амплитуда не меняется, т. к. амплитуда излучаемого импульса остается постоянной. Таким образом, обнаружение указанных целей улучшается.

В связи с изложенным следует отметить, что в условиях, ограниченных реверберацией, длительность импульса должна быть, по возможности, меньшей. Это способ-

¹ Если объект движется, то при его локации в принципе возможны частотная селекция эхосигнала и выделение его при большом уровне реверберации.

ствует также повышению разрешающей способности аппаратуры по дальности. Однако уменьшение длительности импульса вызывает необходимость дальнейшего расширения полосы пропускания, что ведет к увеличению влияния шумовой помехи и к уменьшению дальности действия системы, которая уже будет работать в условиях ограничения шумовой помехой. Это ограничивает сокращение длительности. Кроме того, сокращение длительности может ограничиваться возможностью практической реализации широкой полосы пропускания, поэтому в реальных условиях второй предел может наступить раньше, чем ограничение шумовой помехой. Кроме того, реверберационно подобный характер многих реальных рыбных скоплений часто приводит к снижению уровня принимаемых эх при значительном уменьшении длительности излучаемых импульсов. На больших дистанциях имеет место большее потенциальное воздействие реверберационной помехи при прочих равных условиях. Это объясняется тем, что с увеличением расстояния увеличивается ширина пространства, охватываемая характеристикой направленности локационного устройства. В результате реальный объект локации ограниченного размера будет занимать все меньшую часть ширины диаграммы при увеличении дистанции. Рассеяние же звука в общем случае происходит во всем объеме воды, охватываемом излученным импульсом, или, во всяком случае, в большей его части. Следовательно, уровень реверберации с расстоянием будет убывать медленнее, чем уровень эхосигнала (рис. 7.1 б).

Рассеиватели можно разделить на две основные группы: с непрерывной функцией степени изменения неоднородности (флуктуации температуры и скорости звука) и с дискретной функцией – скачкообразным изменением акустических свойств среды (упругости, плотности и т. д.) в результате наличия пузырьков воздуха, твердых взвешенных частиц, живых организмов и др.

Поле, рассеянное в толще вод океана в направлении излучателя, создается в основном дискретными препятствиями, являющимися сильными рассеивателями. Именно это поле и оказывает основное влияние на работу гидроакустической эхолокационной аппаратуры. Рассеяние звука на множестве дискретных неоднородностей среды может привести к потере отражения от лоцируемого объекта на фоне совокупности рассеянных сигналов. Однако в связи с тем, что реверберационный сигнал всегда содержит некоторую информацию о неоднородностях морской среды, вызывающих рассеяние акустических волн, он может быть использован для исследования, оценки и анализа характеристик рыбных скоплений, т. к. в целом ряде случаев рыбы в воде служат источниками реверберационно подобных сигналов. Основное соотношение, которым характеризуется реверберация, носит название силы рассеяния (или силы реверберации), SL , которую можно определить аналогично силе цели. Сила объемной реверберации (в дБ) – это отношение интенсивности реверберации I_2 звука, рассеянного единицей объема в направлении источника на единице дистанции от центра единичного объема воды, к интенсивности падающей плоской волны I_1 , и может быть записана как $10 \log I_2/I_1$. За единицу дистанции обычно берется 1 м. Сила объемной реверберации составляет $-80 \div -100$ дБ. Это небольшие величины в сравнении с большинством сил целей и поэтому можно считать, что чисто объемная реверберация, как правило, не может серьезно влиять на работу аппаратуры. Даже глубоководный рассеивающий слой относительно плотного планктона, считающийся источником объемной реверберации, имеет силу лишь $-60 \div -70$ дБ.

Количественной мерой способности среды рассеивать акустические волны в обратном направлении также является коэффициент обратного объемного рассеяния m_v , равный отношению средней по многим реализациям мощности \bar{P} , рассеиваемой объемом V в обратном направлении (отнесенной к единице телесного угла), при облучении этого объема акустической волной с интенсивностью I_0

$$m_v = \frac{\bar{P}}{I_0 V}.$$

Перейдем теперь к поверхностной реверберации. Морская поверхность является границей раздела, на которой плотность ρ и скорость звука c изменяются скачкообразно. Этот скачок настолько велик, что вся энергия акустической волны, падающей снизу на поверхность, возвращается в воду.

Поверхность моря является как отражателем, так и рассеивателем звука и играет большую роль в подводной акустике, когда источник или приемник звука находятся на небольшой глубине (что практически всегда имеет место в рыболокации). Если бы поверхность моря была совершенно гладкой, она представляла бы идеальный отражатель звука, потому что граница вода-воздух является практически акустически мягкой. Отражение акустических волн от гладкой поверхности происходило бы зеркально и без потерь. Но даже и в этом случае звуковая картина оказалась бы не столь простой, как это может показаться, т. к. при распространении звуковой волны вдоль поверхности моря звуковое поле будет представлять собой результат суперпозиции прямой и отраженных волн. Прямая и отраженная от поверхности волны, суперпонируя, могут то ослаблять, то усиливать акустическое поле. Это явление получило название зеркального эффекта Ллойда (рис. 7.2).

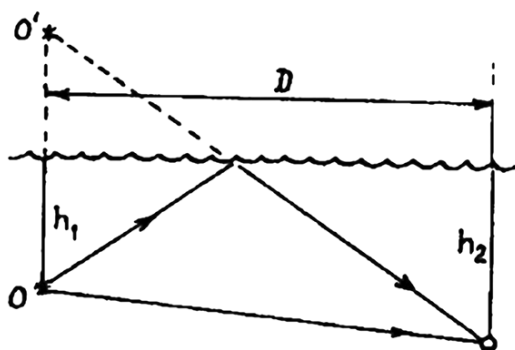


Рис. 7.2. Прямой и отраженный от поверхности моря лучи в точке суперпозиции:

O – положение источника, O' – мнимый источник

Отдельные отраженные волны, суммируясь в соответствии с принципом суперпозиции, образуют в точке наблюдения результирующее акустическое поле, характер которого (величина и пространственное распределение звукового давления) будет зависеть прежде всего от разностей фаз элементарных отраженных волн, одновременно достигающих рассматриваемой точки. Найдем набег фазы $\Delta\varphi$ по лучу относительно некоторой средней плоскости. Как видно из рис. 7.3, разность хода волн по направлению отражения составляет $2\Delta h \cos\theta_i$. Если умножим эту разность хода на волновое число k , то получим разность фаз волн $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = 2\Delta h k \cos\theta_i = 4\pi(\Delta h/\lambda)\cos\theta_i,$$

где Δh – высота неровностей; λ – длина волны; θ_i – угол падения (скольжения падающей акустической волны).

Набег фаз волны, обусловленный неровностями поверхности, в теории рассеяния принято называть параметром Рэлея (Rel), который служит критерием неровности или ровности. Так что имеем:

$$\text{Rel} = 4\pi(\Delta h/\lambda)\cos\theta_i.$$

При $\text{Rel} < 1$ поверхность моря можно считать гладкой, зеркально отражающей звук. При $\text{Rel} > 1$ поверхность моря рассеивает акустическую волну во все стороны (некогерентное рассеяние). При промежуточных значениях Rel имеет место частично зеркаль-

Правда, эффект Ллойда в реальности проявляется не столь явно, поскольку поверхность моря на практике не бывает настолько гладкой, чтобы он был максимальным. Волнение моря, нарушающее зеркальную картину отражения, в значительной степени маскирует эффект Ллойда, но зато приводит к рассеянию распространяющейся волны в водное пространство под поверхностью воды. В рассеянии звука неровной поверхностью важную роль играет соотношение между длиной акустической волны и размерами неровностей. Падающая волна отражается от каждой точки неровной поверхности по законам геометрической оптики – угол отражения равен углу падения. Отдельные отражен-

ное отражение и частично рассеяние акустической волны. В последнем случае в какой-то мере возможно проявление и эффекта Ллойда.

Переизлучаемое неровной поверхностью воды поле в общем случае состоит из двух компонент – регулярной, подчиняющейся законам геометрической оптики, соответствующей плоской границе двух сред и формирующей отраженную акустическую волну (вблизи зеркального направления), и случайной, образующей рассеянное акустическое поле, направления которого в общем случае охватывают всю нижнюю полусферу. Соотношение регулярной и случайной компонент переизлученного поля зависит от степени неровности поверхности моря. Для количественной оценки рассеяния звука поверхностью моря обратно в сторону точки излучения используют понятие коэффициента обратного поверхностного рассеяния m_s :

$$m_s = \frac{\bar{P}'}{I_0 S},$$

где I_0 – интенсивность звука в падающей волне на неровную поверхность S ; \bar{P}' – средняя мощность, рассеиваемая участком S в направлении к точке излучения и рассчитываемая на единицу телесного угла.

Величина m_s зависит от угла скольжения (угла между поверхностью и направлением излучения). Иногда вместо m_s используют сечение обратного рассеяния участка поверхности $\sigma_s = m_s S = \bar{P}'/I_0$. Совокупность значений общего коэффициента поверхностного рассеяния по направлениям нижней полусферы, взятых при фиксированном значении направления падающей волны, т. е. при угле скольжения = const, называется индикатрисой рассеяния поверхности.

С учетом практической неразделимости влияний поверхности и приповерхностного слоя на рассеянное поле введено понятие эффективного коэффициента обратного приповерхностного рассеяния $M_{\text{эфф}}$, объединяющего влияние обоих эффектов [Андреева, 1974]. $M_{\text{эфф}}$ изменяется в широких пределах в зависимости от частоты колебаний, угла скольжения и скорости ветра (т. е. волнения).

Критерий ровности поверхности моря гласит, что поверхность может считаться акустически ровной, если разность хода между лучами, падающими под углом χ , отраженными от верхней и нижней границ поверхностных нерегулярностей, меньше $1/4\lambda$, что выражается формулой:

$$\lambda > 8h \sin \chi,$$

где h – высота неровностей.

Когда характеристика направленности гидроакустического прибора захватывает некоторую часть морского грунта, к общему полю помех на входе аппаратуры добавляется также реверберационная помеха от дна.

Дно моря подобно морской поверхности является эффективным отражателем и рассеивателем звука, но имеет более сложные характеристики и фактически выступает как перераспределитель части звуковой энергии, падающей на него.

При падении звукового поля на дно моря в общем случае происходит частичное отражение по законам геометрической акустики (зеркальное отражение) и частичное рассеяние (диффузное отражение) в водное полупространство над дном, частичное проникновение внутрь грунта, сопровождаемое потерями на затухание в грунте, рассеяние на неоднородностях внутри грунта и выход этого рассеяния в водную среду (рис. 7.4).

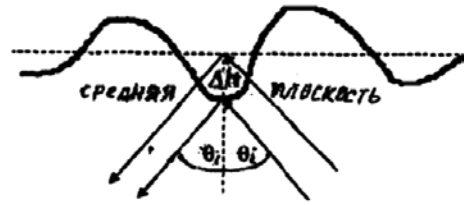


Рис. 7.3. К нахождению параметра Рэлея



Рис. 7.4. Отражение, рассеяние и поглощение акустических колебаний морским дном

Таким образом, акустическое поле над дном представляет собой довольно сложный комплекс зеркально отраженной, рассеянной и вышедшей из грунта компонент. В зависимости от рельефа дна и типа грунта в суммарном поле может преобладать та или иная компонента, но чаще всего исследователи связывают это результирующее звуковое поле с рассеянием падающей на неровностях рельефа дна.

При падении звукового поля на дно моря в отличие от падения его на поверхность воды только часть акустической энергии, отраженной и рассеянной, возвращается обратно в воду; значительная часть ее в общем случае поглощается толщей пород грунта. Суммарная энергия акустических волн, переизлученная дном обратно в водную среду, всегда меньше энергии первичной волны, падающей на нее. Как и в случае падения на поверхность моря, акустическое поле, переизлучаемое дном в воду, можно разделить на две части, различающиеся как по своим свойствам, так и по направлениям распространения лучей. Первая из них образуется колебаниями, распространяющимися примерно в направлении зеркального отражения, а вторая – рассеянными волнами, распространяющимися в общем случае в пределах всей верхней полусферы. Одной из основных характеристик рассеянного поля является индикатриса рассеяния (рис. 7.5 а) – среднее

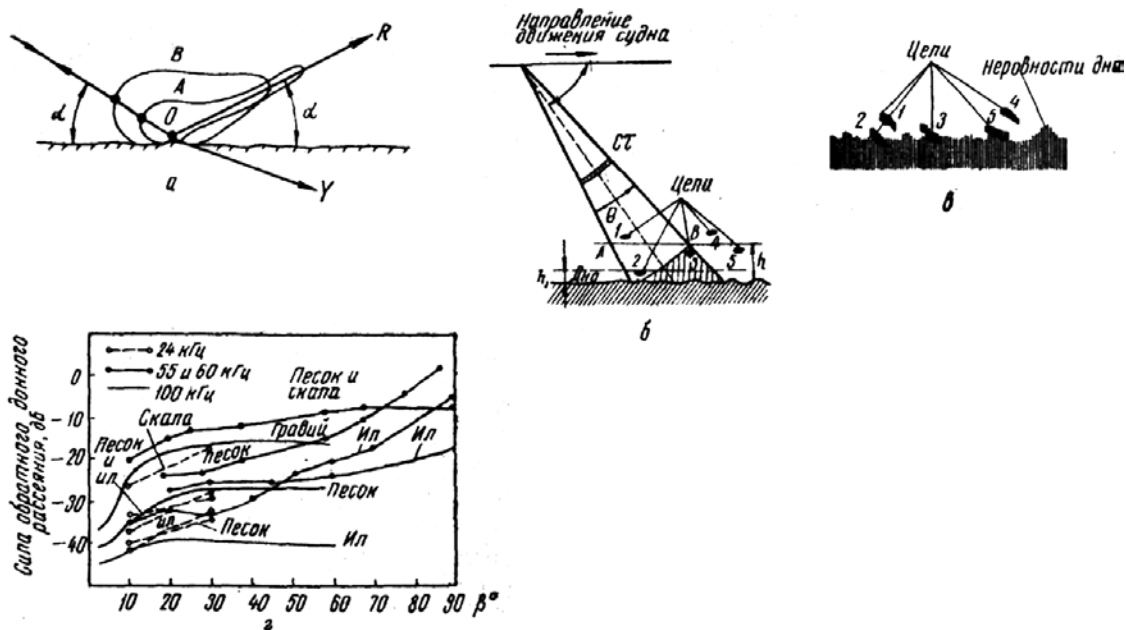


Рис. 7.5. Донная реверберация:

a – индикатриса донного рассеяния; *б* – влияние донного рассеяния на обнаруживаемость объектов; *в* – отображения эха от объектов у дна и на дне (1, 2, 3, 4 – цели); *г* – изменение силы обратного рассеяния от дна, от угла скольжения для разных грунтов

по многим реализациям угловое распределение рассеиваемой дном энергии акустического поля, а также коэффициент донного и обратного донного рассеяния (сила обратного рассеяния).

Радиус характеристик, приведенных на рис. 7.5 *a*, в любом направлении пропорционален интенсивности звука, рассеянного или отраженного, в соответствующем направлении. Диаграмма направленности (индикатриса *A*) может характеризовать достаточно ровное отражающее дно, а индикатриса *B* – неровное рассеивающее дно, для которого интенсивность в зеркальном направлении *OR* уменьшается и соответственно увеличивается в других направлениях.

В связи с тем, что дно моря обычно достаточно неровное и его неровности практически при любом применении рыболокационной аппаратуры в лучшем случае сравнимы, а в основном больше длин волн гидролокаторов, количество рассеиваемой акустической энергии в обратном направлении весьма значительное. В той области характеристики направленности (рис. 7.5 *б*), в которой излученный импульс не достигает дна в любой части его поперечного сечения, донная реверберация не воздействует на обнаруживаемость цели (объекта). Но в остальной части его диаграммы (заштрихованной) (рис. 7.5 *б*) объект может быть обнаружен только тогда, когда эхосигнал от него превышает уровень обратного рассеяния от дна в точке приема (рис. 7.5 *в*). Это обстоятельство оказывает большое влияние на работу рыболокаторов наклонного действия, предназначенных для поиска и локации придонных объектов лова.

Рассеивающие свойства дна характеризуются также силой донной реверберации, определяемой как отношение интенсивности рассеянного звука I_2 на единице дистанции от единицы донной поверхности к падающей интенсивности I_1 , т. е. $10 \log I_2/I_1$ (в дБ). Интенсивность реверберации в этом случае сильно зависит от угла падения (или скольжения) акустической волны (при увеличении этого угла она бывает гораздо большей, чем при распространении звука почти параллельно поверхности дна), а также от степени ровности дна, и в связи с этим от частоты падающих колебаний (так как ровность дна определяется соотношениями высот неровностей и длины волны, как и в случае поверхностной реверберации). Например, если дно покрыто галькой, то для низкочастотных колебаний (с большей длиной волны) оно может считаться гладким, в то время как для высокочастотных – акустически неровным. При работе судна над скалистыми грунтами донная реверберация имеет большую величину, чем при работе над илистым дном. На рис. 7.2 *з* [Urik, 1967] приведены типичные результаты большого числа экспериментальных измерений силы обратной донной реверберации в зависимости от угла скольжения до нормального падения на различных частотах (в частотном диапазоне, представляющем интерес для рыболокации). Донная реверберация потенциально является намного более серьезной помехой, чем поверхностная и, тем более объемная.

Серьезное отрицательное воздействие на эффективность работы рыболокационной аппаратуры горизонтально-вертикального действия могут оказывать отражения от дна моря, особенно при работе на сравнительно небольших глубинах, связанные с боковым излучением и приемом (от боковых лепестков).

ГЛАВА 8. ШУМОВЫЕ ПОМЕХИ

Кроме реверберационных помех, большое влияние на эффективность работы аппаратуры рыбохозяйственной гидроакустики могут оказывать так называемые шумовые помехи, существующие независимо от работы самой аппаратуры, т. е. присутствующие и в то время, когда она не работает (шумовыми помехами принято считать помехи, не связанные с работой аппаратуры). В общем случае шумовые помехи подразделяются на помехи электрического и акустического характера. Первые могут быть внутренними (или собственными) и внешними. Внутренние шумы и помехи возникают в электронных устройствах аппаратуры в результате флуктуаций тока (в проводниках, электронных элементах), наводок и взаимных влияний между узлами и блоками. В правильно спроектированной аппаратуре собственные помехи оказывают весьма незначительное влияние на работу системы по сравнению с другими помехами. Внешние помехи создаются различными электрическими и радиотехническими установками и приборами, обладающими способностью к электромагнитным излучениям (судовыми коллекторными электродвигателями, вращающимися преобразователями, электросварочными агрегатами и др.). Указанные помехи сравнительно легко сводятся к минимуму улучшением качества монтажа аппаратуры (особенно при прокладке кабелей, заземлении), повышением надежности контактов в цепях, тщательной экранировкой входных цепей, применением независимых источников питания, фильтрации и т. д.

Под гидроакустическими шумовыми помехами (помехами акустического характера) подразумеваются акустические колебания, воздействующие на приемник звука. На их фоне происходит прием акустических сигналов. Эти помехи не связаны с излучением самой аппаратуры. Они могут быть подразделены на шумы моря, помехи, создаваемые живыми организмами моря и носителями гидроакустической аппаратуры (шумы судов). К отдельной подгруппе можно также отнести помехи, создаваемые другой гидроакустической аппаратурой судна и гидроакустическими системами соседних судов, особенно при нахождении значительного количества промысловых судов в районе лова.

Шумы моря в общем случае вносят небольшой вклад в общее шумовое акустическое поле, существующее в районе приемной антенны судовой гидроакустической аппаратуры, так же как и помехи, создаваемые морскими животными и другими живыми организмами. Иногда сильные помехи в работе рыбопоисковых гидролокаторов могут создавать дельфины, находящиеся в районе судна. Спектр звуков дельфинов очень широк, поэтому эти звуки воспринимаются практически любыми гидролокаторами. Уровень шума моря определяется как его интенсивность (в децибелах), измеренная ненаправленным гидрофоном и отнесенная к интенсивности плоской волны, имеющей среднеквадратичное значение давления в 0,1 Па. Хотя он измеряется в различных частотных полосах, полученные уровни всегда приводятся к полосе 1 Гц и тогда они называются спектральными уровнями окружающего шума моря. Спектральный уровень окружающего шума моря на частотах рыболокаторной аппаратуры (в диапазоне 10–200 кГц) составляет от –60 до –70 дБ относительно 0,1 Па. Для «белого» шума или для любого непрерывного шумового спектра, если полоса частот, в которой производится

оценка, не слишком широкая (что справедливо для рыболокационных приборов), уровень шума T' в некоторой полосе Δf определяется как:

$$T' = CT' + 10 \log \Delta f,$$

где CT' – спектральный уровень; Δf – ширина полосы, Гц.

Основное мешающее воздействие, конечно, оказывает шум судна-носителя, имеющий сложную спектральную структуру; наряду с широкополосным непрерывным спектром выделяются также значительные уровни линейных резонансных колебаний. Вредное влияние шумов судна на работу рыболокационной аппаратуры усугубляется тенденцией к увеличению мощностей главных двигателей и других судовых механизмов (даже на небольших промысловых судах), количества механизмов и устройств, размещению машинных отделений в средней части и даже в первой половине судна в связи с необходимостью улучшения технологического цикла добычи и обработки рыбы [Кудрявцев, Щербино, 1974]. Общий шумовой фон судна обычно подразделяется на три основные группы шумов в зависимости от их источников: шумы, создаваемые двигателями и механизмами; шумы, создаваемые гребным винтом; шумы гидродинамического характера или шумы обтекания.

На рис. 8.1 показано судно и пути, по которым шумы, создаваемые гребным винтом и механизмами в машинном отделении, могут достигать антенн гидроакустической аппаратуры. Путь А – это распространение шумов через корпусные конструкции судна. Шумы могут переизлучаться через корпус в воду и непосредственно попадать на антенну или вызывать вибрацию стенок обтекателя и элементов крепления антенны. Пути В, С и D – распространение шумов гребного винта непосредственно через воду к антенне вследствие обратного рассеяния неоднородностями водной среды и отражения или рассеяния дном моря, имеющим, по-видимому, наибольший удельный вес в шумовом поле вблизи антенны при работе судна в мелководных районах.

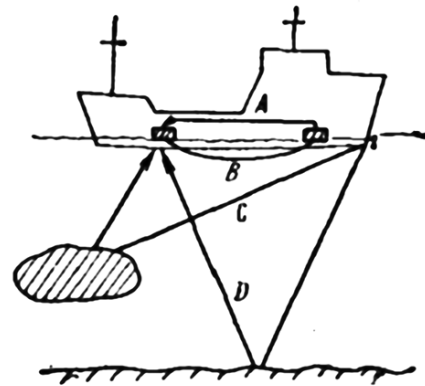


Рис. 8.1. Шумы, воздействующие на работу средств рыбохозяйственной гидроакустики

Первая группа шумов вызывается механическими вибрациями главных двигателей, генераторов, редукторов, насосов и т. д. Шум гребного винта создается вне корпуса судна и в основном передается к антеннам гидроакустической аппаратуры через воду. В ряде случаев (в зависимости от формы корпуса судна) его влияние на работу приборов может в большей или меньшей степени ослабляться экранированием корпуса судна. При установке гребных винтов регулируемого шага в насадке общий уровень шума вдоль корпуса судна еще более увеличивается (и значительно) вследствие появления направленности излучения винта. Гидродинамические шумы образуются в результате флюктуационного обтекания водой корпуса судна, а также обтекателей акустических антенн гидроакустической аппаратуры. Кроме того, турбулентный азрированный слой воды вдоль корпуса судна часто является как бы «отражающим» экраном как ослабляющим ультразвуковую энергию, передаваемую в воду от рыболокационного прибора, так и ухудшающим условия приема отраженных гидроакустических сигналов.

На средних и больших скоростях хода судна в частотном диапазоне, используемом в гидроакустических рыбопоисковых приборах активной локации, шум винта преобладает над другими видами собственных шумов [Urik, 1967; Орлов, Шабров, 1974; Кудрявцев В.И., 1978, 1979; Болгов и др., 1984; Кудрявцев Н.Н., 2000]. Для обеспечения сопоставимости результатов измерения различными техническими средствами ис-

пользуется понятие эквивалентного уровня или приведенного звукового давления помех [Болгов и др., 1984; Евтюхов, Митько, 1988]. Приведенное звуковое давление шумовой помехи соответствует величине звукового давления на частоте 1 кГц в полосе 1 Гц, которую можно было бы получить в изотропном шумовом поле при применении ненаправленного гидрофона. При этом предполагается, что спад шумового спектра на частотах свыше 1 кГц составляет 6 дБ на октаву [Болгов и др., 1984; Евтюхов, Митько, 1988]. По заданному приведенному звуковому давлению помехи расчет величины звукового давления акустических шумов, воздействующих на антенну (с учетом полосы пропускания приемного тракта), выполняется в соответствии со следующим выражением [Болгов и др., 1984; Евтюхов, Митько, 1988]:

$$P_{\text{шс}} = P_{\text{шэ}} = \frac{F_{\text{э}}}{F_{\text{р}}} \sqrt{\frac{\Delta f \cdot \gamma_{\text{э}}}{\Delta f_{\text{э}} \cdot \gamma_{\text{п}}}}, \quad (8.1)$$

где $P_{\text{шэ}}$ — приведенное звуковое давление шумовой помехи; $F_{\text{э}}$ — эталонная частота (принимаемая равной 1 кГц); $F_{\text{р}}$ — резонансная частота приемного тракта, кГц; Δf — полоса пропускания при емного тракта, Гц; $\Delta f_{\text{э}}$ — эталонная полоса частот, Гц; $\gamma_{\text{э}}$ — коэффициент осевой концентрации ненаправленного гидрофона (принимается равным 1); $\gamma_{\text{п}}$ — коэффициент осевой концентрации антенны в режиме приема.

Так как параметры $F_{\text{э}}$, $\Delta f_{\text{э}}$, $\gamma_{\text{э}}$ имеют единичные значения, то при практическом использовании формула (8.1) применяется без записи этих параметров.

Считается, что результирующий уровень звукового давления помех, создаваемый движущимся судном, примерно пропорционален третьей степени скорости судна. В этом случае расчет акустического давления шумов судна $P_{\text{шс}}$ следует производить в соответствии со следующим выражением (параметры $F_{\text{э}}$, $\Delta f_{\text{э}}$, $\gamma_{\text{э}}$ для упрощения опущены):

$$P_{\text{шс}} = \frac{P_{\text{шэ}}}{F_{\text{р}}} \sqrt{\frac{\Delta f}{\gamma_{\text{п}}}} \cdot \left(\frac{v_{\text{с}}}{v_{\text{э}}} \right)^3, \quad (8.2)$$

где $v_{\text{с}}$ — текущая скорость судна; $v_{\text{э}}$ — скорость, на которой была измерена $P_{\text{шэ}}$.

Работы по уменьшению вредного воздействия акустических шумов и помех судна на эффективность его средств гидроакустики проводятся по следующим четырем основным направлениям: обесшумливание источника звука, его изоляция, предотвращение попадания шумов на акустические системы и на выходные устройства приборов.

Воздушно-пузырьковые слои могут быть весьма эффективным средством снижения влияния шумов гребного винта и вибраций двигателей, излучаемых в воду, на работу гидроакустической аппаратуры. Для создания пузырьковых завес, окутывающих гребной винт и район корпуса судна в месте установки главных двигателей [Кузнецов, 1974], применяются специальные устройства. Слой воздуха необходим для изоляции винта и колеблющейся обшивки корпуса судна в этом месте от окружающей воды, в которую происходит излучение.

Эффективным средством снижения помех на антеннах гидроакустических приборов является установка звукопрозрачных стационарных обтекателей акустических антенн со специальными воздушными коффердами в кормовой части и звукопоглощающими заполнителями кормовой оконечности обтекателя, выдвижение антенн с помощью ПВУ и ПОУ.

Так как в конечном итоге мешающее воздействие шумов судна на работу аппаратуры проявляется на выходных устройствах приборов, то снижение их влияния может быть достигнуто также путем введения соответствующих схемных решений, уменьшающих уровень помех на выходе аппаратуры, а также повышающих ее помехоустойчивость. К ним, например, относятся: сужение полосы пропускания приемно-усилительного тракта, повышение коэффициента прямоугольности его частотной характеристики, снижение уровня боковых лепестков.

Большое внимание в международной практике уделяется снижению уровня судовых шумов и помех на научно-исследовательских рыболовных судах. Согласно Рекомендациям ИКЕС [Mitson, 1995] НИС, используемые для промысловых исследований, должны на скорости до 11 узлов иметь уровень шумов, который позволяет не нарушать естественной состояние и поведение рыбных скоплений на расстоянии 20 м от судна, в соответствии со следующей шумовой характеристикой в границах: от 1 Гц до 1 кГц не более $(135 - 1,66 \log f_{\text{Гц}})$ дБ; в границах от 1 до 100 кГц не более $(130 - 22 \log f_{\text{кГц}})$ дБ.

Достаточно подробно эти вопросы освещены в обзоре Левашова [2008].

ГЛАВА 9. УРАВНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

В работе [Urik, 1967] приведены уравнения гидроакустической локационной аппаратуры, связывающие ее основные характеристики и параметры. Первой задачей любой гидроакустической локационной системы является обнаружение объектов. Для оценки характеристик и возможностей локационной аппаратуры в части обнаружения объектов удобно пользоваться так называемыми уравнениями гидролокатора. Эти уравнения представляют собой соотношения, объединяющие параметры среды, объекта-цели и приборов и служат основой для оценки, расчета и сравнения конкретных типов локационных систем в части выполнения ими поставленных задач. Основой для построения уравнений любой гидролокационной аппаратуры является обеспечение равенства или определенного заданного соотношения между полезной частью акустического поля в точке приема (сигналом) и элементами поля, затрудняющими выделение и распознавание сигнала (помехи или фон) [Хортон, 1961]. В реальных условиях сигнал всегда сопровождается различного вида помехами, которые, как уже указывалось, можно разделить на шумовые и реверберационные.

То же самое относится и к рыболокационной аппаратуре. Целью ее проекта является повышение чувствительности системы к сигналу и уменьшение срабатывания устройства на помехи, т. е. увеличение соотношения сигнал/помеха. От аппаратуры может требоваться обеспечение различного соотношения сигнал/помеха, но если сигнал

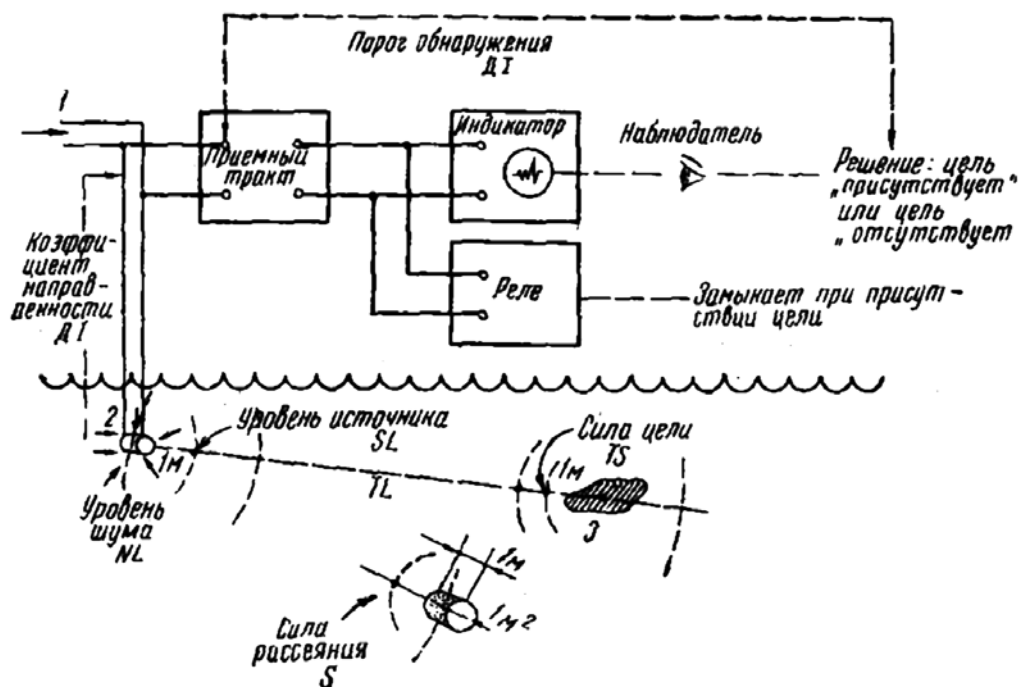


Рис. 9.1. Схема определения параметров уравнения рыболокатора

медленно увеличивается на фоне помех, то желаемая цель обнаружения объекта может быть достигнута тогда, когда уровень сигнала становится равным уровню маскирующих его помех (маскирующая помеха – это та часть общего фона помех, которая лежит в частотной полосе сигнала или приемного тракта системы).

Рассмотрим для примера некоторую активную эхолокационную систему (рис. 9.1). Источник 1 через акустический преобразователь 2 (служащий одновременно и приемником звука) создает в среде акустические колебания, которые могут быть охарактеризованы некоторой интенсивностью на единице дистанции от преобразователя (например, на расстоянии 1 м). Эта интенсивность, выраженная в децибелах на 1 м от преобразователя, носит название уровня источника SL. Когда излученная волна достигает цели 3 (если ось источника направлена на цель), ее уровень будет уменьшен из-за потерь в среде при передаче TL и становится равным $SL - TL$. После отражения или рассеяния объектом с силой цели TS отраженный или рассеянный уровень энергии будет равен $SL - TL + TS$ на принятом стандартном расстоянии 1 м от акустического центра цели в направлении источника звука. При распространении энергии обратно к источнику уровень звука вновь ослабляется вследствие потерь в среде при обратной передаче и становится равным $SL - 2TL + TS$.

Эта величина является уровнем эхосигнала у приемного преобразователя (антенны) EL. Для упрощения предположим, что помеха является изотропной и обозначим ее NL. Тогда ее уровень будет уменьшен благодаря направленности приемного преобразователя, и относительный уровень шума на его зажимах будет определяться как $NL - DI$ (DI – коэффициент направленности антенны). Ось акустической антенны направлена на объект, поэтому коэффициент ее направленности не влияет на уровень эхосигнала. На зажимах преобразователя следовательно будем иметь следующее соотношение сигнал/помеха $SL - 2TL + TS - (NL - DI)$.

Пусть задачей аппаратуры является обнаружение объекта, т. е. на индикаторах системы должна быть воспроизведена определенная отметка, указывающая на присутствие цели. Решение о наличии цели, дающей эхосигнал, может быть сделано оператором или каким-либо пороговым устройством только в том случае, если соотношение сигнал/помеха превышает порог обнаружения DT, характеризующий некоторый вероятностный критерий обнаружения. Когда соотношение сигнал/помеха меньше порога обнаружения, решение будет принято, что цель отсутствует. Минимальное соотношение этих величин, при котором цель – объект считается обнаруживаемым, принимается обычно при их равенстве, т. е.

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) = DT.$$

Несколько более удобной формой записи этого уравнения будет следующая:

$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT. \quad (9.1)$$

Параметры, относящиеся к цели, находятся в левой части уравнения, а параметры, связанные с помехами, – в правой.

В некоторых современных системах разделение DI и DT практически оказывается невозможным. В этих случаях более удобным является непосредственный учет их совместного воздействия, т. е. $DI - DT$, определяющий изменения в соотношении сигнал/помеха, создаваемые с помощью всего приемного тракта с антенной, индикаторных устройств и оператора. Некоторая модификация также требуется, если система ограничивается не шумовыми, а реверберационными помехами. В этом случае DI, принятый для изотропного шума-помехи, уже не может быть применен, т. к. реверберация не является изотропной помехой, и направленность системы не приводит к уменьшению ее влияния. Параметр $NL - DI$ в этом случае заменяется уровнем реверберации RL эквивалентной плоской волны, наблюдаемой на зажимах преобразователя, и уравнение активной гидролокационной системы будет иметь вид:

$$SL - 2TL + TS = RL + DT. \quad (9.2)$$

Для пассивной гидролокационной системы, когда сам объект является источником сигнала, благодаря которому он и обнаруживается, параметр уровня источника SL относится к уровню создаваемого объектом звука на стандартном расстоянии 1 м от него. Параметр силы цели здесь отсутствует и потери при передаче имеют место только в одну сторону. Тогда уравнение локатора пассивного действия приобретает следующий вид: $SL - TL = NL - DI + DT$.

В указанных уравнениях имеются параметры, определяемые аппаратурой: SL , DI , DT (к ним может быть отнесен также и уровень собственных шумов аппаратуры), средой: TL , RL , NL и объектами: TS , SL (SL для пассивной системы – уровень источника-цели).

На практике используются иногда следующие отдельные наименования для различных комбинаций параметров в приведенных уравнениях: выражение $SL - 2TL + TS$, называемое уровнем эхосигнала и представляющее собой интенсивность эхосигнала, измеренную в воде у приемной антенны; $NL - DI + DT$ – уровнем маскирующего шума (помехи) или минимальным обнаруживаемым уровнем эхосигнала, $RL + DT$ – уровнем маскирующей реверберации; $SL - 2TL + TS - (NL - DI + DT)$ – уровнем превышения эхосигнала. Нулевое превышение соответствует минимальному обнаруживаемому уровню эхосигнала. Ниже приведены определения параметров, входящих в уравнения гидролокатора [Urik, 1967]:

Уровень источника SL

$$SL = 10 \log \frac{\text{интенсивность звука на расстоянии 1 м от источника вдоль его акустической оси}}{\text{эталонная интенсивность плоской волны среднеквадратичного значения давления в 0,1 Па}}$$

Потери при передаче TL

$$TL = 10 \log \frac{\text{интенсивность сигнала на расстоянии 1 м от источника}}{\text{интенсивность сигнала у цели или приемника}}$$

Сила цели TS

$$TS = 10 \log \frac{\text{интенсивность эха на расстоянии 1 м от цели}}{\text{интенсивность падающего звука}}$$

Уровень шума (помех) NL

$$NL = 10 \log \frac{\text{интенсивность помех в месте расположения приемника}}{\text{эталонная интенсивность}}$$

Коэффициент направленности при приеме DI

$$DI = 10 \log \frac{\text{уровень шума, получаемый на зажимах эквивалентного направленного гидрофона (эквивалентного чувствительности)}}{\text{уровень шума, получаемый на зажимах фактического гидрофона-приемника (антенны)}}$$

Уровень реверберации RL

$$RL = 10 \log \frac{\text{уровень реверберации на зажимах гидрофона}}{\text{уровень, создаваемый на зажимах гидрофона сигналом эталонной интенсивности}}$$

Коэффициент направленности при передаче DI_n

$$DI_n = 10 \log \frac{I_{\text{напр.}}}{I_{\text{ненапр.}}}$$

Порог обнаружения DT

$$DT = \frac{\text{сила сигнала, необходимая для выполнения задачи аппаратурой, на зажимах гидрофона}}{\text{мощность (сила) шума на зажимах гидрофона}}$$

Потери при передаче TL

$$TL = 10 \log \frac{\text{интенсивность сигнала на расстоянии 1 м от источника}}{\text{интенсивность сигнала у цели или приемника}}$$

Сила цели TS

$$TS = 10 \log \frac{\text{интенсивность эха на расстоянии 1 м от цели}}{\text{интенсивность падающего звука}}$$

Уровень шума (помех) NL

$$NL = 10 \log \frac{\text{интенсивность помех в месте расположения приемника}}{\text{эталонная интенсивность}}$$

Коэффициент направленности при приеме DI

$$DI = 10 \log \frac{\text{уровень шума, получаемый на зажимах эквивалентного направленного гидрофона (эквивалентного чувствительности)}}{\text{уровень шума, получаемый на зажимах фактического гидрофона-приемника (антенны)}}$$

Уровень реверберации RL

$$RL = 10 \log \frac{\text{уровень реверберации на зажимах гидрофона}}{\text{уровень, создаваемый на зажимах гидрофона сигналом эталонной интенсивности}}$$

Коэффициент направленности при передаче DI_{Π}

$$DI_{\Pi} = 10 \log \frac{I_{\text{напр.}}}{I_{\text{ненапр.}}}$$

Порог обнаружения DT

$$DT = \frac{\text{сила сигнала, необходимая для выполнения задачи аппаратурой, на зажимах гидрофона}}{\text{мощность (сила) шума на зажимах гидрофона}}$$

В уравнениях гидроакустической локационной системы параметр «уровень источника» определяет величину акустической энергии, излучаемой антенной. Найдем соотношение между уровнем источника-излучателя и излучаемой им акустической мощностью, а также его коэффициентом направленности (осевой концентрации). Пусть ненаправленный излучатель находится в однородной непоглощающей среде, и интенсивность звука, создаваемая им в некоторой точке на достаточно большом расстоянии r , равна I_r . Тогда интенсивность связана со среднеквадратичным значением давления p_r (в 0,1 Па) известным выражением для плоской волны [Тюлин и др, 1966; Тюрин и др. 1966]:

$$I_r = \frac{p_r^2}{\rho c} 10^{-7} \text{ Вт/см}^2.$$

При $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ и $c = 1,5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ $I_r = p_r^2 \times 2/3 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^2 = p_r^2 \times 2/3 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$.

Для ненаправленного источника эта интенсивность соответствует излученной мощности (Вт):

$$P_r = 4\pi r^2 I_r = 83,7 \times 10^{-9} p_r^2.$$

На дистанции 1 м

$$P = 83,7 \times 10^{-9} p_1^2,$$

где p_1 – среднеквадратичное значение давления на расстоянии 1 м (в 0,1 Па).

Логарифмируя последнее выражение и учитывая, что $10 \log p_1^2$ есть уровень источника SL , так как $I = p_1^2$, имеем $10 \log P = 10 \log p_1^2 + (10 \log 8,37 - 10 \log 10^{-9}) = 10 \log p_1^2 + [\sim 9,2 - 10^{-8}] = 10 \log p_1^2 - 70,8$, т. е. $10 \log P = -70,8 + SL$ или $SL = 70,8 + 10 \log P$.

Если излучатель направленный с коэффициентом осевой концентрации при передаче DI_{Π} , тогда:

$$SL = 70,8 + 10 \log p + DI_{\Pi}.$$

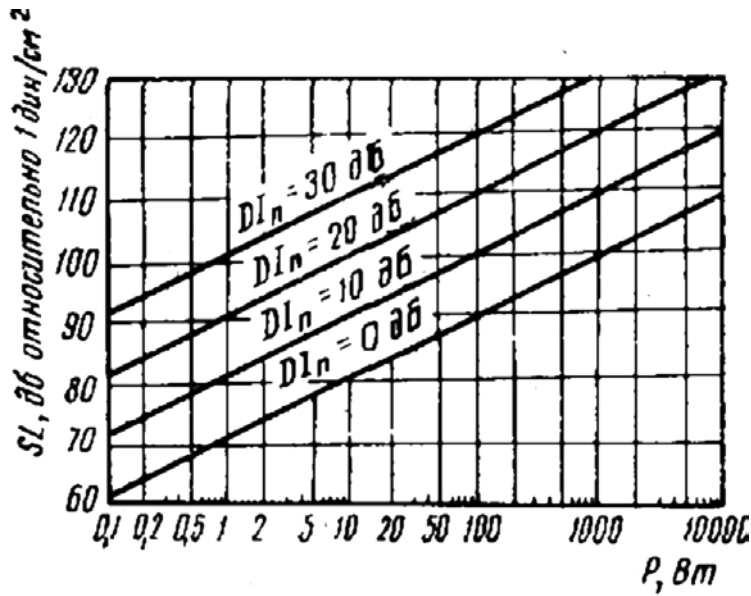


Рис. 9.2. Номограмма для определения уровня источника [Urik, 1967]

На рис. 9.2 представлен график определения SL в зависимости от акустической мощности при разных значениях DI_n . Акустическая мощность P излучателя по величине отличается от электрической мощности P_a , подводимой к нему, и при данной P_a зависит от эффективности E антенны, от ее к. п. д. E , выраженная в децибелах, связана с ее электроакустическим к. п. д. η (в %) выражением:

$$E = 10 \log(100/\eta).$$

Тогда уровень источника может быть записан так

$$SL = 70,8 + 10 \log P_a + DI_n - E,$$

так как $P = P_a/(1/\eta)$, а $10 \log P = 10 \log P_a - 10 \log(1/\eta)$.

Если η выразить в процентах, то

$$10 \log(1/\eta) = 10 \log[100/\eta(\%)].$$

Акустическая мощность большинства существующей гидроакустической локационной аппаратуры изменяется в диапазоне от нескольких сот ватт (исключая малогабаритные приборы, которые имеют меньшие мощности) до десяти или нескольких десятков киловатт, а коэффициент осевой концентрации обычно находится в пределах 10–30 дБ. Это означает, что уровень источника таких систем находится в пределах от 110 до 140 дБ.

Параметр потери передачи TL в уравнениях гидроакустической локационной системы количественно описывает ослабление звука между точкой, расположенной на расстоянии 1 м по акустической оси источника, и точкой на некотором, более удаленном расстоянии r от него. Так, если I_0 — интенсивность на расстоянии 1 м от источника ($10 \log I_0$ — уровень источника) и I_1 — интенсивность в некоторой точке, то потери передачи между этими точками определяются как:

$$TL = 10 \log(I_0/I_1), \text{ дБ.}$$

Как известно, потери при передаче связаны с расширением фронта волны и с затуханием звука в воде. Определим величину потерь, связанных с расширением фронта волны. Пусть ненаправленный источник звука находится в однородной безграничной среде без потерь. Тогда мощность, генерируемая источником, излучается равномерно во всех направлениях, т. е. одинаково распределяется по поверхности сферы, окружа-

ющей источник. Так как в среде отсутствуют потери, мощность P_1 , пересекающая все такие сферические поверхности, должна быть одинаковой

$$P = 4\pi r_1^2 I_r = 4\pi r_2^2 = \dots$$

Если $r_1 = 1$ м, то потери передачи на дистанции r_2 будут равны

$$TL = 10 \log(I_1/I_2) = 10 \log r_2^2 = 20 \log r_2,$$

т. е. потери при передаче увеличиваются пропорционально квадрату расстояния.

Если среда имеет, например, верхнюю и нижнюю границы (что в рыболокации иногда имеет место в случае приповерхностных звуковых каналов), то распространение не является сферическим. С определенного расстояния мощность (энергия), излучаемая источником, распределяется по поверхности цилиндра с радиусом, равным дистанции r , и высотой h , равной расстоянию между параллельными плоскостями-границами. Мощность, пересекающая цилиндрические поверхности на дистанциях r_1 и r_2 , соответственно, будет выражаться как:

$$P = 2\pi r_1 h_1 I_1 = 2\pi r_2 I_2.$$

Если $r_1 = 1$ м, то потери при передаче до дистанции r_2 можно выразить как

$$TL = 10 \log(I_2/I_1) = 10 \log r_2,$$

т. е. TL пропорциональны расстоянию.

Потери, связанные с затуханием акустической энергии, как было показано, обычно характеризуются коэффициентам затухания β , выраженным в децибелах на 1 км (он относится к ослаблению силы звука I (см. затухание звука).

Общие потери (ослабление звука) при передаче в процессе распространения волны до некоторой точки, находящейся на расстоянии r от источника, могут быть выражены формулой:

$$TL = 20 \log r + \beta r.$$

Это выражение обеспечивает достаточно удовлетворительные результаты во многих случаях приближенной оценки гидроакустической локационной аппаратуры на практике. На рис. 9.3 приведен график изменения потерь при передаче $2TL$ для частот 20 и 200 кГц [Torvald et al., 1968]. Для более точных оценок необходимо учитывать и некоторые другие виды потерь, например, потери, связанные с аномалией передачи в рефрагирующей среде, т. е. с отклонениями от сферического закона распространения звука, тогда TL записывается как:

$$TL = 20 \log r + \beta r + H.$$

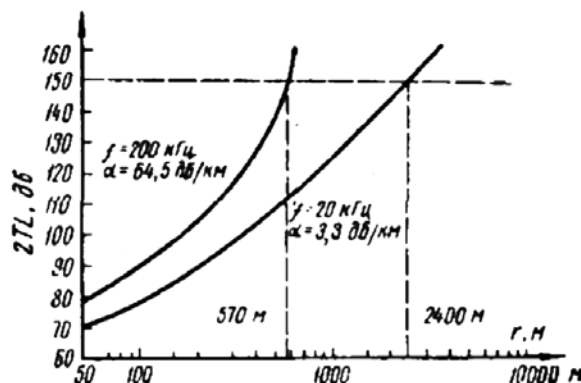


Рис. 9.3. Уровень потерь $2TL$ при распространении на частотах 20 и 200 кГц [Torvald et al., 1968]

9.1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ЦЕЛИ

Очевидным и непосредственным методом измерения силы цели подводного объекта исходя из определения этого параметра является размещение приемного измерительного гидрофона на расстоянии 1 м от объекта и измерение отношения интенсивности отраженной или рассеянной волны к падающей интенсивности. Однако использование этого метода во многих случаях практически невозможно по ряду причин. Часто весьма трудно или почти невозможно разместить гидрофон на расстоянии 1 м от центра объекта, даже если бы это было сделано, очень трудно разделить отраженную волну от падающей на таком малом расстоянии.

Более реальным и целесообразным методом является способ использования эталонной цели с известной TS (отражательной способностью), размещаемой на той же самой дистанции, где находится и измеряемый объект. После этого сравнивают уровни эхосигналов от эталонной цели и объекта. Если эталонной целью, например, является сфера (шар) диаметром 4 м, ее $TS=0$ дБ. Тогда TS измеряемого объекта будет равна $10 \log$ отношения интенсивности эха неизвестной цели к интенсивности эха эталонной цели с силой 0 дБ. В случае различия в расстояниях и размерах эталонной цели легко может быть сделана соответствующая коррекция. Такой метод сравнения особенно пригоден для измерений при небольших объектах и дистанциях. При изготовлении конструкция и размеры эталонной цели должны быть тщательно проверены: данная цель должна примерно соответствовать (приближаться к) идеальной сфере (шару). Вместо такой пассивной эталонной цели может использоваться калиброванный активный ответчик.

Часто TS определяют путем измерения пиковых или средних значений интенсивности огибающей эхосигнала на достаточно большом расстоянии от объекта, отнесенных затем к расстоянию от него в 1 м. Для такого пересчета необходимо знание потерь передачи во время измерения (в месте, где проводится измерение) и уровня источника звука, обеспечивающего получение эхосигнала для измерений. При этом делается ряд измерений уровня эха от цели (объекта) на некоторой дистанции. Средний уровень эхосигнала приводится к 1 м посредством добавления известных или оцененных потерь передачи; разность между уровнем, приведенным к 1 м, и известным уровнем источника равна TS . При этом используется уравнение активного гидролокатора:

$$EL = SL - 2TL + TS,$$

где EL – уровень эхосигнала.

По данному уравнению находят TS .

Недостатком метода является необходимость точного знания потерь передачи, требующей в свою очередь или простых условий распространения, или специальной серии натуральных измерений для получения достаточно достоверных данных. Однако при использовании такого способа не требуется специального оборудования и измерительной аппаратуры, что является его большим достоинством,

Может быть использован и метод, не требующий знания потерь передачи, но связанный с применением специального измерительного оборудования [Urik, 1967]. Измерительный гидрофон и активный акустический ответчик располагаются на расстоянии 1 м друг от друга и устанавливаются на цель, силу которой требуется измерить. На измерительной установке, находящейся на некотором расстоянии от цели, вблизи источника звука (служащего для получения эха от цели), подвешен другой измерительный гидрофон. Относительные уровни эха и импульса ответчика регистрируются на измерительной установке; относительные уровни приходящего импульса источника и импульса ответчика также регистрируются в районе цели на другой измерительной установке. Сила искомой цели равна разности между двумя разностями уровней, зарегистрированных в точках источника звука и цели. Активный ответчик фактически служит в качестве некоторого калибратора пути передачи между двумя точками. В данном случае не требуется абсолютной калибровки используемых преобразователей и знания расстояния между двумя указанными точками.

С помощью калиброванного эхолотатора сила цели объекта может быть определена по следующему уравнению [Simrad, 1980]:

$$TS = U - SL - UR + 40 \log r + 2\alpha r,^1$$

где U – напряжение на калиброванном выходе, дБ относительно 1 В; UR – уровень чувствительности при приеме, дБ / (1 В Па).

При таких измерениях следует учитывать, что правильные данные о силе цели объекта-рыбы могут быть получены только в случае нахождения его на оси характеристики направленности антенны. При оценке средней силы цели рыб в разреженном скоплении таким способом необходимо большое число измерений и обработка их статистическими методами. Более точные результаты будут получены при учете характеристики направленности обратного рассеяния объекта [Measuring, 1972].

9.2. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛА В ШУМАХ И РЕВЕРБЕРАЦИИ, ПОРОГ ОБНАРУЖЕНИЯ

Эхосигналы гидроакустической локационной аппаратуры, достигшие приемной антенны, почти всегда находятся среди фонового поля шумовых или реверберационных помех. Первой задачей, решаемой с помощью любой гидроакустической локационной системы, является определение присутствия полезного эхосигнала в этом фоне помех. Таким образом, система сама или с помощью человека должна определить наличие или отсутствие сигнала за данный интервал времени (например, при поиске косяков и скоплений рыбы, при решении задачи автоматического обнаружения). При участии оператора процесс обнаружения предусматривает, чтобы человек-наблюдатель, используя определенный критерий, мог решить, имеется сигнал или нет за определенный интервал наблюдения.

Далее будут рассмотрены некоторые соотношения для входного отношения сигнал/шум, требуемого для принятия решения об «отсутствии» или «присутствии-наличии» цели при некотором заранее установленном уровне корректности. Заранее определенный уровень соотношения сигнал/шум и носит название порога обнаружения, который в общем случае относится к комплексной комбинации приемный тракт – индикатор-наблюдатель. В уравнениях (9.2, 9.3) им является параметр, удовлетворяющий равенству в уравнении тогда, когда сигнал имеет минимально обнаруживаемый уровень. Хотя к гидроакустической рыболокационной аппаратуре могут предъявляться и другие важные требования, например, классификация или сопровождение цели, при обнаружении всегда необходимо наименьшее соотношение сигнал/шум. Между приемной антенной и конечным решением о присутствии (наличии) или отсутствии цели находятся соответствующие элементы определенной информационной эхолокационной системы. К ним относятся усилительный – приемный тракт, предназначенный для усиления и обработки сигнала, появляющегося на его входных зажимах, устройства отображения предшествующих и текущих сигналов и помех и наблюдатель, который, основываясь на показаниях индикаторов, принимает соответствующее решение о цели.

В такой системе порог обнаружения выражается как замеренное на входе приемного тракта отношение мощности сигнала (или среднеквадратичного действующего значения напряжения в ширине полосы приемника к мощности шума или среднеквадратичного значения напряжения) в полосе 1 Гц (альтернативно, сигнал и шум могут оба оцениваться в полосе пропускания приемника). Если S – мощность сигнала в ширине полосы пропускания приемного тракта на его входе и N – мощность шума в полосе 1 Гц также на его входе, тогда:

$$DT = 10 \log(S/N).$$

¹ В калиброванном эхолотаторе SL и UR являются известными величинами.

Решение о наличии или отсутствии объекта принимается на основании определенного критерия вероятности правильных решений и ошибок. Если сигнал фактически имеется на входных зажимах приемного тракта, возможны два решения — он отсутствует или присутствует; когда сигнал на самом деле отсутствует, также могут быть те же самые два решения (т. к. это, например, зависит от соотношения сигнал/шум). Соответствующая возможная матрица решений приведена в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Решение о присутствии и об отсутствии сигнала

Показатели	Решение	
	Сигнал присутствует	Сигнал отсутствует
Сигнал присутствует	Правильное решение $p_{пр}$	Ошибка $1 - p_{пр}$
Сигнал отсутствует	Ложная тревога $p_{л.т.}$	Недействительное решение $1 - p_{л.т.}$

Два решения правильные и два неправильные расположены по диагонали матрицы. Вероятность того, что при имеющемся сигнале принято правильное решение «сигнал присутствует», называется вероятностью обнаружения $p_{пр}$, вероятность того, что при отсутствующем сигнале принято неправильное решение, что «сигнал присутствует», называется вероятностью ложной тревоги $p_{л.т.}$. Порог обнаружения зависит от этих двух независимых вероятностей как будет показано ниже.

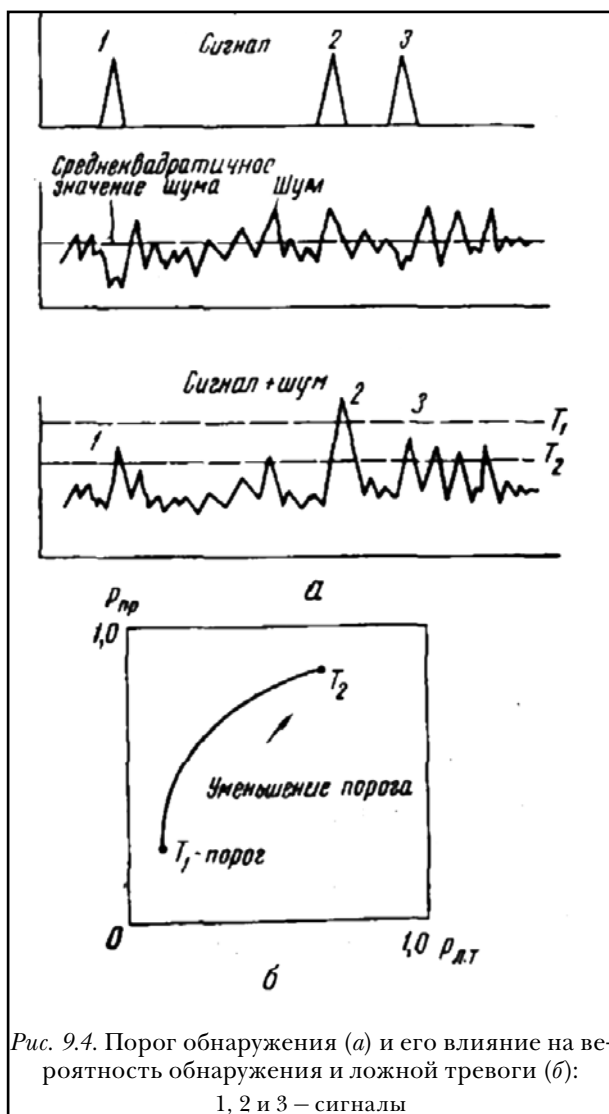


Рис. 9.4. Порог обнаружения (а) и его влияние на вероятность обнаружения и ложной тревоги (б):

1, 2 и 3 — сигналы

При описании характеристик устройств обработки сигнала и приемного тракта иногда используется также термин «усиление при обработке». Эта характеристика приемного тракта определяется как разность между отношением сигнал/шум (в дБ) на входе и отношением сигнал/шум (в дБ) на выходе тракта обработки, когда оба отношения приводятся или измеряются в ширине полосы пропускания приемного тракта. Такой способ также может использовать для оценки системы.

Процесс решения требует установки некоторого порога, при превышении которого могло быть принято решение о наличии цели. Такое решение при автоматическом обнаружении может заключаться, к примеру, в замыкании реле или во включении некоторого сигнала, когда заданный порог превышен. Однако, если порог установлен слишком высоким, могут быть обнаружены только крупные цели, а если он установлен слишком низким, будет очень много ошибочных срабатываний. При установке высокого порога обнаружения как вероятность обнаружения цели, так и вероятность ложной тревоги будут низкими; при низком пороге обе вероятности становятся высокими (рис. 9.4 а) сигналы от трех целей с огибающими 1, 2, 3, показанными на рис. 9.4 а, при сложении с огибающей шума будут давать суммарную огибающую сигнала и шума. При

пороге, равном T_1 , обнаруживается только вторая цель и нет сигналов «ложной тревоги» в пределах показанного на рис. 9.4 *а* интервала времени. При низком пороге обнаружения T_2 все три цели обнаруживаются, однако имеется и ряд ложных сигналов. Для фиксированного выходного соотношения сигнал/шум установка различных уровней порога соответствует различным парам значений двух вероятностей. Такая кривая изменения вероятности обнаружения (определяемой как вероятность того, что если сигнал присутствует, он будет обнаружен) и вероятности ложной тревоги (определяемой как вероятность того, что пересечение порога вызывается шумом) при изменении установки порога представлена на рис. 9.4 *б*.

При оценке порога обнаружения для определенной гидролокационной аппаратуры вначале выбирается приемлемая вероятность обнаружения и допустимая вероятность ложной тревоги для системы исходя из условий, в которых она должна использоваться. В случае участия оператора в принятии решения о присутствии цели указанный критерий порога часто является достаточно неопределенным, однако при решении задачи автоматического обнаружения этим вопросам должно уделяться более серьезное внимание.

При оценке и сравнении различной рыболокационной аппаратуры по обнаружению объектов могут использоваться еще два параметра, получаемые из основного уравнения рыболокатора: основная характеристика рыболокатора PF и показатель его добротности FM .

$$PF = SL - (SPL + B - DI),$$

$$FM = PF - DT.$$

Определив показатель добротности (качества) рыболокационной системы для объекта заданной силы цели, можно оценить степень влияния на дальность обнаружения этого объекта изменения параметров аппаратуры (ширины полосы пропускания, величины излучаемой мощности, коэффициента направленности акустической антенны и др.). На рис. 9.5, *а* приведена подобная диаграмма, рассчитанная для цели с силой $TS = -30$ дБ (треска длиной 50–60 см при озвучивании со спинки, что также соответствует TS идеально отражающей сферы (шара) диаметром 12,5 см) при использовании рыболокаторов, работающих на различных частотах с параметрами, указанными в табл. 9.2 [Torvald et al., 1968].

Из рис. 9.5 *а* можно видеть, что глубина обнаружения отдельных экземпляров трески с силой цели -30 дБ рыболокатором с рабочей частотой 38 кГц составляет около 600 м. При изменении одного из параметров системы на 10 дБ, например, при увеличении выходной мощности на 10 дБ, т. е. в 10 раз, до 8 кВт (т. к. $10 \log 10 = 10$ дБ) на частоте 38 кГц глубина обнаружения данной цели при прочих неизменных условиях будет равна примерно 810 м. При повышении уровня шумов на 10 дБ, по сравнению с указанным в табл. 9.2, глубина обнаружения для данного рыболокатора уменьшится с 600 до 440 м. Пользуясь приведенным графиком, можно определить и дальность обнаружения объекта с другой силой цели. Например, цель с силой -20 дБ при прочих неизмен-

Таблица 9.2. Параметры эхолотаторов

Параметры	Частота, кГц				
	12	18	38	50	120
Коэффициент направленности, DI , дБ	21	22	25	25	24
Излучаемая мощность, P , кВт	1,5	1,2	0,8	0,8	0,8
Уровень источника, SL , дБ/0,1 Па	116	116	118	118	118
Ширина полосы пропускания, Δf , Гц	330	500	1000	1000	3000
Ширина полос, B , дБ/Гц	25	27	30	30	35
Спектральный уровень шума, SPL , дБ/0,1 Па	-42	-45	-51	-54	-47
Порог обнаружения, D , дБ	+10	+10	+10	+10	+10
Показатель качества, FM , дБ	144	146	154	157	144

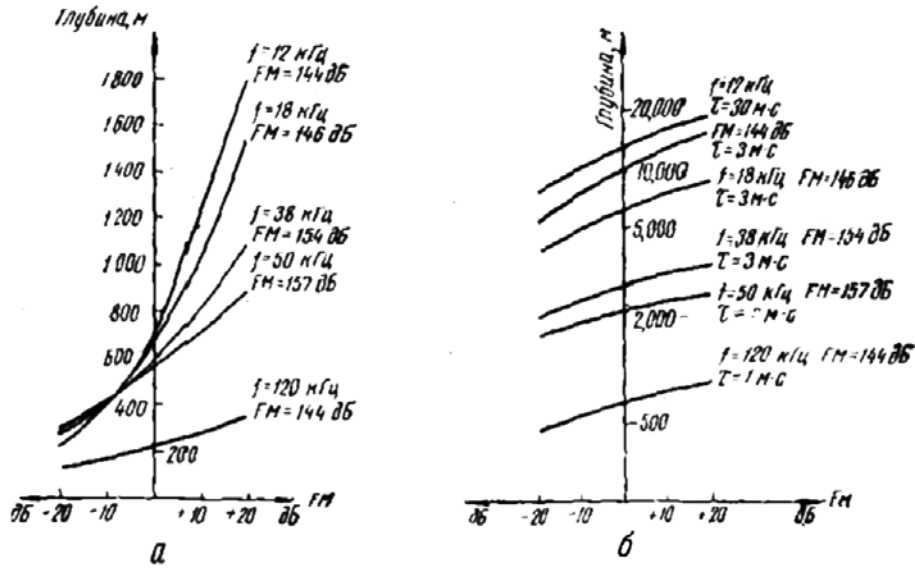


Рис. 9.5. Зависимость глубины обнаружения рыбы (а) и дна (б) от показателя качества рыболокатора [Torvald et al., 1968].

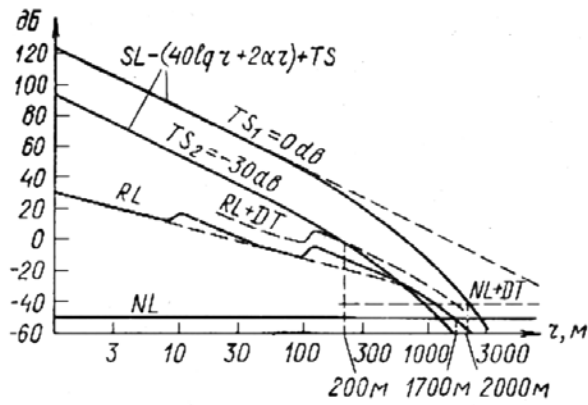


Рис. 9.6. Диаграмма, показывающая связь между основными параметрами рыболокатора [Torvald et al., 1968].

ных условиях и частоте рыболокатора 38 кГц будет обнаруживаться уже на глубине 810 м. Подобная диаграмма приведена на рис. 9.5 б для максимальной глубины обнаружения дна с силой обратного донного рассеяния -10 дБ/м² для аппаратуры, параметры которой приведены в табл. 9.2.

На рис. 9.6 даны графически наиболее важные параметры в соответствии с основным уравнением рыболокатора [Torvald et al., 1968]. Кривые TS_1 и TS_2 показывают изменение уровня эхосигнала EL в функции дистанции для двух различных объектов с силой цели соответственно 0 и -30 дБ.

Кривые построены по уравнению:

$$EL = SL - (40 \log r + 2\alpha r) + TS.$$

Кривая RL представляет собой изменение уровня реверберации RL с расстоянием; два подъема на ней вызваны обратным рассеянием от поверхности и дна. Уровень объемной реверберации RL_v определялся по формуле:

$$RL_v = SL + 10 \log(c\tau/2) + c_1 + Sv - (20 \log r + 2\alpha r),$$

где τ — длительность импульса зондирования; c_1 — постоянная, зависящая от направленности преобразователя; S_v — сила рассеяния объемной реверберации.

С увеличением длительности импульса кривая SL будет смещаться вверх.

Выражения для RL в случае объемной реверберации получены следующим образом [Urik, 1967]. Предположим, что направленный акустический преобразователь работает в идеальной непоглощающей среде, содержащей большое число равномерно распределенных рассеивателей (рис. 9.7 а). Будем считать, что указанный преобразователь с характеристикой направленности $a(\theta, \varphi)$ обеспечивает интенсивность звука на оси, равную I_0 на расстоянии 1 м (уровень источника звука $SL = 10 \log I_0$),

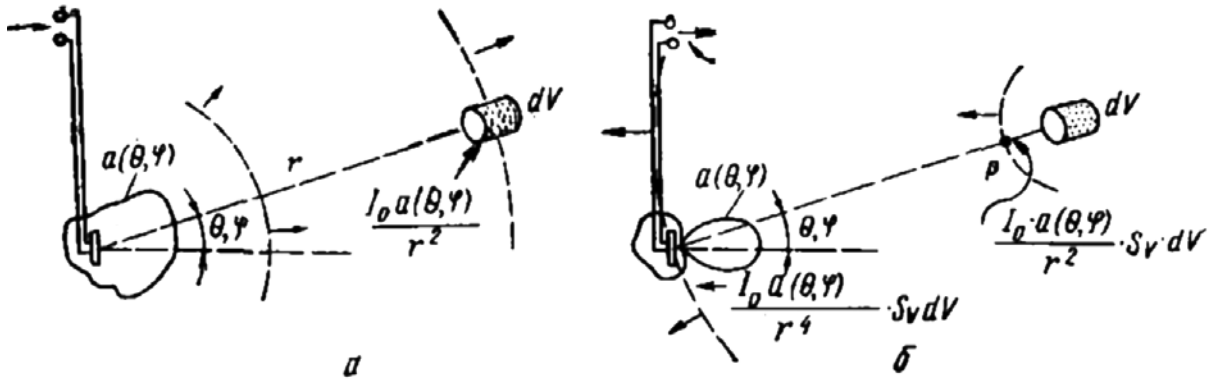


Рис. 9.7. Формирование объемной реверберации: а – передача; б – прием

Тогда интенсивность звука на расстоянии 1 м в любом другом направлении равна $I_0 \alpha(\theta, \varphi)$. Выделим на дистанции r вдоль указанного на рис. 9.7 а направления элементарный объем рассеивателей dV . Интенсивность падающей на этот объем акустической энергии будет равна $I_0 \alpha(\theta, \varphi) / r^2$, а рассеянной этим объемом dV обратно в точку p на расстоянии 1 м от dV (рис. 9.7 б), соответственно $[I_0 \alpha(\theta, \varphi) / r^2] S_v dV$, где S_v – отношение интенсивности обратного рассеяния, создаваемого единичным объемом dV (на расстоянии 1 м от него), к интенсивности падающей акустической волны. Величина $10 \log(S_v)$ – есть сила обратного рассеяния объемной реверберации S_v . S_v зависит от типа и плотности рассеивателей. В районе преобразователя реверберация, создаваемая этим элементарным объемом dV , будет иметь интенсивность $(I_0 / r^4) a(\varphi, \theta) S_v dV$, а напряжение на выходе преобразователя будет пропорционально $(I_0 / r^4) a(\varphi, \theta) S_v dV$ (если для излучения и приема используется один и тот же преобразователь – антенна). Общее напряжение, создаваемое реверберацией, будет пропорционально:

$$\frac{I_0}{r^4} S_v \int_v a^2(\theta, \varphi) dV,$$

так как S_v можно считать величиной постоянной при принятом равномерном распределении рассеивателей в общем озвучиваемом объеме V .

Полагая уровень реверберации RLv соответствующим интенсивности (в дБ) падающей плоской волны, создающей то же самое: напряжение на выходе преобразователя, как и указанная реверберация, можем записать, что

$$RLv = 10 \log \left[\frac{I_0}{r^4} S_v \int_v a^2(\theta, \varphi) dV \right].$$

Рассмотрим теперь элементарный объем dV (рис. 9.8 а). При достаточно большом r его можно считать цилиндром, расположенным перпендикулярно направлению оси излучения. Площадь его основания может быть выражена в виде $r^2 d\Omega$: ($d\Omega$ – элементарный телесный угол), а длина его при импульсной работе антенны и станции равна $c\tau/2$.

Тогда $dV = r^2 (c\tau/2) d\Omega$ и

$$RL = \log \left[\frac{I_0}{r^4} r^2 \cdot \frac{c\tau}{2} S_v \int a^2(\vartheta, \varphi) d\Omega \right], \quad (c\tau/2) \ll r.$$

Интеграл $\int a^2(\theta, \varphi) d\Omega$ можно интерпретировать в виде эквивалентной характеристики направленности преобразователя для объемной реверберации. Заменим харак-

теристику $a^2(\theta, \varphi)$ идеальной характеристики единичной величины в пределах телесного угла ψ и имеющей нулевые значения вне указанного угла (рис. 9.8), т. е.

$$\int_0^{4\pi} a^2(\theta, \varphi) d\Omega = \int_0^{\psi} 1 d\Omega = \psi.$$

ψ , следовательно, является величиной угла раствора идеальной характеристики направленности, эквивалентной реальной характеристике преобразователя в режиме передачи-приема для реверберации. Тогда

$$RL_v = 10 \log \left(\frac{I_0}{r^4} \cdot \frac{c\tau}{2} S_v \psi r^2 \right),$$

или $RL_v = SL - 20 \log r + 10 \log(c\tau/2) + 10 \log \psi + S_v$.

При учете поглощения в среде:

$$RL_v = SL + 10 \log(c\tau/2) + 10 \log \psi + S_v(20 \log r + 2\alpha r).$$

Величина ψ для некоторых простых преобразователей приведена в табл. 9.3 [Urik, 1967].

Таблица 9.3. Значения величины ψ

Преобразователь	$10 \log \psi$, дБ относительно 1 стерадиана	$10 \log \Phi$, дБ относительно 1 радиана
Круглый плоский в бесконечном экране с радиусом $a > 2\lambda$	$20 \log(\lambda/2\pi a) + 7,7$	$10 \log(\lambda/2\pi a^*) + 6,9$
Прямоугольный в бесконечном экране с $a, b \gg \lambda$ (a, b -стороны)	$10 \log(\lambda^2/4\pi ab) + 7,4$	$10 \log(\lambda^2/2\pi a) + 9,2$
Линейный длиной $l > \lambda$ (горизонтальный)	$10 \log(\lambda/2\pi l) + 9,2$	$10 \log(\lambda/2\pi l) + 9,2$
Ненаправленный (точечный)	$10 \log 4\pi = 11,0$	$10 \log 2\pi = 8,0$

* a – длина стороны в горизонтальной плоскости.

Уровень поверхностной реверберации рассчитывался по формуле

$$RL_s = SL + 10 \log(c\tau/2) + c_2 + S_s(30 \log r + 2\alpha r),$$

где c_2 – постоянная, зависящая от направленности преобразователя; S_s – сила рассеяния поверхностной реверберации, имеющая разные значения для дна и поверхности моря.

Можно считать, что поверхностная реверберация создается рассеивателями, не находящимися в каком-то объеме, а распределенными примерно по плоской поверхности (в основном это поверхность и дно моря). Основываясь на представлениях, подобных рассмотренным при получении выражения для уровня объемной реверберации, изменения RL_v в случае поверхностной реверберации выражаются следующим образом:

$$RL_s = 10 \log \left(\frac{I_0}{r^4} S_s \int a^2(\theta, \varphi) dA \right),$$

где dA – элементарная площадь рассеивателей; $10 \log S_s = S_s$ – сила рассеяния поверхностной реверберации.

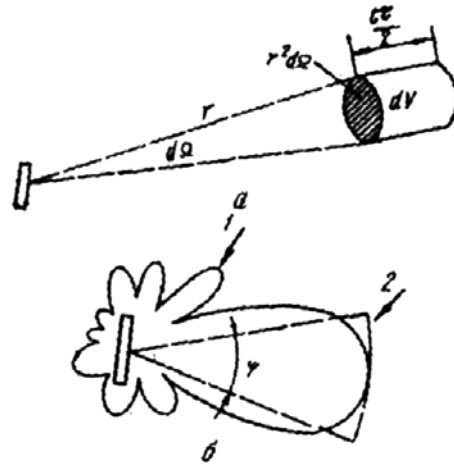


Рис. 9.8. Схема оценки уровня реверберации: а – выбор элементарного объема; б – реальная и эквивалентная характеристики направленности [Urik, 1967]: 1 – реальная характеристика $a^2(\theta, \varphi)$; 2 – эквивалентная идеальная характеристика $a^2(\theta, \varphi) = 1$ при $0 < \Omega < \Psi$ и $a^2(\theta, \varphi) = 0$ при $\Psi < \Omega < 4\pi$

Если dA имеет вид элементарной площадки кольцевой зоны рассеивателей, то $dA = (c\tau/2)r d\varphi$, где $d\varphi$ – элементарный угол в горизонтальной плоскости, под которым виден элемент dA из центра кольца. Тогда:

$$RL_s = \frac{I_0}{r^4} S_s \frac{c\tau}{2} \int_0^{2\pi} a^2(\theta, \varphi) d\varphi.$$

На практике при использовании рыболокаторов горизонтального действия для поиска подводных объектов характеристика направленности антенны часто располагается под малым углом θ к поверхности воды, тогда его можно приравнять к 0 и записать:

$$RL_s = 10 \log \left[\frac{I_0}{r^4} S_s \frac{c\tau}{2} r \int_0^{2\pi} a^2(\theta, \varphi) d\varphi \right],$$

а $\int_0^{2\pi} a^2(\theta, \varphi) d\varphi$ – в виде идеальной эквивалентной характеристики с шириной угла φ , как это было сделано в случае объемной реверберации.

$$\int_0^{2\pi} a^2(\theta, \varphi) d\varphi = \int_0^{\psi} 1 \times 1 d\varphi = \Phi,$$

тогда

$$RL_s = 10 \log \left(\frac{I_0}{r^4} S_s \frac{c\tau}{2} r \Phi \right)$$

или

$$RL_s = SL - 30 \log r + S_s + 10 \log \frac{c\tau}{2} + 10 \log \Phi.$$

При учете поглощения среды:

$$RL_s = SL - (30 \log r + 2\alpha r) + 10 \log \frac{c\tau}{2} + c_2 + S_s.$$

Величины ϑ для некоторых антенн простой формы приведены в табл. 9.3.

Кривая NL (рис. 9.6) показывает уровень принимаемого шума на данной скорости судна, подсчитываемой по формуле $NL = SPL + B-DT$. С увеличением скорости обычно увеличивается SPL и линия NL будет сдвигаться вверх, применение более узкой полосы приводит к смещению этой линии вниз. Линия RL + DT указывает, какой уровень эхосигнала необходим, чтобы при данном пороге обнаружения DT он выделялся на фоне маскирующей реверберации, а NL + DT – соответствующую кривую для уровня шумовых помех. В точке пересечения RL и NL уровни реверберации и шумовых помех равны. В данном случае это соответствует дистанции 1700 м. На меньших дистанциях минимальный обнаруживаемый эхосигнал будет ограничиваться уровнем реверберации, тогда как на больших расстояниях – в основном уровнем шумовых помех. Дистанция, соответствующая указанной точке пересечения, зависит от уровней шума (скорости судна, ширины полосы пропускания рыболокатора) и реверберации (длительности импульса и уровня источника).

При данных по уровням шумовых помех реверберации, приведенных на рис. 9.6, дальность обнаружения более крупной цели (0 дБ) будет ограничиваться шумом на дистанции, где кривая TS_1 пересекает линию NL + DT. Эта дальность соответствует 2000 м. Для малой цели (-30 дБ) дальность обнаружения будет ограничиваться реверберацией и составит всего 200 м.

ГЛАВА 10.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

Исходя из назначения технические средства рыбохозяйственной гидроакустики могут быть разделены на следующие основные группы:

- локационная аппаратура, предназначенная для обнаружения, классификации гидробионтов, их количественной оценки и в определенной мере определения характеристик верхней части донных слоев;
- телеметрическая аппаратура измерения и контроля параметров и характеристик орудий промышленного рыболовства, а также рыбы в зоне их действия;
- аппаратура управления поведением водных биологических объектов;
- доплеровские системы;

В отдельную группу можно выделить аппаратуру биотелеметрии.

В качестве важных элементов (блоков) аппаратуры рыбохозяйственной гидроакустики, особенно телеметрических систем, находят акустические приемопередатчики и ретрансляторы.

Гидроакустическая локационная аппаратура подразделяется на технику активной и пассивной локации. Наиболее широкую группу средств рыбохозяйственной локационной гидроакустики составляет эхолокационная техника. В первую очередь, к ней относится рыбопоисковая промысловая аппаратура вертикальной и горизонтальной локации, затем станции бокового и траверзного обзора. Эхолокационные функции выполняются также некоторыми типами гидроакустической телеметрической аппаратуры.

Техника пассивной локации базируется на приеме и регистрации звуков и звуковой активности, в настоящее время в основном используется при научно-исследовательских работах по млекопитающим. Применяемая аппаратура и методики использования были достаточно подробно рассмотрены в монографии [Кудрявцев, 2013].

10.1. СРЕДСТВА РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ АКТИВНОЙ ЭХОЛОКАЦИИ

Всю информацию о водной среде и объектах в ней они получают лишь от принимаемых отраженных сигналов или эхосигналов. При практическом использовании эхолокационной аппаратуры могут встречаться различные виды эхосигналов, вернее, трассы и совокупности отраженных сигналов, т. к. одно эхо фактически не может дать сколь-либо существенной информации об объекте. Имеется, правда, одно исключение, которое используется в промышленном рыболовстве и в рыбохозяйственных исследованиях при поиске косяков и скоплений рыбы рыбопоисковыми гидролокаторами. При этом гидролокаторы работают с большими длительностями излучаемых импульсов и при определенном опыте по характеру звучания даже одиночного эха в слуховом индикаторе оператор может его классифицировать. Автор мог сам убедиться в этом при поиске рыбы гидролокатором ХАГ-400 (на СРТР типа «Океан» БалтНИРО) в 60-х гг. прошлого века в Атлантике у африканского побережья. Приобретению необходимого опыта способствовало применение одновременно со слуховым также электронного дисплея.

Следует отметить, что современные многоканальные очень высокочастотные гидроакустические эхолоты с высокой разрешающей способностью как по дистанции, так и по углу позволяют видеть на экране непосредственные акустические изображения отдельных рыб, правда на сравнительно небольших расстояниях. В качестве примера можно привести изображения *Tarpon atlanticus* и косяка рыбы сканирующим гидролокатором бокового обзора С-Мах CM2 с рабочей частотой 600 кГц (рис. 10.1, 10.2), а также мигрирующих по реке лососевых рыб мегагерцевым гидролокатором Didson с акустическими линзами (рис. 10.3).

Подобная аппаратура используется при рыбохозяйственных исследованиях и количественной оценке рыб, идущих по реке на нерестилища.

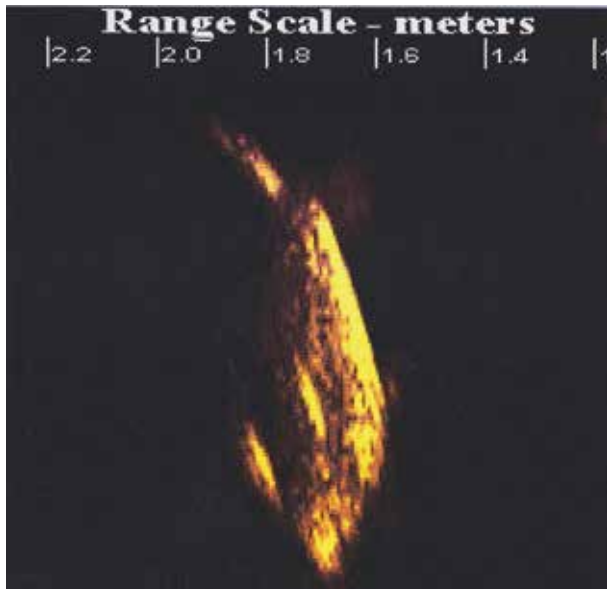


Рис. 10.1. Акустическое изображение отдельной рыбы *Tarpon atlanticus* аппаратурой бокового обзора С-Мах CM2

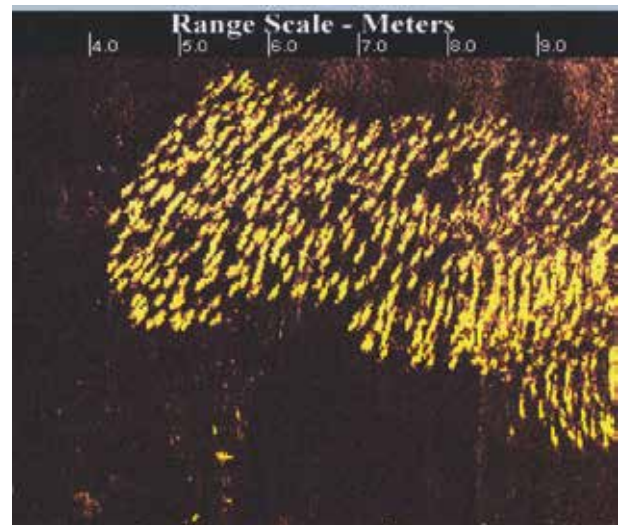


Рис. 10.2. Акустическое изображение косяка (стаи) мелких рыб аппаратурой бокового обзора С-Мах CM2

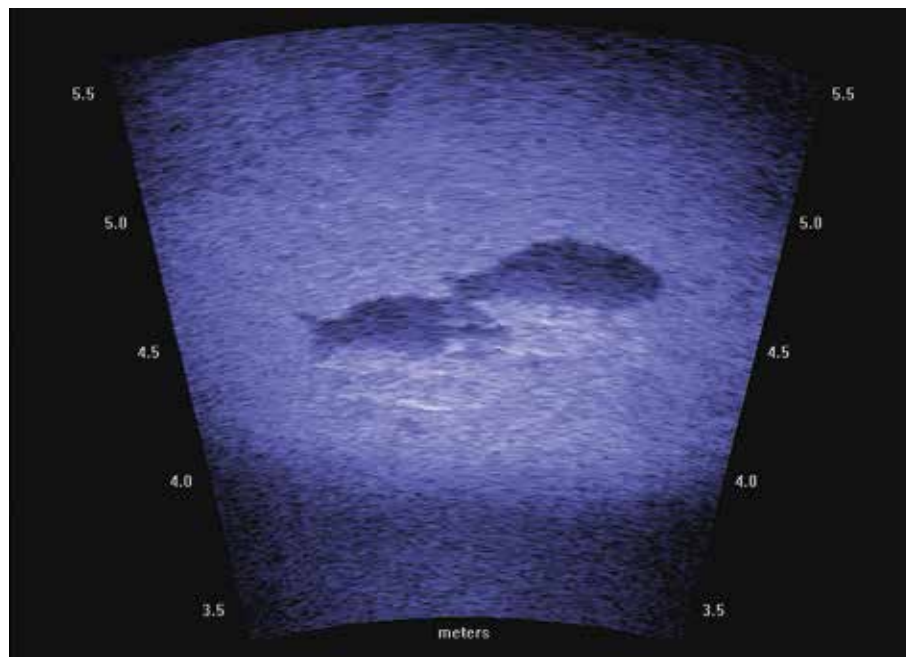


Рис. 10.3. Акустическое изображение двух лососевых рыб мегагерцевым гидролокатором Didson

В остальных ситуациях приходится иметь дело с трассами эха или комплексами трасс отдельных эхосигналов от самых различных объектов в водной среде.

10.2. ТИПИЧНЫЕ СОВОКУПНОСТИ ЭХОСИГНАЛОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ НА ЭКРАНАХ ДИСПЛЕЕВ СРЕДСТВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

Эхолокационной аппаратурой принимаются и отображаются на ее дисплеях трассы и совокупности отраженных от различных объектов в водной среде. Наиболее типичными из них являются:

- трассы и совокупности эхосигналов от скоплений рыбы, стай или косяков;
- трассы эхосигналов от одиночных рыб;
- трасса эхосигналов от дна;
- трасса эхосигналов от поверхности воды (моря);
- трассы повторных эхосигналов от дна, возникающие при многократных отражениях от дна и поверхности;
- трасса эхосигналов от нижней подборы трала;
- трасса эхосигналов от верхней подборы трала;
- трасса эхосигналов от траловой доски;
- трасса эхосигналов от груза-углубителя трала;
- трассы и совокупности эхосигналов от попавшей в мешок трала рыбы;
- трасса эхосигналов от другого судна или от его кильватерной струи;
- трассы и совокупности эхосигналов от звукорассеивающих слоев;
- трасса реверберационных эхосигналов от приповерхностного слоя рассеивателей, принимаемых по основному лепестку ХН антенны;
- трассы реверберационных эхосигналов от приповерхностного слоя рассеивателей, принимаемых по боковым лепесткам ХН антенны;
- трасса реверберационных эхосигналов от морского дна, принимаемых по основному лепестку ХН антенны;
- трассы реверберационных сигналов от морского дна, принимаемые по боковым лепесткам ХН антенны;
- трасса реверберационных эхосигналов от поверхности моря, принимаемая по основному лепестку ХН антенны;
- трассы реверберационных эхосигналов от поверхности моря, принимаемых по боковым лепесткам ХН антенны и др.

В работе Кудрявцева Н. Н. [2001] приводятся математические выражения для количественного определения и оценки некоторых эхосигналов от различных объектов с соответствующими пояснениями, в т. ч. от эталонного шара, одиночной рыбы малого размера, верхней и нижней подборы трала.

Как в теоретической, так и в практической гидроакустике для обеспечения возможности сравнения параметров рыбопоисковых приборов и их калибровки используются эталонные цели. В качестве эталонных целей в большинстве случаев используются металлические шары (сферы), изготовленные из высококачественной электролитической меди и карбид-вольфрама. Параметры, характеризующие обратное рассеяние звуковой энергии эталонной сферой, используются и для описания отражательных способностей реальных целей. В качестве таких параметров обычно используются радиус эквивалентной сферы $R_Э$ и сила цели TS.

Взаимосвязь этих параметров определяется следующими выражениями

$$TS = 20 \log(R_Э/2) \text{ и } R_Э = 2 \cdot 10^{(TS/20)}. \quad (10.1)$$

Параметр $R_Э$ используется при использовании линейной шкалы единиц, а параметр TS применяется при использовании шкалы децибел.

Теоретически интенсивность эхосигнала от идеальной сферической поверхности большого волнового размера, находящейся на оси ХН гидроакустической антенны, определяется с учетом затухания при распространении следующим выражением:

$$I_{\text{эш}} = \frac{W_a \gamma R_s^2}{16\pi r^4} 10^{-0,0002\beta r},$$

где W_a — излучаемая акустическая мощность; γ — коэффициент осевой концентрации антенны в режиме излучения; R_s — радиус сферы; r — расстояние от антенны до сферической поверхности; β — коэффициент поглощения звука в воде (обычно приводится в децибелах на километр).

Известно, что интенсивность звуковой энергии I_a связана с эффективным значением акустического давления p_a в плоской волне следующим соотношением:

$$I_a = p_a^2 / \rho c,$$

где ρ — плотность воды; c — скорость звука в воде.

Соответственно, используя следующее выражение для эффективного значения звукового давления в режиме излучения, приведенного к дистанции 1 м,

$$p_{1\text{м}} = \sqrt{\frac{W_a \gamma \rho c}{4\pi}},$$

можно записать для эффективного значения акустического давления эхосигнала следующее соотношение:

$$p_{\text{эф}} = \frac{p_{1\text{м}}}{r^2} \cdot \frac{R_s}{2} 10^{-0,0001\beta r}. \quad (10.2)$$

Следует отметить, что для испытаний рыбопоисковых гидролокаторов, предназначенных для обнаружения больших целей, используются обычно эталонные цели в виде более легких по весу уголковых отражателей, отражательные свойства которых описываются все равно радиусом эквивалентной сферы. Это объясняется необходимостью сохранения единых измерительных методик для эхолотаторов вертикального действия и гидролокаторов.

В ситуации, когда размер тела рыбы меньше протяженности импульсного объема и полностью перекрывается пространственной ХН гидроакустической антенны, ее с достаточной степенью приближения можно считать точечной целью. В этом случае для определения эффективного значения акустического давления эхосигнала от одиночной рыбы можно воспользоваться выражением (10.1), если известны значение радиуса эквивалентной сферы для конкретной рыбы или сила цели этой рыбы.

В то же время в литературе по рыболокации чаще используется понятие акустического сечения обратного рассеяния или эффективной площади рассеяния одиночной рыбы или рыбного скопления σ_p . Эта величина определяется как площадь поперечного сечения сферы с отражательной способностью, эквивалентной отражательной способности лоцируемого объекта. Исходя из этого для одиночной рыбы малого размера, находящейся на оси ХН гидроакустической антенны, выражение (10.2) может быть записано в следующем виде:

$$p_{\text{эф1р}} = \frac{p_{1\text{м}}}{r^2} \sqrt{\frac{\sigma_{1р}}{4\pi}} \cdot 10^{-0,0001\beta r}, \quad (10.3)$$

где $\sigma_{1р}$ — акустическое сечение обратного рассеяния одиночной рыбы; r — расстояние от антенны до центра тела рыбы.

В литературе можно встретить большое количество данных по параметру σ_{1p} для разных видов рыб и различных условий локации, но для целей создания обобщенной модели эхосигнала от одиночной рыбы наиболее удобна эмпирическая зависимость, полученная в работе [Love, 1969, 1971] по результатам обработки большого количества экспериментальных данных. Для непосредственного использования в выражении (10.3) представленное в работах [Love, 1969, 1971] уравнение может быть приведено к следующему виду:

$$\sigma_{1p} = AL_p^2 \lambda^{2-B}, \quad (10.4)$$

где A и B – константы, определенные автором работы [Love, 1969] эмпирическим путем; L_p – длина тела рыбы; λ – длина звуковой волны в воде.

Коэффициенты A и B учитывают ракурс тела рыбы относительно направления зондирования.

Выражение для эхосигнала от верхней подборы трала автором получено с допущением, что основными отражающими объектами на верхней подборе трала являются только кухтыли (пустотелые сферы), распределенные группами по несколько штук (от восьми до десяти) по верхней подборе. Для упрощения в работе [Кудрявцев, 2001] принято, что все кухтыли сосредоточены в ее центре, но не затеняют друг друга. Известно [Urik 1967; Клей, Медвин, 1980], что радиус эквивалентной сферы для реального тела сферической формы приближенно равен радиусу этого тела $R_{сф}$ при соблюдении условия $kR_{сф} \gg 1$. Для обычно принимаемых при вооружении тралов кухтылей с радиусом 10 см это условие полностью соблюдается для частот от 24 кГц (в этом случае $kR_{сф} = 10$) и выше. В работе [Кудрявцев, 2001] в рассматриваемом случае применен принцип энергетического суммирования интенсивностей. Очевидно, что при использовании этого принципа эффективная площадь рассеяния группы кухтылей $\sigma_{гк}$ будет определяться выражением:

$$\sigma_{гк} = \sigma_{гк} N_k, \quad (10.5)$$

где N_k – количество кухтылей в текущем импульсном объеме.

Таким образом, используя известное выражение для площади круга, можно записать:

$$\sigma_{гк} = \pi R_{сф}^2 N_k, \quad (10.6)$$

где N_k – количество кухтылей на верхней подборе.

Подставляя в выражение 10.3 вместо акустического сечения одиночной рыбы выражение 10.5 для эффективной площади рассеяния группы кухтылей, можно получить следующее выражение для эффективного значения звукового давления эхосигнала от верхней подборы трала [Кудрявцев Н.Н, 2001]:

$$p_{вп} = \frac{p_{1м}}{r^2} \frac{R_{сф}}{2} \sqrt{N_k} 10^{-0,0001\beta r}. \quad (10.7)$$

Основным отражающим элементом нижней подборы пелагического рыболовного трала следует считать стальной трос. Можно сделать допущение, что в пределах угла обзора антенны тралового зонда радиус кривизны линии, вдоль которой расположен трос, близок к бесконечности. В этом случае для оценки эхосигнала от троса можно использовать теорию рассеяния звука от бесконечного цилиндра [Тюлин, 1976; Шендеров, 1989; Свердлин, 1990; Кудрявцев, 2001]. Цилиндр можно считать бесконечным, если дистанция до него r и его длина $l_{ц}$ удовлетворяют неравенству $r \ll l_{ц} \lambda$. Для используемых в траловых зондах частот это условие всегда выполняется. Эффективное значение звукового давления эхосигнала от бесконечного цилиндра может быть записано в следующем виде [Тюлин, 1976; Шендеров, 1989; Свердлин, 1990; Кудрявцев, 2001]:

$$p_{\text{бц}} = \frac{p_{1\text{м}}}{2} \sqrt{\frac{r_{\text{ц}}}{r^2}} \cdot 10^{-0,0001\beta r}, \quad (10.8)$$

где $r_{\text{ц}}$ – радиус цилиндра.

В соответствии с [Шендеров, 1989] выражение (10.8) справедливо при условии, что $kr_{\text{ц}} \gg 1$. Это условие не может быть соблюдено для всех комбинаций радиусов тросов и длин излучаемых в траловых зондах волн. Однако в работе [Свердлин, 1990] показано, что даже в случае, когда $kr_{\text{ц}} = 2$, точность определения звукового давления по формуле (10.7) остается достаточно высокой. Последнее условие для траловых зондов и используемых в тралах тросов соблюдается практически всегда. Так как на практике обычно оперируют диаметрами тросов, выражение для акустического давления эхосигнала от нижней подборы трала, по мнению автора, удобнее записать в следующем виде [Кудрявцев, 2001]:

$$P_{\text{ни}} = P_{1\text{м}} \sqrt{\frac{d_{\text{тр}}}{8r^3}} \cdot 10^{-0,0001\beta R}, \quad (10.9)$$

где $d_{\text{тр}}$ – диаметр троса нижней подборы.

Можно считать, что при правильно установленном трале и устойчивом режиме траления трос нижней подборы пелагического трала перпендикулярен направлению зондирования. В этом случае в формировании процесса отражения при соблюдении условия $r \ll l_{\text{ц}}/\lambda$ эффективно участвует только первая зона Френеля, а остальные компенсируют друг друга. Исходя из этого можно принимать длительность эхосигнала от нижней подборы, равной длительности зондирующего импульса.

Понятие о зонах Френеля имеет важное значение в теории рассеяния звука. Пусть, к примеру, пучок акустических лучей падает на дно (рис. 10.4). В формировании отраженного сигнала при этом будет участвовать некоторая площадь S_s , радиус которой R_s находится из выражения:

$$R_s = h \operatorname{tg}(\theta_s/2),$$

где h – глубина дна; θ_s – угловой размер отражающей площади дна.

Зоны Френеля – это кольцевые площадки, на границах которых разность хода волн обратно до антенны равна половине длины волны (рис. 10.5). В первой зоне Френеля (круге радиуса R) разность хода волн меньше половины длины волны, поэтому в пределах первой зоны Френеля элементарные волны суперпонируют практически синфазно. А вот от точек последующих зон Френеля разности ходов элементарных волн равны половине длины волны. И т. к. элементарные волны когерентны, то образованные последующими зонами Френеля, они гасят друг друга. Таким образом, на ровной поверхности дна формирование отраженного сигнала осуществляется отражающей площадью, равной площади первой зоны Френеля.

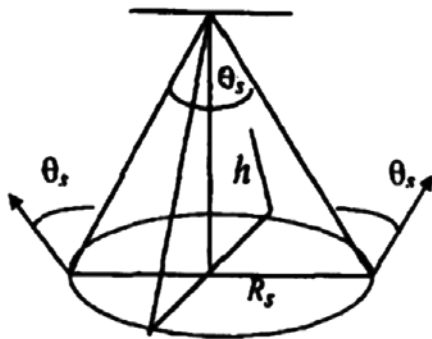


Рис. 10.4. Отражающая площадка дна

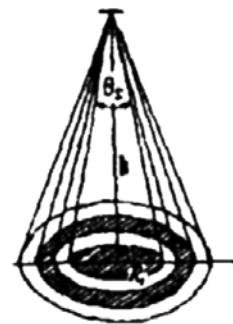


Рис. 10.5. Зоны Френеля

Из рис. 10.5 следует, что радиус первой зоны Френеля будет:

$$R_1 = \sqrt{\frac{\lambda h}{2}}.$$

Тогда согласно выражению для R_s и с учетом выражения для R_1 для углового размера θ_s отражающей площадки дна получим:

$$\theta_s = 2 \operatorname{arctg} \frac{R_s}{h} = 2 \operatorname{arctg} \frac{R_1}{h} \cdot 2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\lambda}{2h}}.$$

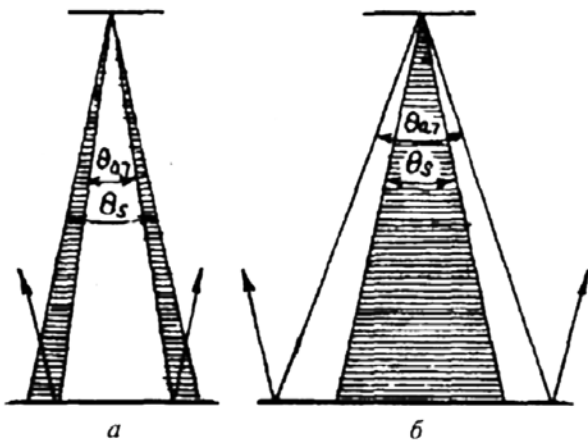


Рис. 10.6. Формирование эхосигнала по узкой (а) и широкой (б) характеристикам направленности антенны (первая зона Френеля заштрихована)

Но угловой размер отражающей площади определяет ширину индикатрисы рассеяния, что видно из рис. 10.6. Тогда можем утверждать, что если эффективная ширина характеристики направленности антенны, в качестве которой допустимо взять значение $\theta_{0,7}$ больше углового размера θ_s отражающей площади дна, то индикатриса рассеяния не будет зависеть от ширины характеристики направленности антенны, т. е. будет иметь одну и ту же угловую ширину. Значит, отражающие свойства дна не будут зависеть от ширины характеристики направленности антенны. Но если характеристика направленности антенны узкая, так что ширина ее меньше углового размера отражающей площади дна, то индикатриса рассеяния и отражающие свойства дна вообще будут

зависеть от ширины характеристики направленности антенны (рис. 10.7).

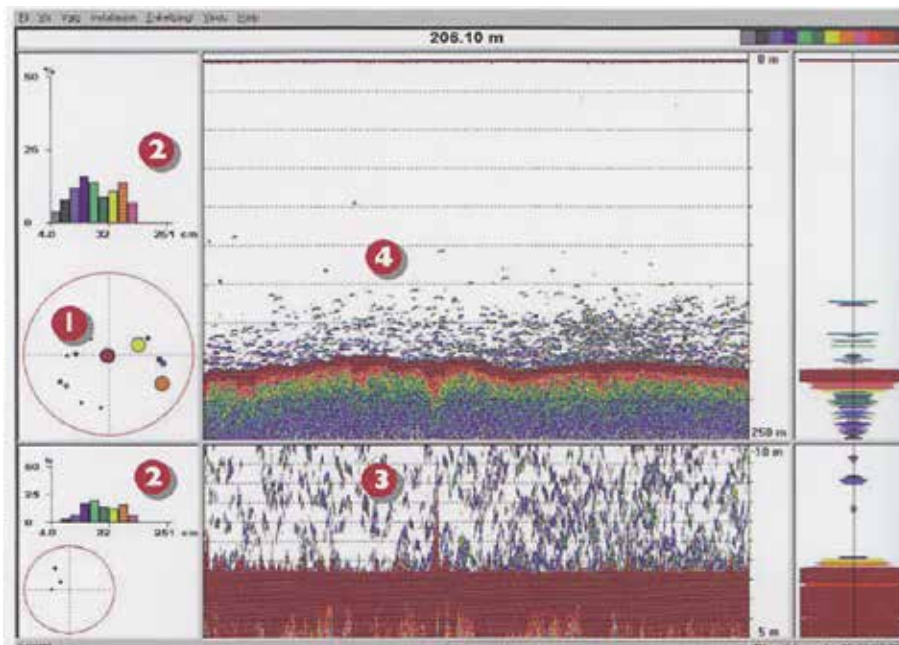


Рис. 10.7. Отображение информации на экране многоцветного дисплея современного промышленного эхолота вертикального действия:

1 – положение отдельных рыб в пределах зоны действия; 2 – гистограммы размерного распределения обнаруженных рыб; 3 – эхограмма с придонного слоя; 4 – эхограмма с обзорного диапазона

Если поверхность дна неровная, то зеркально-отраженная компонента результирующего отраженного акустического поля по-прежнему формируется площадью дна, имеющей размеры порядка площади первой зоны Френеля. Но рассеянная компонента формируется неровностями дна, расположенными и вне первой зоны Френеля. Поэтому в реальности отражающая площадь дна скорее всего занимает промежуточное положение между первой зоной Френеля и всей озвученной площадью. При узких характеристиках направленности антенны рассеивающие свойства дна моря зависят от ширины характеристики направленности антенны, а при широких характеристиках такой зависимости наблюдаться не будет.

Следует отметить, что формула (10.8) может быть использована только для оценочных расчетов, т. к. не учитывает зависимость величины β от солености и температуры воды.

В вышеуказанной работе также приводятся выражения для оценки эхосигналов от других подводных объектов и соответствующие зависимости напряжения на выходе антенны от дистанции, в частности, от траловой доски, от мешка трала с рыбой и др. По результатам проведенных расчетов в работе предполагается возможность обеспечения контроля наполнения мешка трала рыбой в ряде случаев и непосредственно с траулера.

В то же время экспериментальные исследования по локации трала с судна с помощью гидролокатора кругового обзора комплекса ИКТЛ японской фирмы Фуруно, проведенные в 1989 г. автором при промысловых тралениях ставриды в ЮВТО, показали сложность выделения с судна эхосигналов от мешка трала с рыбой с помощью гидролокатора [Кудрявцев, 2013]. Дополнительные ограничения могут быть связаны также с рефракцией, особенно при больших расстояниях между судном и тралом.

Более целесообразным представляется обеспечение непрерывного (не дискретного, как в уже применяемых приборах) контроля степени наполнения мешка трала рыбой (может быть реализовано практически при всех условиях применения) с помощью горизонтальной высокочастотной локации его зоны от начала мешка по запускающим сигналам с судна или с верхней подборы трала (в связи с небольшой протяженностью зоны акустического зондирования) [Кудрявцев, 1992].

10.3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЭХОЛОКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Хотя все гидроакустические эхолокационные приборы (активного действия), применяемые в рыбном хозяйстве, базируются на методе эхолокации, они различаются по принципу работы, назначению и применению. Наиболее широкую группу составляют рыбопоисковые приборы вертикальной и горизонтальной эхолокации. В основном они используются в промышленном рыболовстве для поиска, обнаружения рыбы и при ее облове, а также при количественной оценке состояния запасов гидробионтов.

10.4. РЫБОПОИСКОВЫЕ ПРИБОРЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ

Наибольшее распространение имеет гидроакустическая рыбопоисковая аппаратура вертикального действия, обеспечивающая зондирование водной среды под килем судна в вертикальном направлении. В ней осуществляется периодическое излучение импульсов акустических колебаний в направлении грунта генераторным устройством с помощью антенны. Приходящие от объектов и неоднородностей водной среды под судном отраженные сигналы (эхо) принимаются антенной (обычно одной, работающей как на излучение, так и на прием) и воспроизводятся на оконечных устройствах аппаратуры, в настоящее время на электронных дисплеях, в основном многоцветных, обеспечивающих последовательное отображение эхосигналов (панорамное их отображение) на экране. Обычно на том же экране дисплея предусматривается и отображение эхосигналов текущего цикла лоцирования с разверткой типа А и амплитудной отметкой.

Расстояние до отражающих объектов определяется исходя из промежутка времени от начала излучения импульса локации до приема эхосигнала.

Рыболокаторы вертикального действия в общем случае наиболее просты по устройству. Благодаря панорамному отображению принимаемых эхосигналов они не требуют постоянного присутствия оператора у экрана дисплея аппаратуры, что облегчает их эксплуатацию [Кудрявцев, 1968, 1972, 1975]. Развитие электроники и особенно микроэлектроники способствовало существенному уменьшению их габаритов, отображению на экране цветного дисплея различной дополнительной информации.

В то же время многие рыболокаторы такого типа, особенно предназначенные для средних и крупных промысловых судов, содержат ряд дополнительных узлов и устройств, иногда достаточно сложных, повышающих эффективность аппаратуры при промышленном и других применениях (будут рассматриваться далее). Акустические антенны в таких приборах устанавливаются обычно стационарно заподлицо в корпусе судна или снаружи его на штангах, однако в некоторой аппаратуре предусматриваются специальные подъемно-опускные или выдвижные устройства, обеспечивающие вынос антенны на определенное расстояние от корпуса судна в основном для снижения влияния аэрированного пузырькового слоя на работу аппаратуры при большом волнении моря.

На рис. 10.7 представлено отображение информации (оцифрованной) современной промышленной аппаратуры вертикальной локации на экране дисплея: эхограммы в обзорном и расширенном диапазоне отображения с «привязкой» к дну (в центре), гистограмма размерного распределения рыб в обзорном и расширенном диапазонах (слева вверху и внизу, соответственно), амплитудные отметки эхосигналов в послед-

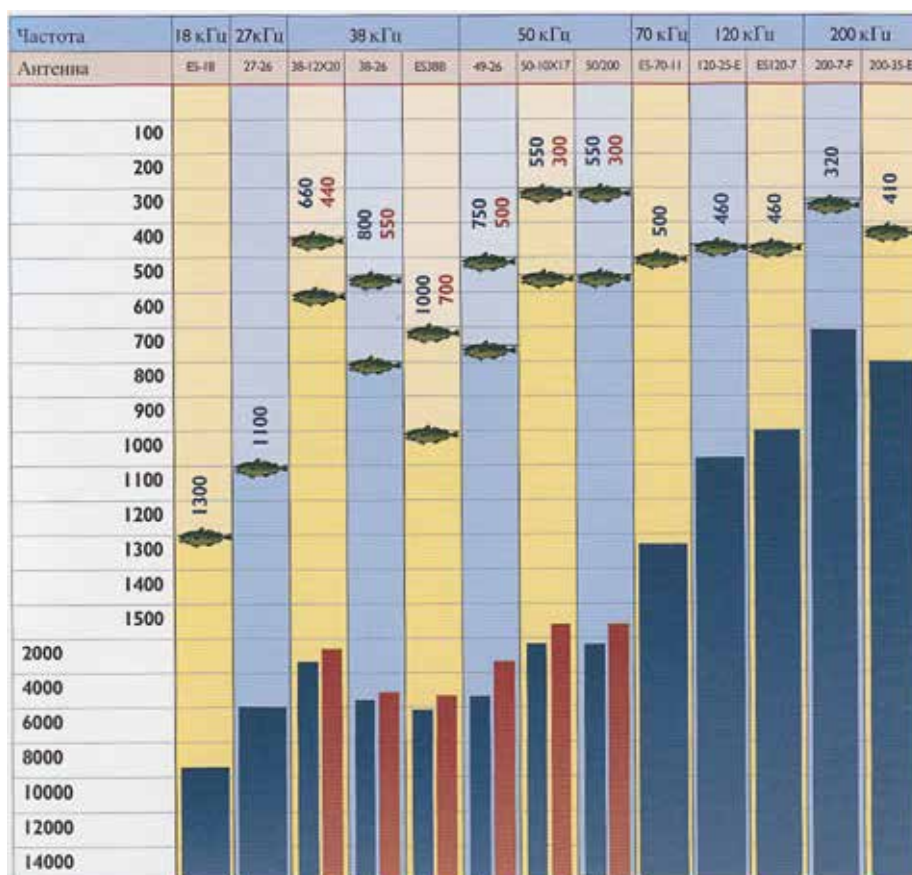


Рис. 10.8. Глубины обнаружения отдельной трески длиной 60 см и дна на рабочих частотах 18, 27, 38, 50, 70, 120 и 200 кГц аппаратурой вертикальной локации ES60 норвежской фирмы Симрад (красный цвет – работа со встроенным генератором мощностью 1 кВт, синий – с внешним генератором мощностью до 2 кВт на частоте 18 кГц, до 3 кВт на 27 кГц, от 2 до 4 кВт на 38 кГц и до 2 кВт на 50 кГц)

нем цикле лоцирования в обзорном и расширенном диапазонах (справа вверху и внизу, соответственно).

На рис. 10.8 представлена диаграмма глубин обнаружения отдельных рыб (трески длиной 60 см) и дна на разных частотах аппаратурой вертикальной локации ES60 норвежской фирмы Симрад.

В современной рыбопоисковой аппаратуре вертикальной локации начинают широко использоваться алгоритмы количественной оценки промысловых объектов: эхоинтегрирование и эхосчет. Основным представителем этого класса приборов можно считать промысловый эхолот ES60 фирмы Simrad. На экран графического дисплея этой промысловой рыбопоисковой аппаратуры может быть выведено специальное окно, в котором отображаются текущее числовое значение параметра S_a и гистограмма распределения промысловых объектов по силе цели TS .

Параметр S_a является результатом эхоинтегрирования значений поперечного сечения обратного объемного рассеяния звуковой энергии, приходящихся на единицу площади горизонтальной проекции обследуемого слоя [Гаврилов и др., 2003], приведенное к площади в одну квадратную морскую милю. Расчет параметра S_a может быть выполнен в соответствии со следующим выражением [Гаврилов и др., 2003]:

$$S_a = 4\pi r_0^2 \text{mean} \int_{r_1}^{r_2} S_v dr \times (1852 \text{ м/миль})^2, \quad (10.09)$$

где r_0 – эталонное (опорное) расстояние для силы обратного рассеяния S_v (принимается равным 1 м); mean – оператор расчета среднего арифметического значения результатов интегрирования на заданном интервале пройденного судном пути; S_v – сила обратного объемного рассеяния на текущей дистанции; r_1 – дистанция от антенны до верхней границы обследуемого слоя; r_2 – дистанция от антенны до нижней границы обследуемого слоя.

Так как расчет силы обратного объемного рассеяния в аппаратуре ES60 выполняется в логарифмических единицах (дБ), а для интегрирования в соответствии с формулой (10.09) необходимо использовать линейные единицы параметра S_v , то необходимо выполнять преобразование в соответствии со следующим выражением:

$$S_v = 10^{\frac{S_v^*}{10}}, \quad (10.10)$$

где S_v^* – логарифмическое значение силы обратного объемного рассеяния, выраженное в дБ.

Определенный интеграл, входящий в состав выражения (10.9), может быть рассчитан по методу прямоугольников [Бронштейн, Семендяев, 1962; Дьяконов, 1989] как сумма выборок силы обратного объемного рассеяния, умноженная на интервал дистанции между этими выборками. Эта операция может быть записана в виде следующего выражения:

$$\int_{r_1}^{r_2} S_v dr = \Delta r \sum_{r_1}^{r_2} S_{Vi}, \quad (10.11)$$

где Δr – интервал дискретизации эхосигналов; S_{Vi} – сила обратного объемного рассеяния, рассчитанная для i -й выборки по дистанции.

Расчет параметра S_{Vi} в эхолотаторе ES60 выполняется в соответствии со следующим выражением [Гаврилов и др., 2003]:

$$S_{Vi} = \frac{W_r 32\pi^2}{W_l G_0^2 r_0^2 \lambda^2 c \tau \psi} \cdot r_i^2 \cdot 10^{0,0002\beta r_i}, \quad (10.12)$$

где Wr – принятая с дистанции r_i акустическая мощность эхосигнала, отнесенная к поверхности антенны; r_i – дистанция, соответствующая i -й выборке эхосигнала; β – коэффициент затухания звука, дБ/км; W_t – излученная акустическая мощность, отнесенная к поверхности антенны; G_0 – максимальное усиление антенны; λ – длина звуковой волны; τ – длительность зондирующего импульса; ψ – двойной телесный угол эквивалентной характеристики направленности антенны.

Анализ демонстрационной версии программного обеспечения эхолотатора ES60 показал, что вычисление среднего значения определенного интеграла из выражения (10.9) выполняется в два этапа [Кудрявцев, 2001]:

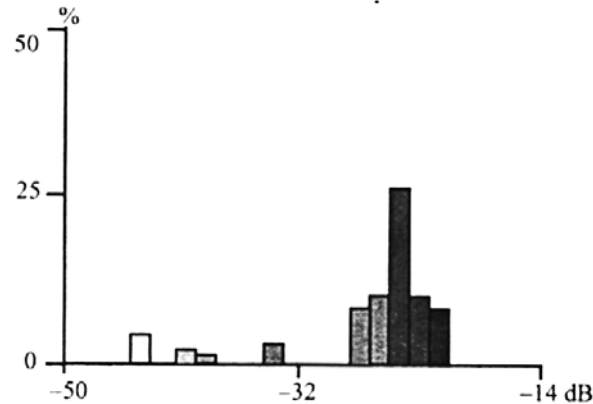


Рис. 10.9. Пример гистограммы распределения промысловых объектов по силе цели TS , отображаемой на экране графического дисплея эхолотатора ES60

1) рассчитывается среднее значение интеграла по результатам его расчета за n последних циклов зондирования, при этом число n определяется как $1/10$ от количества всех циклов зондирования, отображаемых по всей установленной ширине эхограммы;

2) рассчитывается среднее значение интеграла по десяти ранее накопленным при перемещении эхограммы средним значениям, рассчитанным ранее при выполнении первого этапа.

Отображаемая на экране графического дисплея эхолота ES60 гистограмма распределения промысловых объектов по силе цели TS в общем случае имеет вид, представленный на рисунке 10.9.

Максимальное количество отображаемых столбиков гистограммы равно 24. Каждый столбик гистограммы соответствует динамическому диапазону эхосигналов в 1,5 дБ, что обеспечивает охват гистограммой динамического диапазона силы цели в 36 дБ. Начальное значение шкалы TS устанавливается с помощью электронного меню. Построение гистограммы основывается на расчете для каждой дискреты дистанции силы обратного рассеяния от точечного объекта в соответствии с выражением [Гаврилов и др., 2003]:

$$S_{pi} = \frac{W_r 16\pi^2}{W_t G_0^2 r_0^2 \lambda^2} \cdot r_i^4 \cdot 10^{0,0002\beta r_i}, \quad (10.13)$$

где G_0 – усиление антенны в направлении на точечный объект.

При построении гистограммы полученная из выражения (10.13) величина преобразуется в силу цели TS :

$$TS = 10 \log(S_{pi}). \quad (10.14)$$

В каждом цикле излучения-приема в полученном множестве значений TS осуществляется поиск эхосигналов от одиночных целей. Для этого отыскиваются пиковые значения величин TS , и для каждого пикового значения анализируются две величины TS (предшествующая и последующая), отстоящие от пиковой на половину длительности зондирующего импульса. Если обе эти величины меньше пиковой на 6 дБ, то принимается решение, что эта пиковая величина является эхосигналом от одиночной цели (рыбы). После корректировки величины пиковой TS на уровень характеристики направленности в направлении на цель определяется номер столбика гистограммы, соответствующего откорректированной величине TS , и значение счетчика этого столбика гистограммы N_i увеличивается на единицу. После окончания анализа всего множества

значений TS текущего цикла излучения-приема рассчитываются высоты (в процентах) каждого столбика гистограммы M_i в соответствии со следующим выражением:

$$M_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^{24} n_j} \times 100. \quad (10.15)$$

В эхолокаторе ES60 предусмотрена возможность отображения распределения одиночных рыб по длине их тела или по их массе с соответствующим переключением шкалы горизонтальной оси гистограммы. Анализ демонстрационной версии программного обеспечения эхолота ES60 показал, что перевод значений TS в значение длины тела рыбы основан на следующей известной [Ермольчев, 1999; Мамылов, 1999; Szczucka, 2002] эмпирической зависимости:

$$TS = 20 \log L_p - k_n, \quad (10.16)$$

где L_p — длина тела рыбы, см; k_n — константа, определяемая видом рыбы.

Из выражения (10.16) следует, что длину тела рыбы для конкретной величины TS можно рассчитать по следующей формуле:

$$L_p = 10^{(TS + k_n)/20}. \quad (10.17)$$

Для оценочного расчета массы рыбы ее можно представить в виде параллелепипеда, длина которого равна L_p . Так как высота рыбы для многих рыб составляет в среднем $0,2L_p$, а толщина $0,05L_p$ [Юданов, 1992], то высоте и толщине параллелепипеда можно присвоить эти же значения. Если принять плотность параллелепипеда (плотность тела рыбы) равной плотности воды 1000 кг/м^3 , то для массы рыбы с учетом того, что ее длина измеряется в сантиметрах, можно получить следующее выражение:

$$M_p = 0,00001 L_p^3. \quad (10.18)$$

10.5. РЫБОПОИСКОВЫЕ ГИДРОЛОКАТОРЫ

Основным недостатком эхолокаторов, обеспечивающих зондирование только в вертикальном направлении, является малая просматриваемая зона и невозможность обнаружения объектов в окружающем судно пространстве и наблюдения за ними, т. к. эти приборы осуществляют поиск, регистрацию и индикацию объектов лова только в сравнительно небольшом объеме водной среды под килем судна. Основное тактическое отличие гидролокаторов состоит в наличии значительно большей зоны обзора. Они позволяют получать информацию обо всей подводной обстановке вокруг судна. Это достигается установкой акустических антенн в специальных поворотно-выдвижных устройствах (ПВУ), обеспечивающих разворачивание антенн в горизонтальной плоскости на угол до 360° и в вертикальной плоскости на угол до 90° (иногда и больше), и, следовательно, зондирование всей нижней полусферы водного пространства. Кроме того, ПВУ служит для выдвижения антенны ниже корпуса судна.

Применение гидролокаторов в рыбном хозяйстве началось с систем с гидроакустическими антеннами, имеющими однолепестковые характеристики направленности и с помощью электромеханических блоков управления изменяющими свое положение в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Основными недостатками гидролокаторов с однолепестковыми характеристиками направленности антенн и электромеханическим сканированием акустической антенны при ведении поиска рыбы являются малая скорость обследования окружающего водного пространства, наличие значительных непросматриваемых участков (так называемых мертвых зон), особенно при движении судна при поиске со значительной скоро-

стью (из-за большой длительности цикла обзора обстановки вокруг судна однолепестковой аппаратурой).

При обнаружении косяка или скопления рыбы оператору необходимо затратить определенное время на оценку этого скопления (т. к. даже только для обнаружения косяка в большинстве случаев недостаточно одного цикла зондирования), в связи с чем необходимо, как правило, снижать скорость судна. Скорость обследования района будет еще больше сокращаться. Если оператор будет проводить оценку обнаруженного скопления на поисковой скорости (не снижая ее), то увеличится объем непросматриваемого пространства. В случае обнаружения нескольких косяков при наличии станции с однолепестковой характеристикой ситуация еще более усложняется.

При оперативном использовании гидролокаторов на добывающем судне во время облова также возникает ряд трудностей как в процессе выхода судна на обнаруженное скопление (косяк) и подхода к нему, так и непосредственно при облове. Во-первых, из-за малой скорости обзора такой станцией оператору при обнаружении нескольких косяков часто сложно выбрать из них наиболее пригодный для облова. Качественная оценка скоплений посредством последовательного зондирования вначале одной цели (и воспроизведения отраженных от нее сигналов на индикаторе), затем второй и т. д. (особенно, если они находятся на разных дистанциях и под различными курсовыми углами) требует больших затрат времени, которого часто не хватает при промысловой работе. Качественная оценка и анализ в данном случае осложняются и неодновременностью получения информации, т. е. приема и регистрации эхосигналов от разных косяков. Оператор в общем случае должен запоминать данные о предыдущих скоплениях, что приводит к большей субъективности оценки.

Кроме того, если оператор по каким-либо признакам выбрал косяк рыбы, по его мнению, наиболее пригодный для облова, и судно начинает подходить к нему, то оператор практически может следить только за этим косяком. Он определяет параметры косяка (ширину, протяженность, плотность, относительную глубину нахождения и т. д.) и не имеет возможности одновременно наблюдать за другими целями, тем более, что скопление рыбы не является неподвижным объектом. Оно может изменить свое положение по глубине, переместиться в горизонтальной плоскости (иногда достаточно быстро), разделиться на два или несколько косяков и т. д. В связи с этим, если при движении судна к обнаруженному косяку оператор будет какое-то время отвлекаться для наблюдения за другой целью, он может потерять ранее обнаруженное скопление. В то же время при приближении судна косяк может рассеяться или «рассыпаться» и нужно будет вновь заниматься поиском. Если бы в процессе подхода к выбранному косяку имелась возможность не только следить за ним, но и одновременно наблюдать за подводной обстановкой вокруг судна, эффективность лова могла бы быть существенно повышена.

Далее в процессе облова косяка рыбы, например, кошельковым неводом, с помощью рыболокационной станции постоянно определяется расстояние до него, осуществляется слежение за кромкой скопления и т. д. Замет невода обычно проводится на полном ходу судна в течение очень короткого промежутка времени. Проведение замета на полной скорости судна приводит к необходимости работы гидроакустической аппаратуры при высоком уровне шумов, в т. ч. увеличиваются и гидродинамические помехи не только за счет большой скорости, но и вследствие изменений курса судна. Для удержания кромки скопления (т. е. эхоконтактов с кромкой косяка) при помощи обычной однолепестковой аппаратуры при таком быстром изменении обстановки, которое имеет место при кошельковании (из-за быстрых изменений курса судна, перемещения косяка рыбы, обычно пугающегося шумов судна и т. д.) и большом уровне помех, требуется большой опыт оператора. Потеря в данном случае эхоконтакта с косяком хотя бы на небольшой промежуток времени часто приводит к пролову (к пересечению косяка и, следовательно, к его «рассыпанию» и т. д.).

Для более четкого определения границ скопления и удержания кромки косяка при замете целесообразно применение более узких характеристик направленности и более

высоких частот с целью повышения разрешающей способности по углу и уменьшения уровня шумов. Однако наличие узких характеристик еще более увеличивает трудности поддержания эхоконтакта с целью при быстром и часто взаимном относительном перемещении судна и косяка рыбы, особенно при волнении моря и при облове быстро движущихся объектов промысла, например, скумбрии, тунцовых. Для облегчения работы оператора и более эффективного облова целесообразно в процессе замата регистрировать (видеть) в каждый момент времени не только кромку косяка, но и весь косяк, его очертания, перемещение и т. д. Для облегчения этой стадии операции облова, а именно процесса проведения замата невода с помощью рыболокационной станции в подобной аппаратуре предусматривались электронные индикаторы с вращением линейной развертки синхронно с поворотом характеристики направленности в определенном заданном секторе и встроенные репиторы гирокомпасов [Кудрявцев, Подлипанов, 1975].

Встроенные по периметру экрана индикатора репиторы гирокомпаса позволяли более быстро находить косяк при его временных пропадающих во время эволюций судна, т. к. пеленг на косяк будет в любом случае меняться значительно меньше, чем курсовой угол на него при замате. Указанные индикаторы за счет ЭЛТ с длительным послесвечением позволяли получать изображение эхо-отметок косяка (на экране с некоторой дискретностью просматривался весь последовательный ряд отметок эхосигналов от всего косяка) при однолепестковом последовательном обследовании его станцией (т. к. в данном случае можно использовать большую частоту посылок из-за малого расстояния до косяка при замате), благодаря чему облегчалась работа оператора на последней стадии лова (в процессе замата).

Тем не менее, полностью недостатки станций «прожекторного» типа при этом не устранялись, т. к. количество информации, получаемой от станции в единицу времени, в данном случае не увеличивается (обзор остается последовательным). Подобная ситуация практически имеет место и при ведении прицельного разноглубинного тралового лова рыбы в толще воды. В этом случае требования к рыболокационной аппаратуре горизонтально-вертикального действия при поиске остаются такими же, как и при кошельковом лове или при разведке рыбы. При подходе к обнаруженному косяку и прицельном тралении также более целесообразно не только следить за первоначально выбранным скоплением, но и иметь возможность параллельного обзора пространства вокруг судна как для одновременного наблюдения за облавливаемым косяком на носовых и далее на траверсных и кормовых курсовых углах (при прицельном тралении не всегда необходимо проходить непосредственно над косяком — это зависит от конкретной подводной и надводной обстановки, дрейфа, течений, ветра и т. д.), так и для слежения за другими скоплениями впереди судна.

Это связано с тем, что при существующей промысловой обстановке траление одного косяка очень часто не позволяет получить достаточный промысловый улов. Кроме того, косяк может быть не захвачен тралом из-за ошибок в наведении или вследствие возможных перемещений косяка в горизонтальной и вертикальной плоскостях за время подхода трала к косяку, неточного учета дрейфа, течений и других факторов. В связи с этим при наведении трала на обнаруженный косяк в общем случае также необходимо одновременно вести наблюдение и за подводной обстановкой впереди судна, чтобы после траления по одному скоплению при необходимости можно было без дополнительных затрат времени выходить на следующее скопление и т. д. При наличии обычной аппаратуры с однолепестковой характеристикой направленности и электромеханическим ее сканированием трудно достаточно успешно выполнять все указанные выше задачи [Кудрявцев, 1975].

По этим причинам и ряду других (о которых будет сказано ниже) в широком масштабе проводились работы по созданию и совершенствованию нового типа рыболокационной аппаратуры горизонтального действия — станций с большой скоростью обзора водной среды, а именно, электронно-сканирующих гидролокаторов (с внутриимпульсным сканированием характеристики направленности акустической антенны) од-

новременного (более точно – квазиодновременного) обзора всей обстановки вокруг судна или в заданном секторе [Tucker, 1967]. В аппаратуре же с дискретным или плавным электромеханическим разворотом антенны осуществляется сканирование не в пределах импульса локации, а в пределах периода времени между последовательными тактами зондирования.

В настоящее время в основном применяются лишь многоканальные гидролокаторы панорамного обзора с внутриимпульсным сканированием характеристик направленности. Однако обязательным для большинства гидролокаторов остался слуховой индикатор.

10.5.1. Гидролокаторы одновременного панорамного обзора

В гидролокационных системах вопрос увеличения скорости обзора окружающего пространства приходится решать более сложными средствами, чем в радиолокации. Это связано с тем, что скорость распространения акустических колебаний в воде значительно меньше скорости распространения электромагнитных волн в воздухе (она равна 1,5 км/с и составляет примерно $1/200000$ от скорости распространения электромагнитных колебаний в воздухе). Если считать, что обычные радиолокаторы перекрывают диапазон дальностей от 10 до 100 км, то в подобной гидролокационной системе перекрываемые дистанции составят всего около $1/200000$ от расстояний, охватываемых в радиолокации, т. е. от 0,05 до 0,5 м. В действительности же даже от рыболокаторной аппаратуры требуется обзор на расстояниях до нескольких тысяч метров. Из этого следует, что принципы построения и работы обычных радиолокационных систем к гидроакустическим неприменимы. В связи с этим задачи повышения скорости обзора (обследования) водной среды в гидролокации решаются несколько иными техническими средствами, чем в обычной радиолокации. Решение этих задач, как правило, связано с существенным усложнением электронных схем аппаратуры, увеличением количества электронных элементов, значительным усложнением акустических антенн и аппаратуры управления излучением акустической энергии и приемом отраженных сигналов, а также изменением других узлов. Хотя укрупненно основные блоки можно считать теми же самыми, что в эхолокационных устройствах простейшего типа.

Когда основными активными элементами гидролокационных систем являлись электровакуумные приборы, создание гидроакустической аппаратуры быстрого обзора водной среды для использования в рыбном хозяйстве сдерживалось значительными габаритами приборов, громоздкостью, существенным потреблением энергии питания, высокой стоимостью и недостаточно высокой надежностью при эксплуатации в тяжелых метеорологических условиях работы судов, а также некоторыми другими факторами технического порядка. Только благодаря прогрессу в области элементной базы электронных систем и особенно бурному развитию микроэлектроники, интегральных схем появилась возможность создания и широкого внедрения в практику рыбной промышленности гидроакустической аппаратуры быстрого обзора водной среды.

Рассмотрение принципов работы и построения таких систем можно начать с примера секторной электронно-сканирующей рыболокаторной аппаратуры с внутриимпульсным сканированием, разработка и создание которой (в основном для использования при рыбохозяйственных исследованиях) явились первым шагом в создании подобной аппаратуры для рыбной промышленности [Кудрявцев, 1978; Tucker, 1967].

На рис. 10.10 *a* показан принцип работы аппаратуры, имеющей различные характеристики при изучении акустической энергии и при приеме отраженных сигналов [Tucker, 1967]. В ней применены две акустические антенны – передающая (излучающая) и приемная. Передающая антенна имеет при излучении ширину характеристики направленности, равную угловой ширине заданного сектора обзора (в примере $30-60^\circ$). Характеристика направленности приемной антенны, наоборот, является очень узкой (в примере 1°) и во время приема эхосигналов быстро и постоянно перемещается

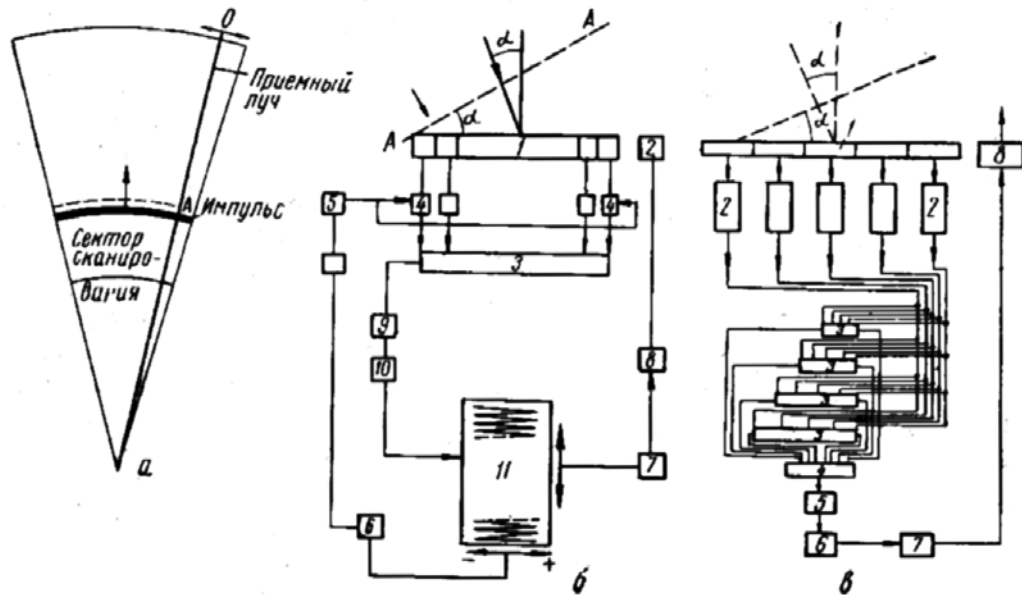


Рис. 10.10. Рыбопоисковые гидролокаторы с внутриимпульсным сканированием:

a — принцип действия аппаратуры секторного обзора с одновременным излучением в секторе; *б* — блок-схема станции секторного обзора [Tucker, 1967]; *в* — с веером статических характеристик

(сканируется) с очень большой скоростью (не сравнимой со скоростью электромеханического сканирования в обычной аппаратуре горизонтального действия) поперек сектора от одного его края до другого и обратно и т. д. Если, например, зондирующий импульс длительностью τ распространяется от акустической антенны в водной среде, занимая в какой-то произвольный момент времени пространство, ограниченное дугами (рис. 10.10 *a*, темная полоса), то любые объекты, находящиеся в данный момент в пределах указанной темной зоны-полосы, будут облучаться акустической энергией (озвучиваться).

Пусть далее в точке *A* находится какой-то точечный отражающий и рассеивающий акустические волны объект и узкая приемная характеристика пересекает вышеуказанную темную полосу в точке *A* в момент прихода эхосигнала от этого объекта к акустической антенне аппаратуры. Тогда указанный эхосигнал будет принят этой характеристикой, т. е. приемной антенной, и воспроизведен на индикаторе. Если приемная характеристика непрерывно перемещается поперек заданного сектора с такой скоростью, что она последовательно перекрывает всю ширину сектора, прежде чем излученный импульс (занимающий по ширине темное пространство) переместится дальше от акустической системы на свою полную длину в воде (т. е. в пределах промежутка времени, равного его длительности τ), то могут быть приняты и воспроизведены эхосигналы от всех объектов, находящихся в воде в пределах сектора сканирования и в пределах дальности действия аппаратуры, без каких-либо пропусков информации с этого сектора.

При меньшей скорости перемещения характеристики появляются пропуски в приеме отраженных сигналов. Это можно пояснить следующим образом. Будем считать для упрощения (не теряя физического смысла), что эхосигнал от объекта в точке *A* (рис. 10.10 *б*) принимается приемной антенной в момент пересечения ее характеристики с темной полосой, показывающей положение излученного импульса при его распространении в указанной точке *A*. Тогда, если приемная характеристика переместилась в положение *OA* в тот момент, когда зондирующий импульс уже переместился на свою длину в воде (показано пунктиром на рис. 10.10 *a*), эхосигнал не будет принят (при вышеуказанном допущении он будет уже позади антенны). Следует также учитывать, что если период времени одного поворота приемной характеристики от одного края

сектора до другого равен длительности импульса посылки, то от эхосигнала любого точечного объекта, находящегося в пределах темной полосы (рис. 10.10 *a*), будет получена только одна выборка длительностью примерно $\tau/60$ (в данном примере). Для получения большего числа выборок каждого эхосигнала необходимо сокращать промежуток времени одного поворота приемной характеристики.

В общем случае в электронно-сканирующей аппаратуре с вращающейся или перемещающейся характеристикой направленности акустическая система принимает только часть эхосигнала, длительность которого τ_{Π} определяется из соотношения

$$\tau_{\Pi} = \tau_0,$$

где τ_0 — общая длительность эхосигнала; θ° — ширина характеристики направленности приемной антенны (θ° — угловая ширина пространства, просматриваемая за один цикл локации).

В случае точечной цели и при одновременном круговом обзоре

$$\tau_{\Pi} = \tau(\theta^\circ/360),$$

где τ — длительность импульса зондирования.

Для более качественной оценки эхосигналов вероятно целесообразнее иметь несколько выборок от них, чем одну, хотя τ_{Π} при этом и остается одинаковым.

Таков упрощенный принцип работы аппаратуры одновременного обзора с внутриимпульсным электронным сканированием. Строго говоря, обзор получается не совсем одновременный, т. к. фактически он проводится в течение одного периода зондирования и изменяется в зависимости от заданной максимальной дистанции обнаружения (просмотра), но в сравнении с использованием обычных гидролокаторов время обследования значительно короче.

Так как в связи с необходимостью обеспечения высокой разрешающей способности по дистанции (требуемой во многих случаях применения гидролокаторов в рыбной промышленности) минимальная длительность излучаемого станцией импульса τ должна быть в пределах от одной до нескольких миллисекунд, а иногда и меньше 1 мс (для количественной оценки, при некоторых исследованиях, например, при исследовании структуры рыбных скоплений и др.), становится ясно, что осуществить движение приемной характеристики направленности от одного края сектора обзора до другого за такое время (например, 1 мс) в пределах приведенной величины сектора 60° (рис. 10.10 *a*) электромеханическим путем практически невозможно. Это может быть достигнуто только в случае использования чисто электронных устройств.

Структурная схема аппаратуры, реализующей указанный принцип действия электронно-сканирующей рыболокаторной аппаратуры секторного обзора, показана на рис. 10.10 *б*. Приемная антенна 1 имеет в n раз большую длину, чем передающая 2 и разделена на n секций, где n — количество приемных характеристик заданной ширины θ_1 в пределах выбранного сектора сканирования θ_2 , т. е. $N = \theta_2/\theta_1$. Если n этих секций соединить с находящимися на одинаковых расстояниях отводами линии задержки 3, то характеристика направленности отклонится на угол, зависящий от фазового сдвига в линии задержки (рис. 10.10 *б*). Если эхосигнал принимается от цели, расположенной под углом α относительно нормали к поверхности антенны, то фронт волны эхосигнала параллелен линии AA при достаточном удалении источника эхосигнала, когда волну можно считать плоской.

Эхо принимается первой секцией антенны раньше, чем оно достигает второй секции и т. д. (т. е. вначале оно достигает первой секции, затем последовательно n секций). Таким образом, эхосигнал, принимаемый следующими одна за другой секциями, задерживается по фазе относительно каждой предшествующей секции. Для получения максимального значения выходного сигнала для указанного направления прихода эхо под углом α необходимо включить в цепь линию задержки, компенсирующую фазовый сдвиг так, чтобы все компоненты (с каждой секции) суммарного выходного сигнала на-

ходились в одной фазе. При другом значении угла α будет другая величина фазового сдвига между соседними секциями антенны и требуется новая компенсация и т. д. При $\alpha = 0^\circ$ выходы всех секций находятся в одной фазе и компенсация не требуется. Таким образом, получающиеся фазовые сдвиги должны компенсироваться при отклонениях направлений прихода эхосигналов от нормали к антенне (как в одну, так и в другую сторону).

В общем случае компенсация фазового сдвига состоит в том, чтобы сдвинуть по фазе сигналы с выходов секций для получения результирующего сдвига между ними, равного $2\pi n$ (где n – целое число). Для осуществления компенсации фазовых сдвигов при приходе эха с различных направлений в пределах всего сектора обзора в схему аппаратуры введены блоки изменения частоты между секциями антенны и линией задержки (т. е. эхосигналы, принятые секциями антенны, поступают в схему станции с нарастающим сдвигом по фазе относительно друг друга). В связи с тем, что каждое звено линии задержки вносит в проходящий через него сигнал сдвиг фазы, равный $\varphi = \omega\sqrt{LC}$ (где ω – круговая частота сигнала, L и C – соответственно индуктивность и емкость задерживающего звена), то величина вносимого сдвига зависит от частоты. В связи с этим, если плавно изменять частоту сигнала, будет меняться величина вносимого сдвига фаз и, следовательно, направление компенсации. А это и соответствует изменению положения характеристики направленности приемной антенны. Каждая секция антенны соединяется с соответствующим отводом линии задержки через смесители 4, на которые подается частота общего гетеродина. Частота гетеродина 5 изменяется с помощью специального блока 6 развертки по азимуту (по направлению). В связи с этим частота преобразования на выходе смесителей будет изменяться по тому же закону, что и частота гетеродина. Соответственно будет изменяться частота сигнала, подаваемого в линии задержки (обычно по пилообразному закону).

Если линия задержки рассчитана таким образом, что получаемый в результате колебания преобразованной частоты дополнительный фазовый сдвиг изменяется в диапазоне указанного колебания частоты от отрицательных до положительных значений, то характеристика будет перемещаться от одного края сектора до другого за каждый период развертки по азимуту. Развертка по углу также отклоняет синхронно пятно электронного луча в блоке индикации слева направо. Одновременно второй блок развертки 7 по дистанции приводит к постепенному смещению пятна электронного луча снизу вверх со скоростью, пропорциональной скорости распространения звука. В результате общий характер перемещения пятна по экрану является зигзагообразным. Во избежание пропусков информации период изменения частоты гетеродина не должен превышать длительности излучаемых импульсов.

Аппаратура работает следующим образом. Тактовым импульсом запускаются генераторное устройство 8 и блоки развертки. Генераторное устройство вырабатывает электрический импульс, возбуждающий передающую антенну, которая излучает зондирующий импульс, распространяющийся в пределах всего выбранного озвучиваемого сектора. В блоке индикации начинается формирование зигзагообразной развертки. Одновременно блок развертки по углу управляет изменением частоты гетеродина по пилообразному закону и проводится быстрое сканирование приемной характеристики направленности. Если на пути импульса зондирования окажется отражающий или рассеивающий объект, эхосигнал от него поступит на приемную антенну и будет принят при определенном положении характеристики направленности, соответствующем направлению на указанный объект. Принятый эхосигнал с линии задержки поступает на усилительный тракт 9, затем после детектора 10 подается на блок индикации 11. Положение отметки на экране индикатора определяет ее координаты: по линии углов определяется направление на объект, а по шкале дистанции – расстояние до него. При наличии в обследуемом секторе нескольких целей эхо от них будет воспроизведено на экране в виде соответствующих яркостных отметок. Угловая разрешающая способность аппаратуры определяется шириной характеристики направленности приемной антен-

ны. Такой способ электронных перемещений характеристики носит название метода частотного сканирования.

Применяется и другой метод электронного сканирования приемной характеристики направленности с так называемой временной компенсацией, при котором используется n -ное количество линий задержек. Как было указано выше, введение одной линии задержки обеспечивает компенсацию антенны (как бы ее поворот на одно направление, перпендикулярное направлению прихода падающей волны) на одно положение фронта эхосигнала. Для другого угла падения акустических колебаний требуется введение другого фазового сдвига по всем элементам. Это может быть осуществлено подключением другой линии задержки, которая будет компенсировать сдвиг фазы колебаний секций антенны для второго направления прихода. Таким образом, для каждого направления требуются свои различные временные задержки в цепи каждой секции антенны. Временная задержка компенсирует разности времени прихода эхосигналов к каждой последующей секции (рис. 10.10), обуславливающие фазовый сдвиг колебания в каждой секции антенны. Соответственно, если выходной сигнал с предшествующей секции антенны задержать на промежуток времени, равный этой разности времени, то общий сигнал на выходе двух секций (с одной после задержки, а с другой непосредственно) будет равен их сумме.

Система с временной компенсацией показана на рис. 10.10 в. Приемная антенна 1 также разделена на секции (для упрощения на рис. 10.10 в представлена антенна из пяти секций). Выходы каждой секции через предварительные усилители 2 (которые имеются и в реальных системах первого рассмотренного варианта) подключаются к линиям задержки 3. В данной системе должно быть столько линий задержки, сколько требуется направлений приемной характеристики направленности. В реальных устройствах число направлений n берется из условий перекрытия всего заданного сектора θ_2 характеристиками необходимой ширины θ_1 , т. е. $N = \theta_2 / \theta_1$ (θ_1 на уровне 0,7) и n -му числу линий задержек +1. В приведенном примере используется четыре линии задержки на пять направлений. Пятым направлением является направление при угле падения, равном 0, т. е. по нормали к антенне. Как уже указывалось, в этом случае компенсации не требуется. Выходы линий задержек соединяются с электронным коммутатором направлений характеристики направленности 4, обеспечивающим быстрое последовательное подключение к основному усилителю 5 различных линий задержки 6, т. е. переключение направлений приемной характеристики.

В отличие от предыдущей системы в данном примере происходит не плавное, а дискретное изменение положения приемной характеристики, т. е. шаговый поворот, а при быстрой электронной коммутации направлений образуется как бы «веер» статических характеристик направленности. Индикатор 6 обеспечивает запуск генератора 7, возбуждающего антенну 8.

В случае формирования веера статических характеристик требуется большое число линий задержки, однако более эффективно, чем в аппаратуре с быстро вращающейся характеристикой, используется энергия принимаемых эхосигналов (благодаря «накоплению» в детекторных цепях каждого из направлений веера).

Для получения плавного перемещения характеристики направленности приемной антенны необходимо бесконечное число таких линий задержки (на каждое направление), что нереально. Поэтому выбирается их конечное количество и, следовательно, конечное число получаемых положений характеристики, т. е. сканирование имеет дискретный, ступенчатый характер.

Подобный принцип действия имеют и электронно-сканирующие гидролокационные станции кругового обзора, принципиальное тактическое отличие которых от станций предыдущего типа заключается в зоне одновременного обзора. В таких станциях зона просмотра равна 360° и в течение одного зондирования проводится обследование всей обстановки вокруг судна.

Существует ряд разновидностей электронно-сканирующей рыболокационной аппаратуры, различающейся по принципам построения и работы и по принципам излуче-

ния и приема акустической энергии. Во-первых, имеются станции с отдельными излучающей и приемной антеннами и с одной антенной, работающей в режиме как передачи, так и приема. Во-вторых, есть различия в методах излучения и приема. В одном крайнем варианте акустическая антенна при излучении в горизонтальной плоскости (плоскости обзора) является ненаправленной, а в вертикальной имеет определенную заданную направленность. При общей антенне для этого все ее элементы (секции) с помощью специальных коммутаторов приема-передачи одновременно подключаются к генераторному устройству (при цилиндрической антенне).

Прием отраженных сигналов осуществляется узкой приемной характеристикой направленности, которая после окончания излучения импульса лоцирования с большой скоростью автоматически вращается (перемещается) в горизонтальной плоскости (плоскости обзора). В этом случае для зондирования требуемого пространства необходима большая мощность излучения (и соответственно мощное генераторное устройство). В то же время имеется минимальная мертвая зона $l_{м.з.}$.

$$l_{м.з.} = c\tau_{и},$$

где c — скорость распространения звука; $\tau_{и}$ — длительность излучаемого импульса.

В другом крайнем варианте зондирование осуществляется с помощью электронного сканирования луча с узкой характеристикой направленности при излучении — последовательное зондирование (рис. 10.11 *a*).

В этом случае и в тракте передачи аппаратуры применяется блок задержек, подобный рассмотренному при получении веера статических приемных характеристик. Он обеспечивает временную компенсацию антенны для получения различных направлений зондирования. Аппаратура состоит из секционированной многоэлементной антенны (1), коммутаторов приема-передачи (6), соединяемых с каждой секцией антенны, усилителей мощности (5) для каждого образующегося при этом канала передачи, блока линий задержки (4), электронного коммутатора (3) (или переключателя) направления характеристики направленности в режиме излучения и задающего или возбуждающего генератора (2) (рис. 10.11 *a*).

Тракт передачи работает следующим образом. Возбуждающий генератор формирует электрический импульс, длительность которого равна длительности посылки в одном направлении. Электронный коммутатор через линии задержки подает этот импульс на усилители мощности. Так как для излучения в направлении, перпендикулярном к антенне, компенсация не нужна, то для этого направления импульс возбуждения без введения задержки одновременно поступает на все усилители мощности (5) и через коммутаторы приема-передачи на секции антенны. Происходит излучение в центральном направлении. Через промежуток времени, равный длительности импульса возбуждения, задающий генератор вырабатывает второй импульс равной длительности, предназначенный уже для обеспечения зондирования в направлении, отличном от нормального. Поэтому вследствие подключения коммутатором направлений соответствующих временных задержек (блоком разверток) импульс будет поступать на усилители мощности не одновременно, т. е. с определенным временным сдвигом на каждый из усили-

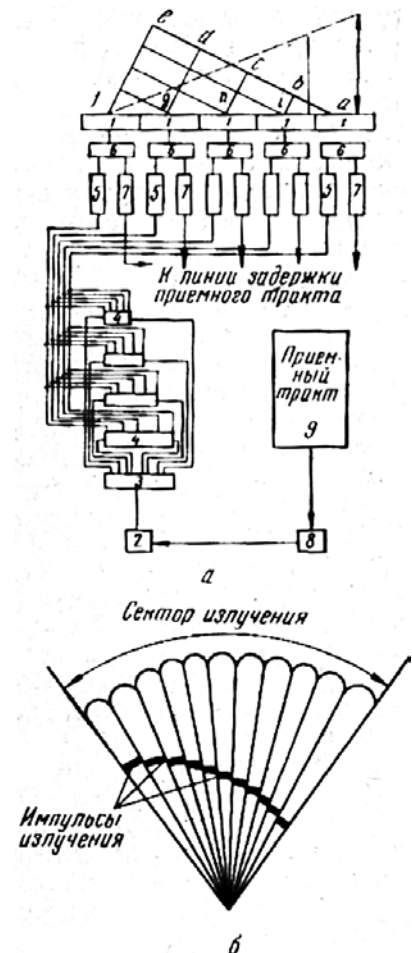


Рис. 10.11. Электронное сканирование в излучении:
a — блок-схема гидролокатора со сканированием в излучении; *б* — процесс сканирования

телей (в соответствии с включенным в данный период времени направлением компенсации). Например, для зондирования в направлении, перпендикулярном линии ae , на секцию f он будет поступать без временной задержки, на секцию g с некоторой задержкой по времени и т. д. С самым большим запозданием импульс поступает к секции a , где задержка должна быть равна времени прохождения звуком в воде расстояния fe . После второго импульса зондирования генератором формируется третий и т. д., т. е. излучается столько импульсов, сколько выбрано направлений зондирования (при практической реализации число требуемых линий задержки будет меньшим благодаря симметрии направлений излучения и приема относительно нормали к антенне).

В упрощенном виде процесс такого последовательного сканирования при озвучивании сектора показан на рис. 10.11 б (импульсы излучения показаны на некотором расстоянии от антенны при последовательности посылок от одного края сектора к другому; в зависимости от технической реализации системы процесс зондирования может начинаться, например, с излучения в центральном направлении и др.). После окончания цикла озвучивания пространства начинается прием эхосигналов такой же узкой характеристикой направленности, как и в предыдущих вариантах (с помощью усилителей (7) (рис. 10.11 а), приемного тракта (9), индикатора (8)). В данном случае существенно снижаются требования к мощности генераторного устройства. Однако усложняется конструкция коммутирующего устройства и, самое главное, образуется большая мертвая зона $l_{м.з.}$ вследствие увеличения общей длительности посылки станции, так как прием отраженных сигналов может быть начат только после окончания излучения импульса в последнем направлении озвучивания (особенно при большом числе направлений при излучении)

$$l_{м.з.} = c\tau_{и} m,$$

где m – число направлений зондирования.

Если, например, принять ширину характеристики направленности при излучении равной $\theta = 6^\circ$, то при круговом обзоре будет 60 направлений зондирования ($m = 60$) и при $\tau_{и} = 1$ мс $l_{м.з.} = 1500 \times 10^{-3} \times 60 = 90$ м. При $\tau_{и} = 10$ мс, $l_{м.з.} = 900$ м. Появляется также дополнительная погрешность в отсчете дальности до цели из-за неодновременности начала озвучивания каждого направления, а, как известно, в эхолокационных устройствах расстояние до объекта определяется посредством оценки времени от момента излучения импульса до прихода эхосигнала. Основным положительным свойством указанного способа остается резкое снижение необходимой мощности излучения для получения той же дальности, что и при одновременном озвучивании одинакового пространства (что, кроме того, не всегда возможно в случае линейной антенны из-за небольшой площади при широком секторе обзора).

В связи с указанными недостатками метод последовательного зондирования применяется в реальной аппаратуре только при небольшом количестве направлений излучения, т. е., если требуется осуществление быстрого просмотра обстановки в ограниченном секторе и увеличение мертвой зоны не имеет большого значения.

При больших секторах быстрого одновременного обзора и круговом обзоре также применяются промежуточные варианты. Широкое распространение при круговом обзоре, например, имеет вариант с одновременным излучением в трех узких направлениях, сдвинутых в горизонтальной плоскости (или плоскости обзора) относительно друг друга на 120° [New sonar, 1971, 1975; Кудрявцев, 1978], которые затем электронным способом сканируются в излучении с помощью коммутирующего устройства. После того как сканирование при излучении заканчивается, т. е. каждая из трех характеристик направленности при передаче переместится на 120° , все окружающее пространство в пределах 360° оказывается озвученным. После этого цикл передачи прекращается и начинается прием узкой быстровращающейся приемной характеристикой направленности как и в предыдущих вариантах. Мертвая зона по величине в три раза меньше, чем во втором варианте, но требуемая мощность генераторного устройства в три раза больше.

Могут быть и другие промежуточные варианты построения электронно-сканирующих рыболокаторов кругового обзора. Конкретное решение в каждом отдельном случае определяется требованиями, предъявляемыми к аппаратуре, ее назначением, необходимыми тактико-техническими параметрами, например, требуемой (или допустимой) мертвой зоной, максимальной дальностью действия, разрешающей способностью по углу и дистанции и т.д, сложностью и габаритами приборов, возможностью ее размещения на определенных типах судов и др.

В станциях одновременного кругового обзора с многоэлементными цилиндрическими акустическими антеннами используется, как правило, несколько отличающийся метод последовательного электронного сканирования характеристики направленности при излучении. Это возможно благодаря симметрии таких антенн в горизонтальной плоскости, а также вследствие того, что в формировании характеристики направленности цилиндрической антенны в каком-либо определенном направлении может участвовать только часть ее секций (относительно любого направления часть секций всегда будет находиться на обратной стороне антенны), называемая рабочим сектором антенны. Оптимальным рабочим сектором считается сектор с углом примерно 120° (рис. 10.12).

В отличие от рассмотренных выше вариантов устройств с линейными антеннами в случае цилиндрической антенны (а также для сферической и других антенн криволинейной формы) для формирования характеристики в направлении нормали к линии, соединяющей края рабочего сектора, требуется компенсация фазовых сдвигов колебаний отдельных преобразователей, т. к. при синфазном возбуждении всех секций 1–12 (рис. 10.12 *a*) рабочего сектора колебания каждой секции придут на линию AA, параллельную линии OO, с различными сдвигами фаз. Наибольший фазовый сдвиг будут иметь колебания крайних секций сектора 1, 12, который пропорционален времени прохождения акустической волны расстояния OA. Колебания секций 2, 11 будут иметь меньший сдвиг и т. д. Для получения волны с плоским фронтом в указанном направлении необходимо в цепи секций ввести электрические задержки, т. е. линию задержки с соответствующими отводами, которые не будут уже расположены вдоль линии задержки равномерно (как это было при сканировании характеристики направ-

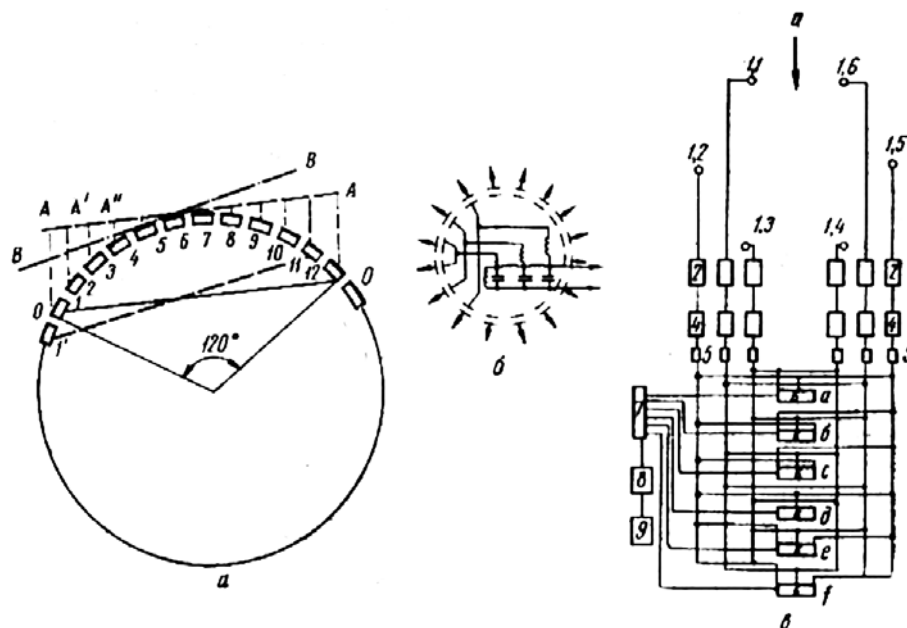


Рис. 10.12. Схема построения станции одновременного кругового обзора:

a и *б* — принципы формирования приемных характеристик в станциях кругового обзора; *б* — блок-схема формирования приемных характеристик: 1.1–1.6 — секции антенны; 2 — коммутаторы приема-передачи; 4 — предварительные усилители приемного тракта; 5 — развязывающие устройства; 6 — задерживающие цепи *a*–*f*; 7 — электронный коммутатор направлений; 8 — основной усилитель; 9 — индикатор

ленности линейной антенны), а будут пропорциональны расстояниям $0A$, $2A'$, $3A'$ и т. д. (в примере).

При подключении к секциям сектора подобной линии задержки реальный сегмент как бы переходит в линию, т. е. получаем линейную плоскую компенсированную антенну. Затем уже к ней могут быть применены рассмотренные выше методы электронного сканирования (поворота) сформированной характеристики направленности.

Таким образом, в данном случае будут необходимы уже линии задержки с несколькими другими параметрами, и общая задержка в цепи каждой секции будет равна сумме двух задержек: одной – для приведения криволинейной антенны к плоской и другой – для электрического поворота характеристики на заданный угол (для дуговой антенны в виде сегмента). Кроме того, при этом требуется компенсация даже для формирования характеристики по направлению, перпендикулярному линии, соединяющей края рабочего сектора антенны, т. е. при $\beta = 0^\circ$. Но как мы уже сказали, в цилиндрической антенне секции не заканчиваются в пределах показанного рабочего сектора, а распределяются по обе стороны приведенного сектора по всей окружности цилиндра. Если линию задержки переключить таким образом, что к ней будут подключены другие секции, а именно добавлена секция $1'$ и отключена секция 12 , то рабочий сектор займет другое положение в пространстве и нормаль к линии BB отклонится от нормали к AA на некоторый угол. Так как секции идентичны и антенна имеет круговую симметрию, то для компенсации нового рабочего сектора необходимы те же самые задержки, что и для предыдущего, т. е. одна и та же линия задержки. Характеристика направленности изменит свое направление или, можно сказать, это будет новая характеристика, идентичная первой, но имеющая другое направление.

При подаче импульса возбуждения через линию задержки с ее отводов снимаются соответствующие задержанные импульсы и поступают на усилители мощности, соединенные с каждой секцией антенны. При симметричном попарном расположении секций рабочего сектора антенны относительно нормали к линии необходимые задержки для каждой пары секций $1, 12, 2, 11$ и т. д. будут одинаковыми, поэтому общее число отводов линии задержки не нужно делать равным количеству секций (оно будет меньшим в 2 раза). Происходит излучение импульса в направлении нормали к линии AA . При поступлении следующего импульса возбуждения через эту же линию задержки задержанные импульсы с ее отводов будут поступать через усилители мощности, например, на секции $1'-11$, и излучение будет проводиться в другом направлении. При продолжении указанного процесса будет проведено последовательное озвучивание всего пространства вокруг судна или в некотором секторе. Таким образом, в данном случае поворот характеристики антенны при передаче обеспечивается с помощью одной линии задержки посредством последовательного ее подключения к соответствующим секциям антенны.

Из изложенного понятно, что для осуществления указанным методом электронного сканирования характеристик направленности в пределах определенного сектора необходимы дуговые антенны с угловым размером, превышающим величину сектора одновременного обзора (исходя из значения оптимального рабочего сектора антенны 120° получаемое превышение равно 120°). Так, например, при секторе одновременно обзора 180° угловой размер антенны должен быть 270° , а дополнительный разворот (до 360°) и наклон ее (от 0 до 90°) обеспечивался электромеханическим приводом обычного типа. В результате упрощается схема аппаратуры вследствие сокращения числа каналов, необходимых для наклона характеристик электронным способом.

Для плавного поворота характеристики направленности антенны при приеме, кроме рассмотренного метода частотного сканирования при секторном обзоре, в станциях кругового обзора специального назначения применялись бесконтактные вращающиеся коммутаторы с задерживающими цепями. Задерживающие цепи обеспечивают соответствующую компенсацию рабочего сектора антенны – формирование приемной характеристики направленности (аналогично рассмотренному выше для режима последовательного излучения). Для вращения сформированной узкой приемной характеристики

разные секции антенны необходимо подключать к звеньям задерживающей цепи поочередно в определенной последовательности.

Основное применение в рыболокационных ВВ станциях находят рассмотренные методы частотного плавного сканирования и быстрого дискретного подключения различных линий задержки. В станциях кругового обзора используется метод поворота характеристики при приеме с одной линией задержки и быстрым последовательным электронным ее подключением к секциям антенны (рис. 10.12 б) как и в случае сканирования при излучении. Может использоваться также и метод сканирования с n -ным количеством одинаковых линий задержки (вследствие симметрии антенны). В этом случае к группам секций акустической антенны (образующих в каждый момент времени некоторый, обычно одинаковый, рабочий сектор) постоянно подключены задерживающие цепи таким образом, что каждая группа имеет постоянно сформированную характеристику направленности, максимум которой определенным образом ориентирован в плоскости обзора, образуя отдельный приемный канал (рис. 10.12 в). При этом секции акустической антенны и присоединенные к ним звенья задерживающей цепи группируются так, что максимумы характеристики направленности каждой группы оказываются смещенными относительно максимумов соседних групп на определенный постоянный угол, а все сформированные характеристики вместе перекрывают все заданное пространство [Простаков, 1967; Кудрявцев, 1975, 1978]. Это достигается тем, что каждая следующая одинаковая линия задержки подключается к группе секций, отличающейся от предыдущей только на одну равную секцию, т. е. она подключается к группе, состоящей из одной новой близлежащей секции плюс все остальные секции предыдущей группы без последней крайней секции.

Поочередное подключение статически сформированных характеристик к входу основного усилителя аппаратуры осуществляется с помощью бесконтактного электронного коммутатора, состоящего из электронных ключей. При каждом переключении электронным коммутатором выходов линий задержки к каждой следующей группе как бы добавляется одна новая секция и отключается противоположная крайняя секция, входившая в состав предыдущей группы. Так как число секций, входящих в каждую группу, одинаково, а каждая группа смещена относительно предыдущей на одну секцию, то общее число приемных каналов оказывается равным числу секций акустической антенны. Следовательно, количество линий задержки также равно числу секций антенны.

При таком методе электронного сканирования требуется значительно большее число задерживающих цепей, чем при способе с одной линией задержки, однако упрощается система электронной коммутации, т. к. в данном случае необходимо только быстрое переключение одного выхода линии задержки в каждый момент. В первом же случае требуется одновременное переключение нескольких отводов линии задержки при каждом скачкообразном изменении положения максимума характеристики направленности.

Благодаря эффекту накопления в задерживающих и детекторных цепях также может быть достигнуто большее соотношение сигнал-шум при прочих равных условиях, так как в аппаратуре с быстро вращающейся характеристикой принимаются только короткие выборки приходящих эхосигналов. По остальным параметрам быстрое поочередное переключение смежных характеристик в общем равноценно быстрому плавному вращению характеристики, кроме некоторого ухудшения возможности эффективно слежения за перемещением обнаруженного скопления, оценки положения и удержания кромки косяка при облове. В случае кругового обзора веером дискретно переключаемых статических характеристик при переходе с одной характеристики на другую отсчитываемое значение углового положения границы скопления будет изменяться скачком (на ширину характеристики), особенно при слежении за косяком на больших дистанциях. При нахождении объекта посередине двух смежных характеристик эхосигнал от него будет воспроизведен с вдвое большей угловой шириной, чем в случае одной характеристики.

Для целей обнаружения объектов лова это обстоятельство не имеет существенного значения, однако рыболокационная система на промысловом судне служит также и средством обеспечения облова, когда необходима высокая разрешающая способность по углу при определении границ скопления, замете и т. д.

В связи с тем, что в рыболокационной технике кругового обзора для снижения стоимости аппаратуры, повышения ее надежности в работе, упрощения узлов и блоков стремятся использовать достаточно широкие характеристики направленности антенны при приеме, этому вопросу должно уделяться серьезное внимание. В специальной аппаратуре эта задача решается посредством увеличения числа каналов, что для рыболокаторов экономически невыгодно.

Для решения этих вопросов, а также для уменьшения дискретности приема эхосигналов по углу в современных рыбопоисковых гидролокаторах кругового обзора с дискретно вращающейся характеристикой направленности используются специальные схемные решения. Например, в аппаратуре ЛСС-30 (фирма «Ц-Тех», Канада) были применены устройства для дополнительного дискретного сканирования 10° -ной приемной характеристики в промежутках между двумя смежными положениями максимумов этой характеристики (в угловом промежутке 10° -ная характеристика имела еще около 16 дополнительных «шагов»). В гидролокаторе «Угорь» за счет применения устройства интерполяции, выполненного на элементах счетной техники (16 разрядов) «перешагивание» характеристики направленности в режиме приема составляло $0,6^\circ$ [Кобяков и др., 1986]. Применяются и специальные устройства для оперативного сужения характеристики направленности при оценке угловых координат обнаруженного скопления по мере приближения судна к нему, например, с использованием суммарных и разностных каналов. Использование в приемном тракте станции «Угорь» каналов суммы и разности позволяло индцировать на электронном индикаторе характеристику направленности шириной $2\text{--}3^\circ$ вместо 10° . В работе Кобякова и др. [1986] приведен принцип работы интерполятора ХН, основанного на изменении фазы результирующего сигнала с помощью амплитудной модуляции двух напряжений одинаковой частоты.

Время обследования водной среды вокруг судна в случае применения гидролокатора одновременного кругового обзора при дальности его действия, например 2000 м, примерно в 80 раз меньше, чем при использовании гидролокатора с однолепестковой характеристикой при электромеханическом ее сканировании. Для обеспечения быстрого обзора всего водного пространства вокруг судна в аппаратуре с электронным сканированием характеристики направленности в секторе, т. е. с одновременным секторным обзором¹ используется дополнительное электромеханическое вращение антенны [Кудрявцев, 1978]. Такие станции можно называть гидролокаторами секторно-шагового поиска. Путем механического разворота акустической антенны осуществляется просмотр пространства крупными секторами. Время обзора уменьшается во столько раз, во сколько сектор одновременного обзора шире одной характеристики направленности. С помощью электромеханического привода обычно осуществляется и наклон акустической антенны в вертикальной плоскости, как и в обычной однолепестковой аппаратуре.

В станциях электронно-секторного дискретного сканирования определение границ и удержание кромки скопления облегчается благодаря возможности осуществления с помощью электромеханического привода небольшого качания антенны (и соответственно сектора обзора). Сокращение времени обследования пространства позволяет увеличить объем информации благодаря получению дополнительных данных от быстро перемещающихся рыб и скоплений, а также одновременно отображать все цели, находящиеся в пределах дальности действия рыболокационной системы, приво-

¹ Вполне успешно применяется в некоторых видах лова (например, траловом), имеет меньшую стоимость и сложность устройства, чем станции одновременного кругового обзора, особенно с электронным наклоном характеристик направленности в вертикальной плоскости.

дит к увеличению числа эхоконтактов с любой целью, т. е. к увеличению вероятности правильного обнаружения, классификации и оценки объекта. Непрерывное наблюдение за любым из обнаруженных объектов и определение его координат не мешают получать информацию обо всех изменениях окружающей обстановки и о других объектах, скоплениях.

До сих пор рассматривались рыболокационные станции с электронным поворотом характеристики направленности только в горизонтальной плоскости. При достаточной дальности действия и ширине характеристики направленности такой станции в вертикальной плоскости порядка 15° она является вполне эффективным средством обнаружения рыбных скоплений. Однако при использовании ее в качестве оперативного средства получения информации о косяке в процессе облова (при уточнении глубины нахождения косяка, его вертикальной протяженности) наличия только горизонтального разворота характеристик недостаточно для получения всех сведений о скоплении, требуемых в процессе лова. Первые гидролокаторы горизонтального обзора с однолестковой характеристикой направленности не нашли применения при активных методах пелагического лова из-за отсутствия наклона акустической антенны в вертикальной плоскости и потребовалось сначала введение в станции дополнительного преобразователя с большим фиксированным наклоном по вертикали, а затем и специального механизма изменения наклона антенны в ПВУ, а также блока управления и контроля ее положением по вертикали в общем пульте управления и индикации.

Первые электронно-сканирующие гидролокаторы кругового обзора также не имели наклона характеристики направленности, поэтому их возможности при облове косяков, находящихся на больших глубинах, были ограничены. Далее такая возможность была предусмотрена, хотя это и было связано с серьезным усложнением аппаратуры. Электронный наклон характеристики направленности по вертикали достигается теми же средствами и способами, что и поворот ее в горизонтальной плоскости. Цилиндрическая антенна разделяется на секции не только по длине окружности цилиндра, но и по его образующей (каждая секция делится на n -ое количество подсекций по вертикали с соответствующим увеличением каналов в зависимости от требуемой дискретности и диапазона наклона) осуществляется компенсирование каждой вертикальной секции. Такая вертикальная секция по образующей цилиндра представляет собой фактически плоскую линейную антенну, поэтому предел электронного наклона характеристики направленности составляет, как правило, $45\text{--}60^\circ$.

В современных многоканальных рыбохозяйственных гидролокационных системах формирование последовательностей характеристик направленности антенн и управление их положением в водном пространстве реализуется в основном программными средствами². В результате в станциях со сферическими и цилиндрическими антеннами на отдельных участках экрана дисплея обеспечивается возможность реализации множества режимов отображения подводной обстановки: круговые в пределах 360° , круговой в пределах 180° + слуховой канал, круговой 180° + вертикальная локация, круговой 180° + вертикальный акустический разрез в пределах 180° , круговой 360° + вертикальный $60^\circ/90^\circ$ + вертикальная локация и т. д. При воспроизведении ситуации кругового обзора при данном угле наклона характеристик направленности имеются три режима отображения: с привязкой к курсу судна, с привязкой к направлению на север и режим истинного движения. В двухоконных режимах формируется два независимых гидролокационных изображения с собственными настройками режимов гидролокатора (рабочими частотами, диапазонами, углами наклона акустических лучей, коэффициентами усиления приемных трактов и др.). Такой режим идентичен поочередной работе двух гидролокаторов. Имеется также режим трассирования траекторий маркированных рыб, предназначенный для научных исследований. В этом режиме на экране дис-

² Следует отметить, что в специализированной радиолокационной аппаратуре применяются антенные решетки и программное формирование множества характеристик направленности.

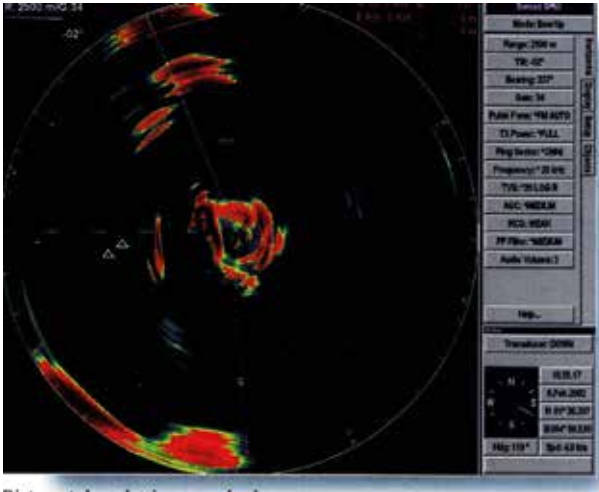


Рис. 10.13. Отображение эхосигналов от косяков рыбы на экране гидролокатора кругового обзора

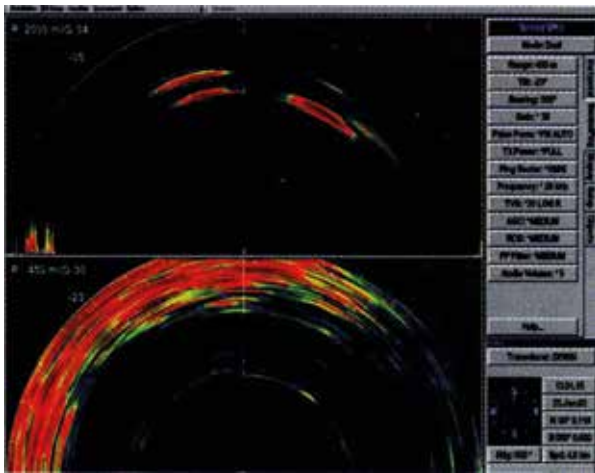


Рис. 10.14. Пример одновременного отображения эхосигналов от косяков (вверху) при различных углах наклона характеристик направленности (от дна при большем угле наклона)

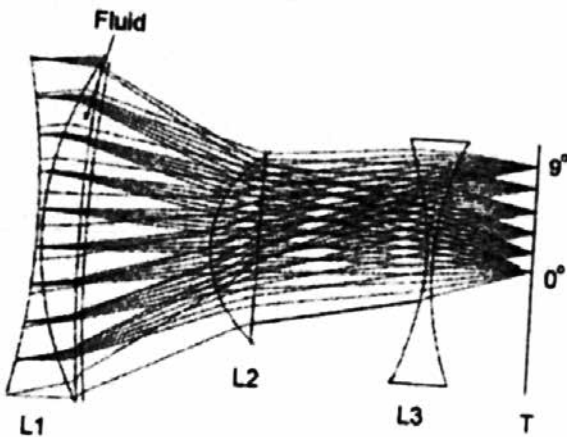


Рис. 10.15. Схема формирования сектора одновременного секторного обзора с помощью акустических линз

плек не отображаются эхосигналы и помехи, а только географические координаты рыб (в радиусе 5 км от судна – в SP70), в тела которых встроены микроэлектронные датчики, предусмотрена отдельная регулировка параметров гидролокатора для горизонтального и вертикального видов изображения. В состав антенны SP70 входит 241 гидроакустический преобразователь и, соответственно, столько же каналов имеет приемопередатчик. Датчики качки судна размещаются в электромеханическом блоке антенного устройства.

На рис. 10.13, 10.14 приведены некоторые примеры изображений совокупностей эхосигналов и другой информации на экранах дисплеев современных рыбопоисковых гидролокаторов.

Выпускаются также гидролокаторы секторного сканирования с акустическими линзами. На рис. 10.15 показана схема формирования одновременного секторного обзора с помощью акустических линз в высокочастотном (мегагерцевом) гидролокаторе DIDSON (США).

10.6. ЭХОЛОКАТОРЫ С БУКСИРУЕМЫМИ АНТЕННАМИ

Существующие эхолоты с так называемыми подкильными антеннами даже при значительном увеличении энергетических характеристик во многих случаях не могут дать существенного повышения реальной дальности обнаружения из-за гидрологических ограничений. Дополнительные ограничения на возможности эхолотов с подкильными антеннами накладывают повышенный уровень помех, возникающих при работе судна во время волнения моря, и экранирование антенн аэрированным слоем.

Задачи дальнего обнаружения рыбных скоплений и увеличения просматриваемого объема при различных гидрологических условиях водной среды могут быть решены путем применения гидроакустических эхолокационных систем, акустические антенны которых способны изменять свое положение по глубине: станций с буксируемыми антеннами. Гидроакустические рыболокаторные станции с антеннами, располагаемыми

в буксируемых носителях, имеют следующие преимущества перед аппаратурой с антеннами, установленными в корпусе судна:

- возможность обеспечения максимальной реальной дальности действия в различных гидрологических условиях, в т. ч. путем погружения антенн ниже слоя температурного скачка скорости звука (например, приповерхностного), на ось звукового подводного канала и т. д. При одинаковых энергетических характеристиках дистанции обнаружения объектов станциями с буксируемыми антеннами могут быть в 2–3 раза больше, чем аппаратурой с подкильными антеннами, вследствие возможности увеличения геометрической дальности, часто ограничивающей энергетическую;

- возможность повышения излучаемой акустической мощности при заглублении антенны.

Как известно, акустическое давление в воде, создаваемое антенной при постоянных ее параметрах и характеристиках (а также среды) увеличивается с повышением подаваемой на антенну электрической мощности только до определенного предела. После этого давление не повышается вследствие возникновения, как ранее указывалось, кавитационных процессов. При увеличении гидростатического давления указанный предел сдвигается пропорционально в сторону повышения. Например, на глубине 100 м он повышается примерно в 10 раз, на глубине 200 м – в 20 раз и т. д. Это позволяет дополнительно увеличить энергетическую дальность действия аппаратуры;

- уменьшение уровня шумовых помех, создаваемых рыбопромысловым судном (от гребного винта, обтекания, механизмов и др.), путем удаления акустической системы от судна и его источников шумов. При глубине хода антенны 150–200 м уровень шумовых помех на ее зажимах снижается до величин, которые примерно на порядок меньше получаемых при использовании подкильного варианта установки;

- уменьшение влияния шумов моря, возникающих вследствие волнения;

- уменьшение воздействия помех от кильватерной струи судна на работу буксируемой антенны в кормовом секторе судна;

- улучшение работы аппаратуры при большом волнении моря или после штормовой погоды путем заглубления антенны ниже аэрированного (пузырькового) слоя. Вынесение антенны под турбулентный слой, существующий вдоль его корпуса при движении судна, повышает эффективность станций и при нормальных метеорологических условиях;

- возможность достижения более стабильного положения характеристик направленности рыболокационной системы при волнении моря путем опускания акустической антенны в относительно спокойные слои воды;

- улучшение условий обслуживания антенн и их ремонта [Иванов и др., 1969; Кудрявцев, 1972].

Имеется и ряд специфических недостатков, присущих гидроакустическим системам с буксируемыми антеннами: необходимость использования специального кабель-троса с обтекателями для обеспечения достаточного заглубления носителя при сравнительно небольшой длине кабеля; применение специального буксировочного оборудования и наличие соответствующего места для размещения указанной аппаратуры. Однако, благодаря наличию важных положительных качеств применение таких систем, особенно на научно-исследовательских судах, является необходимым и вполне оправданным [Rusby et al., 1969, 1973, 1975]. Такая аппаратура могла бы найти применение и на рыбопромысловых судах.

Применение буксируемых в стороне от судна антенн весьма целесообразно также при поиске объектов лова и оценке состояния их запасов на малых глубинах и во внутренних водоемах, т. к. судно при своем движении обычно распугивает рыбу [Ганьков, 1970].

10.7. ОСНОВНЫЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭХОЛОКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Степень пригодности того или иного типа аппаратуры рыбохозяйственной гидроакустики для выполнения определенных задач, в т. ч. и для оснащения конкретного рыболовного судна или типа судов, определяется на основании оценки и анализа ее основных параметров и характеристик применительно к ее назначению, задачам, выполняемым судном, с учетом возможностей размещения приборов (особенно на малых судах). Определенное влияние на выбор аппаратуры оказывает и ее конструктивное исполнение, особенно при установке приборов на действующих судах. Еще большее значение имеет знание всех параметров и возможностей аппаратуры в случае ее использования в конкретных промысловых условиях при решении различных задач по обнаружению рыбы, при оценке показаний, эхограмм и при оперативном применении в процессе облова обнаруженного скопления, так как от этого во многом зависит ее эффективность.

Все параметры и характеристики средств рыбохозяйственной гидроакустики можно разделить на три основные группы: тактические, технические и эксплуатационные.

К тактическим в большинстве случаев относятся дальность действия, параметры, характеризующие возможности аппаратуры по обнаружению объектов и обеспечению наблюдения за ними: дальность и глубина обнаружения и регистрации – индикации объектов промысла, разрешающая способность по дистанции (или глубине) и углу, мертвая зона, зона действия аппаратуры, точность измерения глубины и дистанции, точность пеленгования, скорость обзора подводного пространства (объем водной среды, просматриваемый в единицу времени), разрешаемый элемент пространства, возможность разделения сигналов, отраженных от объекта вблизи дна и грунта (для донного и придонного лова и некоторых других применений), максимальный масштаб регистрации эхосигналов от объектов в пределах всего диапазона обнаружения прибора. К тактическим характеристикам рыбопоисковой аппаратуры можно отнести также возможность раздельной регистрации – индикации скоплений и косяков рыб (по дистанции и по глубине), а также регистрации скоплений придонных объектов.

В группу технических характеристик аппаратуры входят характеристики, обеспечивающие получение необходимых тактических параметров и определяющие соответствующие поисковые и другие возможности приборов: уровень сигнала, излучаемого аппаратурой в воду (или акустическое давление, создаваемое при посылке сигнала), чувствительность, рабочая частота, длительность излучаемых импульсов, к. п. д. акустических антенн, ширина характеристики направленности (в различных плоскостях), уровень боковых лепестков, скорость перемещения изображения по экрану дисплея, диапазоны измерения и регистрации, полоса пропускания и прямоугольность характеристики приемно-усилительного тракта, коэффициент усиления.

Технические характеристики являются до некоторой степени второстепенными для пользователей, однако они определяют тактические параметры, т. е. для обеспечения постоянства тактических параметров они должны поддерживаться на заданных уровнях и в определенных пределах, а в некоторых случаях, например, при отсутствии данных о некоторых тактических параметрах или сложности их непосредственного получения, оценка прибора или станции может быть проведена на основании ее технических характеристик. Например, дальность действия и глубина обнаружения вполне определенно могут быть охарактеризованы такими техническими параметрами, как величина акустического давления, развиваемого антеннами, и уровень помех в месте их установки. В связи с этим после постройки нового судна, установки новой аппаратуры на действующем судне или ее ремонта из-за сложности непосредственной оценки тактических характеристик дальности и глубины обнаружения часто проверяют только указанные технические параметры.

К последней группе относятся параметры, в основном характеризующие удобство и оперативность работы с аппаратурой, удобство расположения органов управления и контроля (особенно оперативных), наглядность и удобство отображения и регистрации (индикации) принимаемой информации, надежность работы, наличие встроенной системы контроля основных технических параметров, удобство доступа к узлам и блокам, а также габариты, масса, энергопотребление, конструктивное исполнение, определяющие возможности установки аппаратуры на судне, особенно действующем.

Перейдем теперь к рассмотрению отдельных характеристик.

10.7.1. Тактические параметры

Дальность действия (или глубина обнаружения) в большинстве случаев является одним из основных параметров гидроакустической рыболокаторной аппаратуры и определяется максимальным расстоянием по горизонту или по глубине, на котором может быть обнаружен промысловый объект. В связи с тем, что промысловым объектом и предметом обнаружения могут являться отдельные рыбы, разреженные скопления, плотные скопления различной степени концентрации и промысловые косяки, указанный параметр для данной конкретной аппаратуры задается обычно некоторыми крайними значениями (иногда дополнительно и промежуточными).

При вертикальной локации таким параметром является только глубина обнаружения объекта, определяемая энергетической дальностью действия. В случае горизонтального зондирования различают энергетическую и геометрическую дальности обнаружения. Энергетическая дальность обнаружения $r_{\text{макс}}$ при горизонтальном зондировании является основным параметром рыболокаторной станции при благоприятных гидрологических условиях среды (т. е. при прямолинейном распространении звука в воде) и определяется техническими характеристиками аппаратуры, свойствами среды и отражающими или рассеивающими свойствами объекта локации.

Зависимость между параметрами, характеризующими энергетическую дальность обнаружения, выражается основным уравнением гидролокаторной системы:

$$r^4 \cdot 10^{0,2\alpha r} = \frac{C_a \mu_{\text{макс}}^2 \frac{\sigma}{4\pi}}{U_{\text{мин}}^2}, \quad (10.19)$$

где α — коэффициент пространственного затухания акустической энергии в воде; $\mu_{\text{макс}}$ — максимально допустимый коэффициент усиления приемного тракта; σ — акустическое сечение регистрируемого объекта, м²; $U_{\text{мин}}$ — минимально допустимое напряжение регистрации эхосигналов, В; C_a — акустическая постоянная рыбопоискового прибора, В² м².

$$C_a = p_1^2 X^2 = \frac{U_{\text{ш}}^2 r_{\text{ш}}^4}{\mu_{\text{ш}}^2 \sigma_{\text{ш}}}, \quad (10.20)$$

где p_1 — эффективное значение звукового давления излучения, приведенное к 1 м от антенны, Па/м; X — чувствительность антенны по приему, В/Па; $U_{\text{ш}}$ — напряжение эхосигнала от образцового шара на дисплее, В; $r_{\text{ш}}$ — расстояние от акустической антенны аппаратуры до шара, м; $\mu_{\text{ш}}$ — коэффициент усиления при регистрации шара; $\sigma_{\text{ш}}$ — акустическое сечение шара, м².

Первое выражение в формуле 10.20 дает возможность определять C_a с помощью акустических измерений гидрофоном, а второе — с помощью измерений по образцовому шару.

Акустическая постоянная является удобной характеристикой акустической аппаратуры; она позволяет контролировать состояние излучающего тракта и акустической антенны рыбопоискового прибора. Эту постоянную особенно целесообразно использовать для градуировки гидроакустических приборов при количественной оценке состояния запасов гидробионтов [Юданов, 1992].

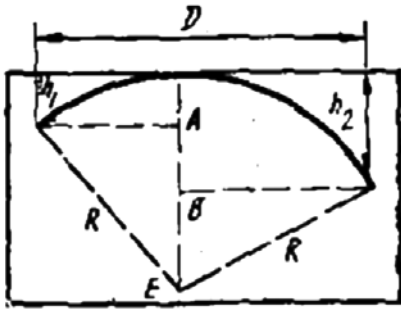


Рис. 10.16. Геометрическая дальность действия гидролокатора

Геометрическая дальность характеризует влияние на обнаружение объектов в рефрагирующей водной среде при горизонтальном и наклонном распространении звука, которая в целом ряде случаев ограничивает возможности аппаратуры независимо от ее энергетической дальности. Так как при вертикальном распространении звука явление рефракции отсутствует, то для рыболокаторов вертикального действия существует одно понятие — энергетическая глубина обнаружения или просто глубина обнаружения и регистрации. Влияние рефракции в рыболокаторных станциях можно не учитывать только в том случае, когда она положи-

тельная, когда реальную максимальную дистанцию обнаружения можно практически оценивать лишь энергетической дальностью действия прибора. В остальных случаях ее воздействие должно учитываться, т. к. граница возникающей при этом акустической тени почти всегда является границей дальности обнаружения рыболокаторов. Для простейшего случая отрицательной рефракции при линейном изменении скорости звука с глубиной геометрическая дальность обнаружения легко может быть определена по формуле:

$$D = \sqrt{2R} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) = \sqrt{\frac{2c_1}{|G_c|}} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

где c_1 — скорость звука на уровне источника, м/с; $|G_c| = |dc/dh| \approx |c_2 - c_1| / |h_2 - h_1|$ — градиент скорости звука, 1/с (рис. 10.16).

Для подкильных антенн можно принять $h_1 = 0$, тогда

$$D \approx \sqrt{\frac{2c_1}{|G_c|}} h_2. \quad (10.21)$$

В других случаях вертикального распределения скорости звука (особенно при ярко выраженных нелинейных изменениях температуры воды) влияние рефракции и геометрическая дальность обнаружения должны оцениваться путем построения лучевых картин [Тюлин, Сташкевич, Тюрин, 1955; Сташкевич, 1966; Акустика океана, 1974]. Из выражения (10.21) видно, что при указанном характере распространения звука геометрическая дальность зависит от глубины нахождения объекта. Например, при градиенте скорости звука $-0,3л/с$ горизонтальная дальность обнаружения рыбных скоплений, находящихся на глубине 10 м, будет составлять 316 м, а находящихся на глубине 50 м — 700 м, хотя энергетическая дальность обнаружения при этом может быть одинаковой и значительно большей обоих вычисленных значений.

Разрешающая способность гидроакустической аппаратуры вертикальной локации характеризуется в общем случае тем наименьшим расстоянием между двумя объектами, при котором эхосигналы от них могут быть отображены отдельно один от другого на дисплее прибора. При указанных условиях она обычно определяется минимальным расстоянием между двумя точечными объектами, находящимися на акустической оси антенны, и между двумя отдельными равноудаленными объектами. В первом случае это будет разрешающая способность по дистанции или по глубине (для вертикального зондирования, когда оба объекта расположены на одной вертикали), во втором — по углу и может оцениваться как минимальным расстоянием, так и минимальным углом, при котором эхосигналы от этих объектов будут воспроизводиться отдельно. Под точечным объектом в данном случае подразумевается такой объект, размеры которого значительно меньше длины импульса в воде.

Если расстояние δ_r между объектами равно или превышает $c\tau/2$ (где c – скорость звука в воде, м/с; τ – длительность излучаемого зондирующего импульса, мс), то эхосигналы от них могут воспроизводиться отдельно, поэтому δ_r является разрешающей способностью прибора по дальности или по глубине. Иногда ее называют пространственной полушириной посылки. Эта формула справедлива лишь для случая излучения импульсов простой формы. При использовании импульсов зондирования сложной формы, например с внутримпульсной частотной модуляцией, фазоманипулированными и других, разрешающая способность по расстоянию определяется исходя из ширины полосы пропускания гидроакустической системы $\delta_r = c/2\Delta f$. Значение δ_r приведено для идеального случая: объекты точечные, идеальный прямоугольный импульс зондирования, влияние трактов приема и воспроизводящих устройств не учитывается. Оценки реальной разрешающей способности δ_r показывают, что при регистрации эхосигналов на устройствах отображения для большинства рыбопоисковых приборов она отличается от идеальной ($\delta_r = c\tau/2$) примерно в 1,5–2,5 раза (при малых длительностях зондирующих импульсов (0,5–2 мс), причем это различие тем значительнее, чем меньше длительности импульсов локации. Разрешающая способность δ_r (при воспроизведении на индикаторе) при амплитудных отметках эхосигналов оценивается как $\delta''_r(0,6–0,7)\delta'_r$ (по экспериментальным данным), когда разрешение возможно даже при частичном перекрытии эхосигналов. На практике разрешающая способность аппаратуры по глубине проверяется экспериментально при проведении натуральных испытаний новых образцов.

Следует отметить, что при низкой разрешающей способности создается неверное представление о действительном количестве промысловых объектов и скоплений в обследуемом районе (получаются завышенные показания). При наличии плотных скоплений завышение регистрируемых показаний проявляется еще в большей степени вследствие многократных отражений, рассеяния и др. Наличие дополнительных узких характеристик направленности в аппаратуре облегчает задачу получения наиболее реальной оценки скоплений и повышает разрешающую способность (одновременно с использованием более короткой длительности излучаемого импульса).

При низкой разрешающей способности аппаратуры особенно большие трудности возникают в процессе поиска, обнаружения, регистрации и оценки придонных рыб и скоплений, когда реальная разрешающая способность δ_r по одиночному объекту может достигать до 2 и более метров [Юданов, 1992]. В результате даже при ровном дне (при обычных режимах отображения без применения специальных устройств) эхосигналы от рыб, находящихся на расстоянии 2 м от дна или несколько выше, будут регистрироваться слитно с эхосигналами от грунта и различить их будет практически невозможно. При наличии же скоплений даже небольшой плотности разрешающая способность еще более ухудшается. При плотных скоплениях минимальное допустимое расстояние от них до дна, необходимое для получения отдельного отображения, еще более возрастает.

Это было замечено уже в начале применения рыбопоисковой аппаратуры вертикальной локации, поэтому первые работы по усовершенствованию указанной аппаратуры были направлены на преодоление отрицательного влияния низкой разрешающей способности аппаратуры на обнаружение и регистрацию биологических водных объектов у грунта. В связи с этим в рыболокаторы вначале были введены электронные индикаторы, повышающие разрешающую способность аппаратуры, а затем были созданы устройства, обеспечивающие существенное улучшение характеристик приборов при поиске рыбы у дна (см. устройства «Белая линия» и др.).

При оценке разрешающей способности по углу δ_y точечным объектом можно считать такой объект, угловой размер которого много меньше ширины характеристики направленности акустической антенны. Разрешающая способность по углу может быть выражена и в единицах расстояния для большей наглядности и удобства при оценке. В этом случае она называется тангенциальной разрешающей способностью δ_l и связана с угловой равенством (при большой величине r по сравнению с размерами объекта):

$$\delta_l = \delta_y r.$$

В то же время разрешающую способность по углу нельзя смешивать с точностью пеленгования, например, с точностью определения границ одного скопления, с точностью удержания кромки косяка, т. к. эти величины различны.

Понятие разрешающей способности гидроакустической аппаратуры вертикального действия по углу имеет смысл лишь при движении судна, на котором установлена аппаратура. В данном случае также удобнее говорить не об угловой, а о тангенциальной разрешающей способности, хотя она во многом определяется характеристикой направленности аппаратуры, однако не подходит под общие определения разрешающей способности по дистанции (или глубине) или по углу. Этот параметр выражает способность прибора различать эхосигналы от двух точечных объектов, расположенных близко друг к другу на одинаковой глубине по направлению движения судна. Указанный параметр используется в рыболокации только при вертикальном зондировании и является необходимой характеристикой для правильной оценки и анализа показаний приборов.

Разрешаемый элемент пространства — это параметр, характеризующий рыболокационные системы горизонтального и наклонного обзора. Обычно он определяется произведением разрешающей способности аппаратуры по дальности на разрешающую способность по углу (для одиночных объектов) в горизонтальной плоскости. Соответственно, разрешаемым объемом является произведение разрешающих способностей по дистанции и по углам в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Величина эхосигнала зависит от того, насколько концентрация рыбы или любой другой отражающий объект укладываются полностью в шаровой слой волн, излучаемый гидроакустическим прибором. Чем меньше размеры отражающего объекта по сравнению с размерами пакета излучаемых волн, тем меньшая часть энергии ультразвукового пучка падает на объект, а значит меньше отражение от него. Наибольшая величина отраженного сигнала будет в том случае, когда размеры объекта больше или равны размерам пакета излучаемых волн. Если, например, эхолотатор с широким ультразвуковым пучком регистрирует мелкие стаи рыб, то можно ожидать неполное использование акустической мощности прибора в основном из-за малой по сравнению с поперечным размером ультразвукового пучка горизонтальной протяженности стай.

При регистрации плотных объектов, которые плохо пропускают через себя излучаемые импульсы (морское дно, корпус судна), суммарная амплитуда эхосигнала складывается в основном из отражений от поверхности объекта. В таких случаях рассеивающий элемент будет представлять собой поверхность, от которой отраженные волны приходят в точку приема одновременно. Таким образом, при регистрации дна эхолотатором вертикального действия увеличение длительности излучаемого импульса дает эффект только до указанного предела, после которого уже не происходит увеличения эхосигнала за счет суммирования отражений боковых лучей.

Совершенно другие результаты дает изменение длительности излучаемых импульсов при регистрации рыбных концентраций. Так, при работе на скоплении рыб большой протяженности увеличение длительности импульсов приводит к увеличению объема рассеивающего элемента; соответственно, возрастает количество рыбы в нем, больше становится величина эхосигналов. Такое нарастание эхосигналов будет ограничиваться только затуханием звука внутри скоплений. И, наоборот, увеличение длительности импульса практически не влияет на величину эхосигналов при регистрации разреженных рыб, когда в зону озвучивания прибора попадают одиночные объекты. В этом случае целесообразно применять максимально короткие импульсы. Короткие импульсы нужны также при регистрации придонной рыбы, при расшифровке показаний и т. д.

Мертвая зона рыболокатора — это минимальная дальность (или глубина) обнаружения им объекта. В идеальном случае она определяется соотношением $r_{\min} = ct/2$, в ре-

альных условиях этот параметр имеет бóльшую величину. Особенно велика мертвая зона у рыболокаторов с электронным сканированием характеристики направленности антенны при излучении:

$$r_{\text{мин}} = (\tau n + t_{\text{в}}) c \tau / 2,$$

где n — число направлений зондирования за цикл излучения; $t_{\text{в}}$ — время восстановления чувствительности тракта приема.

Скорость обзора подводного пространства — это важная характеристика рыболокаторов горизонтального действия. Наличие большей скорости обзора у станций с быстрым электронным сканированием позволяет увеличить объем информации благодаря получению дополнительных данных (в т. ч. от быстро перемещающихся скоплений и косяков), одновременному отображению всех целей, находящихся в пределах дальности действия аппаратуры, увеличению эхоконтактов с любой целью, т. е. возрастанию вероятности правильного обнаружения объектов, их классификации и оценки. Непрерывное наблюдение за любым из обнаруженных объектов и определение его координат не мешают получать информацию обо всех изменениях окружающей обстановки и о других объектах и скоплениях.

Точность измерения дистанции до объекта и его глубины — это параметр, имеющий наиболее важное значение при траловом лове. На первый взгляд, от рыболокационной аппаратуры не требуется высокая точность измерения дистанции и глубины из-за наличия значительных дополнительных погрешностей, связанных с непостоянством скорости звука по глубине и рефракционными явлениями (при горизонтальной эхолокации). Это справедливо лишь для горизонтального и наклонного зондирования, т. к. даже в случае значительной относительной погрешности измерения при дальнем обнаружении по мере постепенного приближения к обнаруженному скоплению или косяку (при переключении диапазонов) абсолютное значение погрешности уменьшается, и в процессе облова (при малой дистанции до скопления), когда в основном требуется более высокая точность измерения дистанции до косяка, получаемая погрешность отсчета расстояния вполне допустима.

Однако при прицельном разноглубинном лове требования к допускаемым приборным погрешностям рыболокационной аппаратуры (в основном, вертикального действия) должны быть значительно жестче. Это связано с тем, что прицельный разноглубинный траловый лов в общем случае проводится по показаниям нескольких типов приборов с датчиками информации акустического типа, а именно с помощью рыболокационной аппаратуры вертикального действия, посредством которой определяется глубина нахождения косяка, и тралового зонда, служащего для измерения горизонта хода рыболовного трала. Исходя из этого дополнительные погрешности, связанные с непостоянством скорости звука по глубине, как правило, в значительной степени компенсируются, и общая погрешность наведения пеллагического трала на обнаруженное скопление в вертикальной плоскости будет уже определяться приборными погрешностями самой аппаратуры [Кудрявцев, 1972]. Следовательно, более высокая приборная точность измерения глубины рыболокатором и траловым зондом будет существенно облегчать наведение трала и повышать эффективность траления.

Точность пеленгования относится к характеристикам рыбопоисковых гидролокаторов-станций, т. е. аппаратуры, характеристика направленности которой может менять свое положение в пространстве. От рыболокационной станции требуется определение не только расстояния до обнаруженного объекта, но и направления на него (процесс определения направления на объект называется *пеленгацией*). В общем случае пеленгация объекта в рыболокации сводится к измерению двух угловых координат: направления в горизонтальной плоскости (обычно курсового угла) и направления по вертикали (угла места). Иногда вместо угла места определяется глубина нахождения объекта h , связанная с углом места простым тригонометрическим соотношением:

$$h = r \sin \beta, \quad (10.22)$$

где r — наклонная дальность до объекта; β — угол места.

Измерение угловых координат объекта основано на использовании направленных свойств акустической антенны гидролокатора. Существует несколько методов пеленгования электронными способами*, однако в рыболокации в основном применяется максимальный метод, как наиболее простой и в то же время удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к рыболокационной аппаратуре при её использовании на промысле.

[*Амплитудные методы: максимума, минимума, сравнения и равносигнальный; фазовые методы, основанные на измерении разности фаз колебаний, принятых различными антеннами [Сиверс и др., 1959; Радиолокационные устройства, 1970].]

Кроме определения направления на обнаруженный объект, когда не требуется достаточно высокой точности оценки угловых координат, при использовании рыболокационных систем в промысловых условиях важны определение границ обнаруженного скопления или косяка и удержание кромки косяка при облове его кошельковым неводом. В последних случаях предъявляются более высокие требования к точности измерения угловых координат. Большие ошибки в определении угловых координат могут иметь место при значительных боковых лепестках характеристики направленности, когда оператор считает, что на объект направлен основной лепесток, в то время как объект может находиться в зоне озвучивания одного из боковых лепестков (особенно на небольших дистанциях, когда мощности бокового излучения достаточно для получения значительной величины эха, поэтому при слежении за косяками на близких расстояниях не рекомендуется использовать максимальные мощность станции и коэффициент усиления).

При определении границ скопления и удержании кромки косяка в процессе его облова используется разновидность метода максимума (способ минимума). Характеристика направленности поворачивается в сторону от объекта до тех пор, пока эхосигнал не исчезает с экрана и не перестает прослушиваться. В момент пропадания эхосигнала проводится отсчет угловой координаты.

При определении границ рыбных скоплений и косяков отрицательное влияние на точность пеленгования оказывает то обстоятельство, что плотность концентрации на краях косяка обычно значительно меньше, чем в основной части скопления, и в то же время, например, при кошельковании, очень важно иметь четкие данные об угловом положении кромки косяка во избежание пересечения его неводом, часто приводящего к пролову. При большой ширине характеристика направленности гидролокатора вносит основной вклад в величину погрешности измерения курсового угла и пеленга, а при малой ширине характеристики направленности большее значение имеют погрешности, связанные с работой узлов и блоков станции. В станциях одновременного обзора значительное влияние на точность измерения углов оказывает погрешность индикаторного устройства. При большой величине коэффициента усиления на небольших дистанциях могут иметь место и еще большие погрешности, что необходимо учитывать при работе с аппаратурой. Для уменьшения погрешности пеленгования в гидролокаторах одновременного кругового обзора применяются схемы, обеспечивающие искусственное сужение характеристик направленности (использование комбинаций суммарной и разностной характеристик и др.).

На точность оценки угла места основное влияние оказывает характер распространения акустических лучей в море, т. е. рефракционные явления. В море редко наблюдается прямолинейное распространение звука, когда угол места и соответственно глубину нахождения объекта можно определить достаточно точно. В большинстве случаев имеют место значительные погрешности в определении истинного угла места объекта, хотя и уменьшающиеся по мере приближения к цели. Тем не менее в ряде случаев (например, при автоматическом наведении) желательнее иметь большую точность измере-

ния глубины нахождения объекта по данным рыболокационной станции, не проходя над ним. В связи с этим представляет интерес способ определения глубины косяка на основании оценки нескольких последовательных значений угла наклона характеристики направленности антенны и получаемого наклонного расстояния до косяка при приближении судна. Как указывается в литературе [Калинин, 1975], в этом случае снижается влияние рефракционных явлений на точность определения глубины.

При использовании гидроакустической аппаратуры на промысле параметр точности измерения угловых координат относится в основном к определению границ обнаруженного скопления и к удержанию кромки косяка. В случае разреженных скоплений из-за достаточно медленного, а иногда и флуктуирующего изменения уровня эхосигнала может быть значительная погрешность в измерении. В связи с этим в любом случае при измерении угловых координат необходимо использовать более узкие характеристики направленности (в современных рыболокационных станциях такие возможности имеются).

Масштаб отображения. Масштаб регистрации информации в гидроакустической аппаратуре вертикальной локации в общем случае зависит от скорости развертки времени в устройстве отображения эхосигналов прибора и изменения скорости распространения звука в воде, т. е. скорость развертки времени выбирается исходя из средней скорости распространения акустических колебаний, фактически не являющейся постоянной величиной. В связи с тем, что изменения скорости звука сравнительно невелики (примерно до $\pm 3\%$ при средней скорости 1500 м/с), их влиянием на масштаб воспроизведения эхосигналов можно пренебречь.

В гидроакустической аппаратуре вертикального действия и в рыболокационных станциях при их работе в режиме вертикального зондирования основным устройством воспроизведения и отображения принимаемых эхосигналов в настоящее время являются многоцветные дисплеи, которые благодаря последовательному накоплению и хранению эхосигналов позволяют получать панорамное отображение подводной обстановки за определенный промежуток времени, т. е. появляется вторая координата с соответствующим масштабом регистрации. Масштаб отображения данных по глубине называется обычно вертикальным масштабом отображения, а масштаб панорамного воспроизведения – горизонтальным. В отличие от вертикального масштаба отображения, который при включенном диапазоне аппаратуры можно считать постоянным, горизонтальный масштаб регистрации сильно зависит от скорости носителя аппаратуры (судна) и может изменяться в больших пределах. Зависит он и от скорости перемещения изображения на экране дисплея. При нормальных режимах работы аппаратуры на промысловых судах указанные масштабы регистрации сильно различаются по величине (примерно в 10–200 и более раз) (рис. 10.17). Масштаб шкалы или диапазона дисплея или индикатора m определяется формулой:

$$m = l_p / r_p \text{ или } l_p / h_p, \quad (10.23)$$

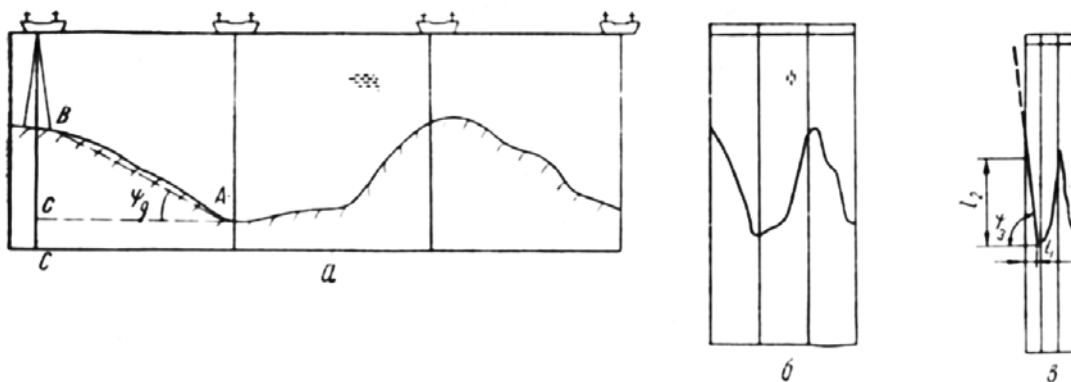


Рис. 10.17. Различие между рельефом дна фактическим (а) и отображаемым на эхограмме при скорости 5 узлов (б) и при скорости 15 узлов (в)

где l_p – длина рабочего участка развертки времени; $r_p(h_p)$ – диапазон дистанций (или глубин), соответствующий длине рабочего участка развертки времени.

Горизонтальный масштаб отображения эхосигналов дисплеев гидроакустической локационной аппаратуры обычно значительно мельче вертикального, поэтому изображения эхосигналов от рыбных скоплений и рельефа дна на эхограмме получаются всегда сильно сжатыми. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при расшифровке и оценке показаний эхограмм указанной аппаратуры.

Вертикальный масштаб отображения m_h может быть выражен и через скорости развертки и звука:

$$m_h = \frac{l_p}{h_p} = \frac{v_{p1} 2t_p}{ct_p} = \frac{2v_{p1}}{c}, \quad (10.24)$$

где v_{p1} – скорость развертки, мм/с; c – скорость звука, м/с.

Горизонтальный масштаб отображения равен:

$$m_r = \frac{v_{p2}}{v_c}, \quad (10.25)$$

где v_{p2} – скорость перемещения изображения, мм/мин; v_c – скорость судна, м/мин.

Скорость судна обычно выражается в узлах, поэтому эту формулу удобнее записать в виде:

$$m_r = \frac{v_{p2}}{30,87v_c}, \quad (10.26)$$

где v_c – скорость судна, узлы.

Различия в масштабах приводят к искажению формы косяков и рельефа дна на эхограммах дисплея. Например, при движении судна на большой скорости над небольшим возвышением дна получается заметное несоответствие между действительными уклонами дна и уклонами, изображенными на эхограмме. Как видно из рис. 10.17, отрезку l_1 (в мм) на экране дисплея соответствует истинная протяженность АС, а отрезку l_2 (в мм) – изменение глубины ВС.

$$BC = l_2/m_h = (c/2 v_{p1})/l_2,$$

$$AC = l_1/m_r = (30,87v_c/v_{p2})/l_1.$$

Угол фактического наклона дна равен:

$$\operatorname{tg}\psi_d = BC/AC = (m_r/m_h) \times (l_2/l_1).$$

В то же время угол наклона $\operatorname{tg}\psi_o$ отображения наклона дна:

$$\operatorname{tg}\psi_o = l_2/l_1,$$

поэтому

$$\operatorname{tg}\psi_o = (m_h/m_r) \times \operatorname{tg}\psi_d = (61,74v_{p1}v_c/v_{p2}c) \operatorname{tg}\psi_d.$$

Из этого соотношения видно, что наклон дна моря, изображенный на эхограмме, тем круче, чем больше скорость судна и меньше скорость перемещения изображения на экране дисплея или чем больше отношение вертикального и горизонтального масштабов отображения эхосигналов. Для сравнения также показано изменение характера отображения рельефа дна при скорости судна в три раза меньшей. На рис. 10.17 в представлен также характер регистрации одного и того же рыбного скопления на различных скоростях судна, т. е. при разных горизонтальных масштабах.

Целесообразно иметь таблицы отношений вертикальных и горизонтальных масштабов отображения эхограмм установленных на судне приборов при различных скоростях судна и перемещениях изображения на экране дисплея для разных диапазонов работы рыболокатора, а также таблицу зависимости угла ψ_3 от угла ψ_d при различных соотношениях m_h и m_r . При большой разнице между m_h и m_r на полном ходу небольшой косяк регистрируется на экране в виде узкого продолговатого пятна, хотя он имеет действительный размер в направлении хода судна порядка нескольких десятков метров, а пологий склон дна записывается в виде крутого свала. При наличии около прибора соответствующей таблицы можно сразу оценить фактический размер скопления и реальный уклон или подъем дна.

Выбор вертикального масштаба регистрации определяется в основном двумя группами факторов. К первой группе факторов относятся эксплуатационные требования, предъявляемые к рыболокаторной аппаратуре и зависящие от задач, решаемых приборами, т. е. от назначения рыболокаторов. При проведении ихтиологических исследований (для изучения распределения объектов, имеющих промысловое значение, формирования промысловых скоплений, их перемещения и т. д.) целесообразно иметь возможно больший вертикальный масштаб регистрации и индикации эхосигналов от рыбы для детального анализа биологических объектов, если не во всем исследуемом диапазоне глубин, то хотя бы с участков, представляющих на данном этапе работы наибольший интерес. Вообще-то в данном случае необходимо обеспечение приемлемого для наблюдения вертикального масштаба во всем диапазоне проверяемых глубин и в то же время целесообразна возможность более крупномасштабного отображения информации (эхограмм) с отдельных выбранных слоев воды. В современной эхолокаторной аппаратуре с электронными дисплеями возможно отображение эхограмм с разными масштабами в отдельных окнах дисплея.

В известных и большей частью освоенных промысловых районах определенной группой судов часто одного типа или близких типов в конкретный период времени обычно ведется достаточно ограниченный по каким-либо параметрам лов: или в определенном диапазоне глубины, например, глубоководный лов, или лов в достаточно приповерхностном слое воды, например, кошельковыми неводами, или донный траловый лов, дрейфтерный и т. д. В этом случае обычно предъявляются меньшие требования к обеспечению достаточного для наблюдения и анализа вертикального масштаба регистрации (индикации) в большом диапазоне глубин, но зато могут быть необходимы крупные масштабы отображения эхосигналов с каких-либо определенных слоев, например обеспечение крупномасштабной регистрации эхосигналов от рыбы в узком придонном слое в случае ведения донного тралового лова, регистрации с приповерхностного слоя при кошельковом лове и др. При облове рыбных скоплений требования к вертикальному масштабу в основном те же, что при их поиске и обнаружении.

Вторая группа факторов – технические возможности аппаратуры как с точки зрения конструктивной и схемной реализации, так и возможного усложнения приборов, увеличения габаритов, массы и т. д.

Из формулы (10.24) следует, что при неизменной длине рабочего хода развертки времени l_p вертикальный масштаб регистрации уменьшается с ростом h_p . При неизменном h_p m_h может быть увеличен лишь за счет возрастания l_p или смещения начала развертки времени относительно излучения зондирующего импульса. Оценим минимальную допустимую величину вертикального масштаба регистрации с точки зрения достаточно эффективной оценки наличия промысловых объектов в исследуемом районе при использовании рыболокаторов обычного типа с достаточно широкой характеристикой направленности антенны. При этом будем руководствоваться следующими соображениями.

Заметное для глаза изменение высоты (толщины) последовательного отображения отметок от отдельных рыб на экране составляет примерно 0,5 мм, а изменение толщины на 1 мм может быть уверенно обнаружено любым оператором даже при беглой оцен-

ке эхограммы. Диаметр элементарной отметки на экране дисплея в среднем составляет около 0,5 мм. При небольших длительностях зондирующих импульсов (0,5–1 мс) разрешающая способность по глубине у большинства рыболокаторов находится в пределах от 1,5 до 3,0 м (для отдельных рыб). При $m_h = 0,5$ мм/м эхосигналы от отдельных рыб будут регистрироваться в виде отметок высотой (длиной) 0,75–1,5 мм, а при $m_h = 1$ мм/м – 1,5–3,0 мм, т. е. в основном они достаточно заметно превышают размер элементарной отметки и могут быть выделены на фоне отметок помех и шумов, часто представляющих собой элементарные отметки и их совокупности. Если учитывать, что при ведении поисковых работ необходимо фиксировать на экране эхосигналы от мелких стаяк промысловых рыб толщиной, измеряемой метрами, и разреженно расположенных рыб, способных образовывать промысловые скопления, то за минимально допустимую величину вертикального масштаба отображения можно принять 0,5 мм/м, а за величину вертикального масштаба, обеспечивающего достаточно уверенное различение эхосигналов, – 1 мм/м.

При обнаружении и регистрации придонных объектов в придонных слоях воды и у грунта к выбору вертикального масштаба отображения должен быть несколько другой подход. Основную роль в этом случае играет наличие у рыбопоисковой эхолокационной аппаратуры устройств, повышающих эффективность обнаружения объектов у дна – устройств «отсечки грунта» («белая линия» и др.). При отсутствии или выключения таких устройств даже в случае достаточно крупного масштаба отображения качественной оценки показаний во многих случаях существенно ухудшается. Поэтому практически во всех современных рыбопоисковых эхолокаторах предусматриваются устройства «отсечки дна». При наличии в аппаратуре таких схем и при вертикальном масштабе отображения 0,5 мм/м в случае плоского дна можно уверенно различить рыбу, находящуюся на расстоянии 1 м от грунта по утолщению линии контура дна (эта линия легко может быть настроена на толщину 0,5 мм), при вертикальном масштабе отображения 1 мм/м – отстоящую от дна на 50 см и т. д. Если эхолокатор имеет устройство «серая линия», то при $m_h = 0,5$ мм/м можно при тех же условиях уверенно различить рыбу, уже находящуюся на меньшем расстоянии от дна, чем с устройством «белая линия», т. к. в этом случае отсутствует отображение темной линии контура дна и любые потемнения над серой полосой свидетельствуют о наличии рыбы.

Из изложенного следует, что вертикальный масштаб отображения в пределах 0,5–1 мм/м еще позволяет осуществлять удовлетворительный поиск и обнаружение промысловых объектов как в толще водной среды, так и у дна. Для более подробной и детальной оценки обнаруженных скоплений целесообразно применение более крупномасштабного отображения эхосигналов. Следует, однако учитывать, что увеличение m_h при постоянном l_p связано с уменьшением h_p , т. е. в более крупном масштабе возможно только с меньшего участка глубин из всего просматриваемого диапазона. В современной аппаратуре это не связано с какими-то проблемами: имеется возможность крупномасштабного отображения даже с нескольких участков общего диапазона просмотра.

Скорость перемещения изображения по экрану дисплея. Качество показаний рыбы на эхограмме зависит не только от вертикального масштаба отображения, но и от скорости перемещения изображения по экрану дисплея. Для выделения показаний отдельных рыб на фоне импульсных помех отображения эхосигналов от рыбы должны быть, по меньшей мере, в 2 раза шире одного штриха. Если принять, что для нормального выделения эхосигналов от рыб отображение их от отдельных рыб должно состоять не менее чем из трех штрихов (трех эхосигналов), минимально допустимая скорость перемещения изображения v_n при поиске рыбы должна быть не менее $0,5d$ (мм) на одно зондирование или $v_n = 0,5dv_1$ (мм/м), где d – ширина одного штриха; v_1 – частота следования импульсов зондирования, имп/мин [Юданов, 1971, 1976]. При такой скорости перемещения изображения отметки эхосигналов от грунта также будут накладываться одна на другую, что позволит лучше оценивать и характер рельефа дна при донном промысле.

В случае малой скорости перемещения изображения отметки эха от рыбы и дна будут сливаться, затрудняя выделение и анализ полезной информации.

Когда рыбопоисковые гидролокаторы используются в качестве оперативных средств при прицельном облове косяков и скоплений рыб, а также при проведении эхометрических съемок промысловых объектов как гидролокаторами, так и эхолокационной аппаратурой вертикального действия, часто требуется более детальное изображение эхосигналов. В этом случае минимальная скорость перемещения изображения должна выбираться не менее чем $v_{и} = d$ (мм/имп) или $v_{и} = dv_1$ (мм/мин), т. е. исходя из условия, что регистрация эхосигналов происходит без перекрытия штрихов. Лучше иметь при этом даже раздельное отображение штрихов, т. е. $v_1 \geq 1,5$ мм/имп [Юданов, 1971].

Приведенные значения минимальных вертикальных масштабов отображения и скорости перемещения изображения целесообразно использовать при работе аппаратуры в процессе поиска промысловых объектов, когда необходима регистрация практически одиночных целей в большом диапазоне глубин. При оперативном промысловом применении рыбопоисковой аппаратуры в известных районах в случае облова скоплений и косяков рыб разноглубинными тралами, когда основной интерес представляют отображения эхосигналов от промысловых концентраций (которые можно непосредственно облавливать после обнаружения), могут использоваться и меньшие значения $m_{н}$ и $v_{и}$. В то же время даже в ряде ситуаций промыслового использования аппаратуры целесообразно иметь более крупномасштабное отображение трасс эхосигналов с определенного слоя глубин. Особенно это полезно при донном и придонном траловом лове рыбы, при промысле ракообразных и других донных объектов. В последнем случае наряду с такими параметрами, как узкие характеристики направленности, более высокая разрешающая способность (соответственно, меньшая длительность импульса и др.), весьма целесообразно иметь минимальную величину вертикального масштаба отображения, значительно превышающую ранее определенное значение $m_{н}$. Современные технические средства позволяют реализовать такие параметры. В современных рыболокаторах предусматривается ряд значений как для вертикального масштаба отображения, так и для скорости перемещения изображения.

Хотя в случае донного лова указанная минимальная величина $m_{н}$ и обуславливает достаточно наглядное отображение эхосигналов от объектов, находящихся вблизи грунта (при достаточно ровном дне), при этом не обеспечивается необходимое воспроизведение реального распределения рыбных скоплений в придонном слое. Как было показано, разрешающая способность обычного рыболокатора находится в среднем в пределах 2–3 м (при регистрации даже отдельных рыб). В связи с этим, даже если отдельные рыбы будут находиться на расстоянии 2–3 м от дна, отметки эхосигналов от них будут отображаться до самого контура грунта. Таким образом, например, при наличии двух разреженных скоплений рыбы у дна (рис. 10.18 *а* и *б*) характер их отображения на экране дисплея будет практически одинаковым, несмотря на то, что количество рыбы во втором случае в 3 раза больше. Ситуация значительно усложняется при наличии более плотных скоплений, расположенных достаточно высоко над грунтом, например, на расстоянии 7–10 м от него. Хотя с помощью устройства отсечки грунта и может быть определено присутствие рыбы в данном месте, в случае применения обычного рыболокатора с достаточно широкой характеристикой направленности антенны на экране дисплея будет отображение показаний во всем указанном диапазоне глубин (от 10 м над грунтом до самого дна — см. рис. 10.18 *в*, верхняя часть), и может быть сложно определить, присутствует ли рыба в слое от 0 до 5 м от дна (т. е. в зоне действия донного трала). При возможности расширения масштаба отображения, например, в 10 раз (рис. 10.18 *в*, *г*), можно получить раздельное отображение показаний такого скопления от трассы эха от дна (скопления 1, 2, 3, 4 на эхограммах) благодаря тому, что при наличии в этом случае значительно большей скорости развертки времени более слабые эхосигналы от краев скопления будут менее четкими, чем эхо от рыбы, находящейся на оси характеристики, или вообще не

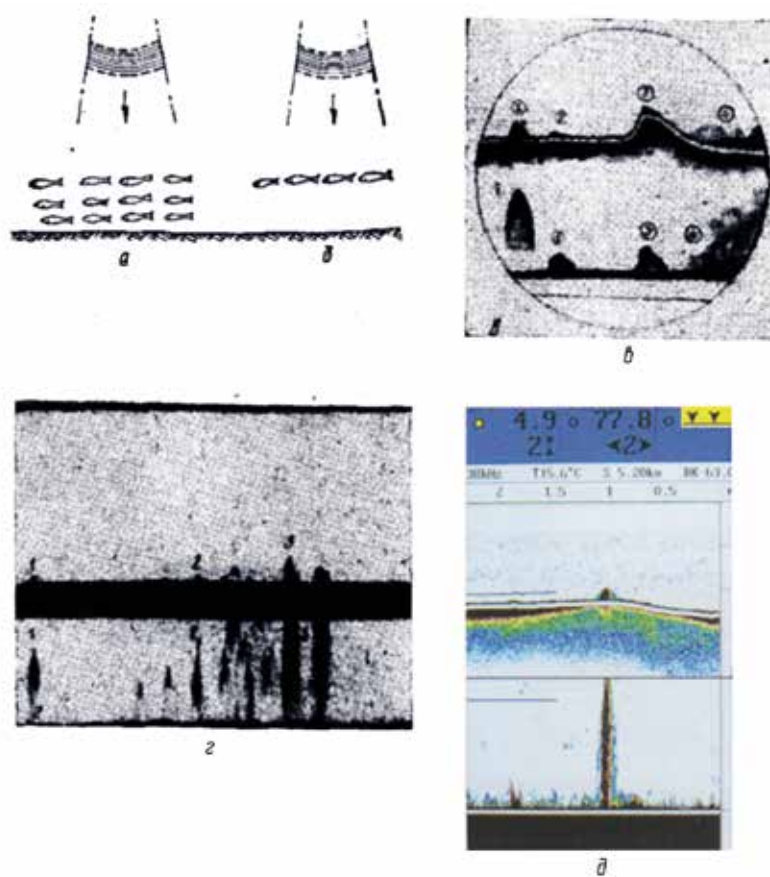


Рис. 10.18. Придонные скопления рыбы (а) и (б) и регистрация подобных скоплений в расширенном масштабе отображения (в) и (г); д — отображение эха от донного косяка рыбы на глубине порядка 70 м в обычном режиме (вверху) и в расширенном масштабе с привязкой к дну (расширенный диапазон 0–6 м)

будут зафиксированы. На эхограмме рис. 10.18 д можно видеть, что косяк высотой порядка 6 м находится непосредственно у дна.

Более правильную оценку показаний можно получить и с помощью индикации с амплитудной отметкой эхосигналов.

Меньшая скорость перемещения изображения по экрану дисплея может применяться при промышленном применении аппаратуры, когда основным объектом поиска являются концентрации, от которых обычно принимается более трех сигналов, особенно при работе на сравнительно небольших глубинах, а также при малой скорости хода судна.

Величина зоны действия гидроакустической аппаратуры (вертикальной локации). Величина зоны действия гидроакустической аппаратуры вертикальной локации дает представление о дальностях обнаружения ею объектов в различных направлениях относительно оси характеристики направленности антенны, что необходимо для эффективного ее использования при поиске и регистрации промысловых объектов. Антенны существующих приборов нередко излучают акустическую энергию обычно в определенном широком телесном угле. В случае идеального отражающего объекта (например, плоской ровной поверхности) к антенне возвратилась бы отраженная энергия лишь с зоны, близкой к нормальному падению звука на нее. Энергия акустических лучей, падающих на отражатель под углами, отличающимися от 90° , не возвратилась бы в точку излучения. Реальные же цели рыбопоисковой локационной аппаратуры (промысловые объекты, а также в большинстве случаев морское дно, поверхность воды при горизонтальном зондировании) являются рассеивателями акустической энергии. Достигая цели, акустические волны рассеиваются во все стороны. Часть рассеянной энергии рас-

пространяется и в направлении приемной антенны, которая в большинстве гидроакустических рыбопоисковых приборов выполняет функции как излучения, так и приема акустических колебаний. В связи с этим рыбопоисковые приборы, как правило, начинают фиксировать рыбу тогда, когда она еще не находится на оси характеристики направленности антенны.

Если от места расположения приемо-излучающей антенны рыболокаторной аппаратуры откладывать под соответствующими углами значения дальности или глубины обнаружения определенного объекта-цели, то получается пространственная характеристика изменения дальности обнаружения цели прибором в разных направлениях. Обычно на практике пользуются сочетаниями таких пространственных характеристик в определенных направлениях, т. е. плоскостными характеристиками дальности обнаружения. Построенные в полярных координатах они называются полярными характеристиками дальности действия рыбопоисковых приборов. Такая характеристика представляет собой геометрическое место точек, отображающих положение заданной цели при условии, что величина эхосигнала от цели в указанных точках имеет одно и то же минимально необходимое для ее обнаружения значение [Юданов, 1979]. Дальность обнаружения r_θ объекта, расположенного под углом θ к акустической оси антенны, может быть определена по формуле:

$$r_\theta = r_{\max} \sqrt[4]{(G_{\text{об}})_\theta},$$

где r_{\max} — дальность обнаружения объекта при нахождении его на акустической оси; $G_{\text{об}}$ — обобщенная характеристика направленности по интенсивности;

$$G_{\text{об}} = G_{\text{пр. - изл}} G_{\text{р}},$$

где $G_{\text{пр. - изл}}$ — характеристика направленности приемо-излучающей антенны по интенсивности; $G_{\text{р}}$ — характеристика направленности обратного рассеяния объекта.

Для антенны с прямоугольным раскрытием:

$$G_{\text{пр-изл}} = \left| \frac{\sin \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right|^4,$$

где a — длина одной стороны антенны.

Плоскостные полярные характеристики дальности (или глубины) обнаружения рыбопоисковой аппаратуры применительно к определенному объекту могут быть построены по известным характеристикам направленности $G_{\text{пр. - изл}}$ и $G_{\text{р}}$ максимальной дальности обнаружения данного объекта прибором в направлении акустической оси антенны. Они могут быть получены также экспериментально, например, путем выбора из множества показаний регистраций эхосигналов от отдельных рыб одного вида и примерно одинакового размера для разных горизонтов серии дугообразных записей с явно выраженными симметричными концами, по которым затем определяются поперечные сечения полярной характеристики дальности на разных глубинах [Юданов, 1967]. Другим способом определения зоны действия является построение полярной характеристики также по ее поперечным сечениям, но посредством подсчета среднего числа эхосигналов от одной рыбы на различных глубинах. Последний способ более точен и используется при количественной оценке рыбных скоплений в случае наличия устройств для автоматического подсчета эхосигналов от отдельных рыб в выбранных слоях водной среды [Ермольчев, 1969]. Полярные характеристики дальности дают наглядное представление о форме и размерах зоны обнаружения, позволяют правильно оценить поисковые возможности приборов. Они зависят не только от характеристик самой аппаратуры и среды, но и от характеристик объекта. $G_{\text{пр. - изл}}$

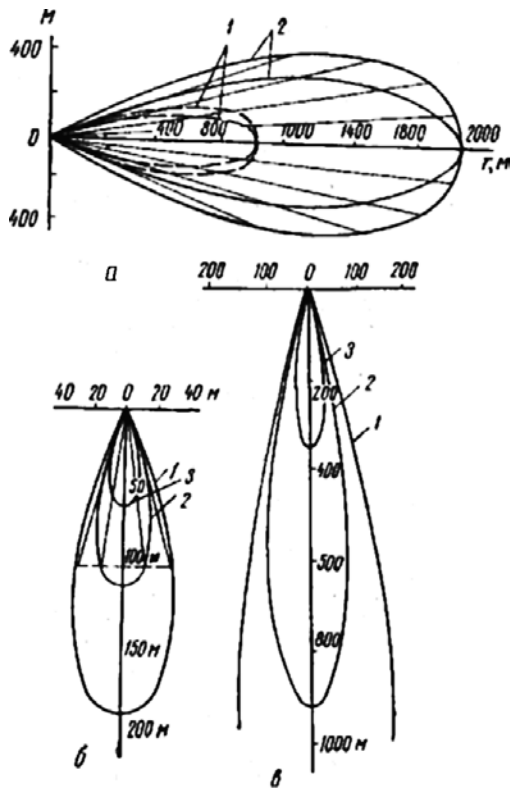


Рис. 10.19. Полярные характеристики дальности: а – рыбопоискового прибора «Палтус-М» в продольной и поперечной плоскостях для скопления сельди: 1 – малой плотности; 2 – большой плотности [Юданов, 1967]; б – рыбопоискового эхолота «Кальмар» по отдельной треске длиной 23,5 см при различных коэффициентах усиления K_y (1 – $K_y = 30 \times 10^6$; 2 – $K_y = 10 \times 10^6$; 3 – $K_y = 3 \times 10^6$) и ВАРУ [Юданов, 1969]; в – рыбопоисковой аппаратуры «Кальмар» по скоплениям сельди различной плотности: 1 – 0,1 шт/м³; 2 – 0,01 шт/м³; 3 – 0,001 шт/м³ [Юданов, 1973]

ных технических параметров рыбопоисковой аппаратуры и определяется величиной электрической мощности, подводимой к антенне аппаратуры, и коэффициентом полезного действия акустической антенны. Максимальная величина изучаемой мощности ограничивается в основном допустимой удельной акустической мощностью антенны – *мощностью*, которую можно снять с единицы ее излучаемой поверхности.

Максимально допустимая удельная электрическая мощность антенны ограничивается ее механической прочностью (за исключением никелевых преобразователей), нелинейными эффектами (если их получение не является задачей устройства) и кавитационной прочностью воды.

Непосредственно регистрируемой характеристикой создаваемой рыбопоисковой аппаратурой акустических колебаний является акустическое давление. При оценке поисковых возможностей гидроакустических приборов также можно пользоваться так называемым *энергетическим потенциалом* F , который представляет собой отношение излучаемой прибором мощности P_a к минимальной принимаемой энергии I_{\min} , необходимой для обнаружения промысловых объектов³:

$$F = \frac{P_a}{I_{\min}} = \frac{C_a \mu_{\max}^2}{U_{\min}^2}, \quad (10.27)$$

³ Логарифмическое выражение энергетического потенциала принято называть добротностью рыбопоискового прибора.

В качестве примера можно показать приведенные в работе Юданова [1967] полярные характеристики дальности рыбопоисковой станции «Палтус-М» для скоплений сельди разной плотности (без учета характеристики направленности обратного рассеяния целей), построенные по расчетным данным, и аппаратуры вертикальной локации «Кальмар». Они показывают, насколько сильно может измениться зона действия прибора в зависимости от вида регистрируемых рыб и плотности их концентрации (рис. 10.19 а).

При изменении коэффициента усиления приемного тракта изменяется максимальная дальность обнаружения прибора, а поэтому изменяется и дальность действия аппаратуры во всех направлениях. При уменьшении коэффициента усиления сокращается дальность обнаружения во всех направлениях, зона действия становится уже, поэтому изменением усиления может регулироваться не только максимальная дальность обнаружения прибора, но и ширина просматриваемой зоны, а также разрешающая способность по глубине (рис. 10.19 б, в) [Юданов, 1973].

10.7.2. Технические параметры

Излучаемая мощность (или акустическое давление, создаваемое аппаратурой при излучении) является одним из наиболее важ-

где C_a – акустическая постоянная рыбопоискового прибора; μ_{\max} – коэффициент усиления; U_{\min} – минимально допустимое напряжение регистрации эхосигналов.

В отличие от акустической постоянной, применяемой при расчетах плотности скоплений, энергетический потенциал позволяет оценивать реальную чувствительность гидроакустического прибора активной локации с учетом условий его применения. Энергетический потенциал гидроакустического прибора позволяет судить о поисковых возможностях аппаратуры в целом, дает представление о дальности действия прибора. Максимальную дальность действия прибора можно рассчитывать по формуле:

$$r^4 \cdot 10^{0,2\alpha r} = F \frac{\sigma}{4\pi} = F \frac{R_э^2}{4}, \quad (10.28)$$

где $R_э$ – радиус эквивалентного шара объекта.

Выражение для определения дальности r можно представить в общем виде:

$$r = r_0 \cdot 10^{-0,05\alpha r}, \quad (10.29)$$

где r_0 – дальность действия прибора при отсутствии затухания.

Прологарифмировав выражение (10.29), после преобразования получим

$$\log(r_0/r) = 0,05\alpha r. \quad (10.30)$$

Это уравнение легко решается графически. Левая часть уравнения, выражающая зависимость отношения r_0/r от величины α при различных значениях r_0 , представляет собой семейство кривых, показанных на рис. 10.20. Правая часть уравнения при разных значениях α соответствует семейству прямых на том же рисунке. Нужную величину дальности находят как точку пересечения заданной кривой с соответствующей прямой.

Расчетные значения дальности действия гидроакустических приборов могут несколько отличаться от реальных, т. к. используются грубые оценки уровней акустических шумов и затухания звука. Тем более лишь приближенно можно оценить теоретические возможности обнаружения приповерхностных и придонных скоплений, которые

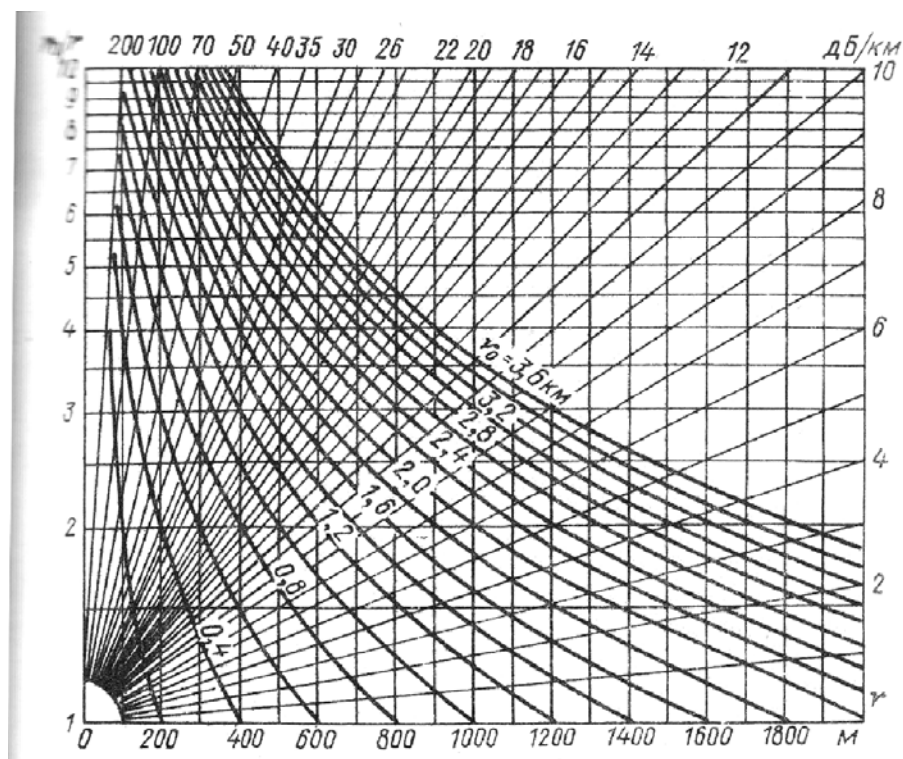


Рис. 10.20. Зависимость дальности обнаружения от затухания звука в воде. Левая вертикальная шкала – это значения r_0/r

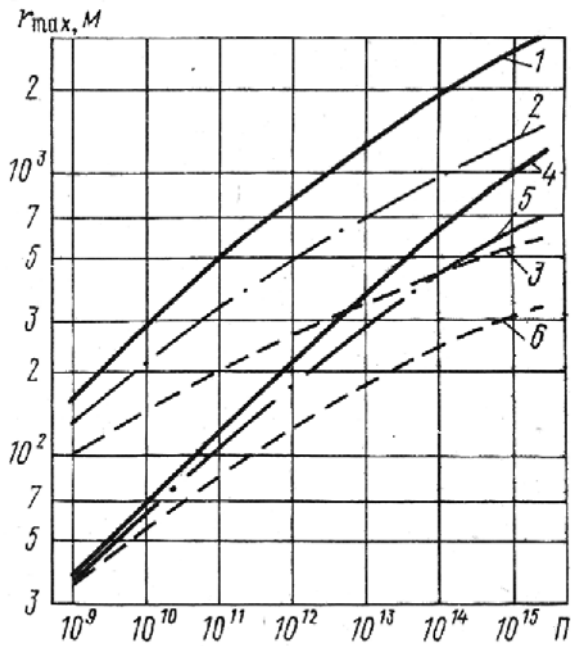


Рис. 10.21. Зависимость дальности обнаружения стандартных целей с $R_0 = 0,1$ м и $R_0 = 2$ м от энергетического потенциала аппаратуры

локатора «Сарган» на низкой частоте (20 кГц) $F = 7 \cdot 10^{13} m^2$ дальность обнаружения стандартной цели с $R_0 = 2$ м равна $r_{max} = 1700$ м.

У аппаратуры ЕК60 на частоте 38 кГц $F = 10^{15} m^2$ и глубина обнаружения цели с $R_0 = 0,1$ м будет составлять 1000 м, на частоте 120 кГц $F = 10^{16} m^2$ и глубина обнаружения той же цели будет равна 700 м.

Чем меньше энергетический потенциал, тем меньше дальность (или глубина) обнаружения объектов при той же силе цели или ее отражательной способности. На рис. 10.22 показано изменение дальности обнаружения при изменении энергетического потенциала аппаратуры. Уменьшение энергетического потенциала на 10 дБ приводит к сокращению дальности обнаружения примерно на 45% (рис. 10.22).

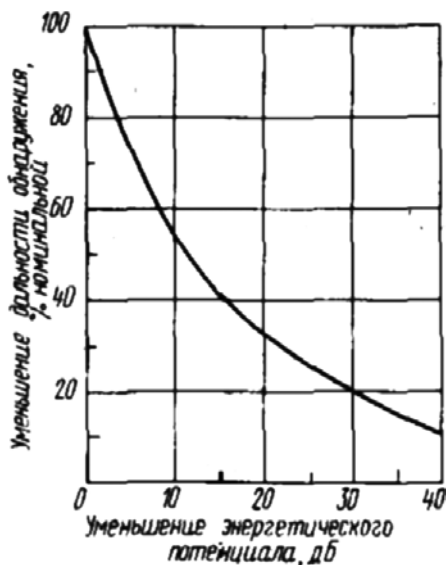


Рис. 10.22. Влияние F на дальность обнаружения [Юданов, 1969 а]

определяются не только разрешающей способностью аппаратуры, но и эффективностью работы расширителя масштаба регистрации скоплений, устройства отсечки донных сигналов, стабилизации антенны и т. д.

Расчетная дальность действия рыбопоисковых приборов по стандартным целям позволяет судить о их возможностях, сравнивать поисковые качества различной аппаратуры [Юданов, 1971]. На рис. 10.21 приведены рассчитанные по формуле (10.28) зависимости дальности обнаружения стандартных целей с $R_0 = 0,1$ м и $R_0 = 2$ м от энергетического потенциала аппаратуры, работающей на разных частотах [Юданов, 1992].

Из рисунка следует, например, что если у вертикального тракта комплекса «Сарган» в дрейфе судна и штилевую погоду на высокой частоте (136 кГц) энергетический потенциал $F = 9 \cdot 10^{14} m^2$, то дальность обнаружения стандартной цели с $R_0 = 0,1$ м равна $r_{max} = 300$ м. Для гидролокатора «Сарган» на низкой частоте (20 кГц) $F = 7 \cdot 10^{13} m^2$ дальность обнаружения стандартной цели с $R_0 = 2$ м равна $r_{max} = 1700$ м.

Ширина характеристики направленности антенн. Эффект направленного действия акустических антенн принято оценивать характеристиками (диаграммами) направленности, выражающими зависимость физической величины акустического поля (например, амплитуды колебаний, давления, интенсивности) от угла α между нормалью к активной поверхности антенны и направлением от преобразователя на заданную точку. При этом рассматриваемая физическая величина должна определяться на одном и том же расстоянии от центра антенн.

Ширина характеристики направленности антенны рыбопоисковой аппаратуры выбирается в зависимости от ряда факто-

ров: назначения прибора, требуемой дальности обнаружения, разрешающей способности, влияния дестабилизирующих факторов (качки судна и его рыскания и т. д.). В гидроакустической аппаратуре вертикального действия, предназначенной для поиска и обнаружения рыб на малых глубинах, основным критерием при выборе характеристики направленности в продольной плоскости является обеспечение регистрации отдельных рыб при максимальных скоростях поиска для уверенного обнаружения отдельных рыб на экране дисплея на фоне импульсных помех достаточно принять три-пять эхосигналов. Если остановиться на трех эхосигналах, то ширина характеристики в продольной плоскости судна, $\theta_{пр}$, может быть определена из соотношения:

$$\theta_{пр} = 2 \arctg(3v_c/2hv_1), \quad (10.31)$$

где v_c – скорость судна, h – глубина регистрации рыб, v_1 – частота следования импульсов локации.

Из этой формулы следует, что с уменьшением глубины нахождения объектов для их обнаружения требуются более широкие характеристики направленности антенн или большая частота повторения зондирующих импульсов. Ширина характеристики в поперечной плоскости $\theta_{п.п.}$ определяет величину просматриваемой зоны, кроме того, от нее зависят искажения в отображениях эха от скоплений рыб и неровностей дна. Чем больше $\theta_{п.п.}$, тем шире зона просмотра, но тем сильнее искажается на эхограмме картина распределения рыбы. Искажения при постоянной $\theta_{п.п.}$ увеличиваются с возрастанием глубины нахождения объекта. Возникает определенное противоречие, которое можно разрешить, например, введением нескольких характеристик направленности (по крайней мере, двух). Тогда при поиске на небольших глубинах используется самая широкая характеристика (особенно при поиске рыбы в толще водной среды), а для уточнения действительного распределения объектов проводится проверка переключением на узкую характеристику.

Существенные ограничения на возможность сужения характеристик направленности в обычной рыбопоисковой аппаратуре накладывают бортовая и килевая качки судна, вызывающие угловые смещения антенны. Большие угловые смещения характеристики приводят к неравномерному озвучиванию водной среды и даже к потере контакта с рыбой. Для обеспечения регулярной регистрации эхосигналов от рыб ширина характеристик направленности $\theta_{п.р.}$ и $\theta_{п.п.}$ должна быть не меньше углов соответственно килевой (ψ_k) и бортовой (ψ_b) качек судна. В рыболокаторах средней глубины обнаружения условие (10.31) уже не является определяющим, т. к. оно обычно выполняется с большим запасом, поэтому основную роль играют ограничения по углам качки судна.

Еще более серьезные требования к ширине характеристики направленности выдвигаются при необходимости уверенного обнаружения и регистрации промысловых объектов на свалах глубин и в придонном слое. В этом случае требуются значительно более узкие характеристики, которые практически не могут быть обеспечены из условий превышения углов качки. Единственным решением, способным обеспечить приемлемое обнаружение объектов в указанных случаях, является введение стабилизации акустической антенны или ее характеристик направленности. В связи с этим во многих современных рыболокаторах предусмотрена стабилизация характеристик направленности или по бортовой качке, или по бортовой и килевой качкам [Шварц, 1968; Эллис, 1968; Sublett, 1973; Simrad Echo, 1974; New gear and equipment, 1975; Schwarz 1975; Кудрявцев, Подлипанов, 1975]. Применение стабилизации также повышает надежность регистрации объектов при волнении моря, позволяет значительно сузить характеристику направленности антенны в продольной плоскости, особенно в случае работы на средних и больших глубинах, что приводит к увеличению коэффициента концентрации, т. е. повышению глубины обнаружения, снижению акустических помех, воспринимаемых приемно-усилительным трактом.

Для обеспечения эффективной регистрации рыбы на свалах и в придонном слое необходимо применение узких характеристик направленности во всех плоскостях, ши-

рина которых будет определяться в основном возможностями технической реализации систем стабилизации, т. е. сложностью, надежностью работы и стоимостью устройства. При стабилизации характеристики направленности, когда ее колебания (угловые смещения) при волнении моря практически отсутствуют, выбор $\theta_{п.р.}$ определяется в рыболокаторах средней и большой дальности действия только условием (10.30), поэтому в аппаратуре с большой дальностью действия угол $\theta_{п.р.}$ может быть очень мал. Так, при дальности обнаружения прибором рыбы на глубине 1500 м достаточен $\theta_{п.р.} = 2^\circ$ [Юданов, 1971]. В то же время такая глубина обнаружения отдельных рыб может быть достигнута только при очень высокой концентрации акустической энергии.

Из изложенного следует, что в рыбопоисковой аппаратуре вертикальной локализации универсального назначения практически нет какого-либо одного оптимального значения ширины характеристики направленности в обеих плоскостях. В такой аппаратуре должны предусматриваться различные характеристики направленности для обеспечения эффективного обнаружения рыбы на любых глубинах (в т. ч. разная ширина характеристики при поиске рыбы в толще воды, на свалах глубин и у дна). Следует отметить, что современные многоэлементные акустические антенны позволяют достаточно просто реализовать различные наборы характеристик направленности.

При современных многоэлементных многоканальных акустических антеннах с помощью электронной стабилизации можно более легко обеспечить управление отклонением оси характеристики от вертикального положения в ту или другую сторону при поиске придонной рыбы на свалах глубин (при наклонном дне).

В рыбопоисковых гидролокаторах с однолепестковой характеристикой направленности ее минимальная ширина определяется в основном возможностью надежного удержания контакта с целью при рыскании и качке судна, т. к. при работе с аппаратурой необходимо (особенно при прицельном лове), чтобы выбранное для облова скопление находилось под постоянным контролем до момента его захвата орудием лова, что, правда, не всегда удается реализовать, например, при разноглубинном траловом лове. В то же время широкая характеристика направленности сильно снижает эффективность и возможности аппаратуры при волнении моря из-за вредного воздействия дополнительных отражений от взволнованной поверхности воды, а также от дна. Особенно резко снижаются возможности гидролокаторов в случае волнения моря при работе на небольших глубинах, когда полезные эхосигналы от скоплений рыбы почти полностью забиваются отраженными сигналами от поверхности воды и от дна. Ситуация еще более усложняется, если аппаратура установлена на малых судах, имеющих большие углы и малые периоды качки даже при небольшом волнении.

Во избежание отрицательного влияния дополнительных отражений необходимо значительно сокращать ширину характеристики направленности, что осложняет удержание акустического контакта с обнаруженным скоплением (само обнаружение при этом также затрудняется из-за уменьшения количества эхосигналов от скопления). Возникает необходимость в стабилизации характеристики направленности. Хотя технически реализовать стабилизацию в рыболокаторах горизонтального действия труднее, чем в рыболокаторах вертикального зондирования, имеются примеры осуществления ее достаточно простыми и недорогими средствами при небольших габаритах систем стабилизации. Впервые в серийных рыбопоисковых гидролокаторах стабилизация акустической антенны маятникового типа была применена американской фирмой «Вестерн Электроник» — Wesmar. Она была реализована в гидролокаторах для малых рыбопромысловых судов, SS-160, SS-200 В и др. [Wesmar, 1973 а, 1973 б, 1973 в; Кудрявцев, 1977, 1978, 1979], что привело к их широкому внедрению на судах прибрежного лова и существенному повышению эффективности работы этих судов (система стабилизации обеспечивала компенсацию влияния на работу аппаратуры бортовой и килевой качек судна до 25°). В настоящее время в многоканальных гидролокаторах, как правило, предусматривается возможность стабилизации положения характеристик направленности акустических антенн.

Для определения границ скопления, его протяженности в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также удержания кромок скоплений и косяков при замете кошелькового невода целесообразно применение более узких характеристик направленности. Для более быстрой и надежной оценки границ скопления в горизонтальной плоскости и при слежении за кромкой косяка целесообразно иметь узкую в этой плоскости (в пределах нескольких градусов) и широкую в вертикальной характеристику направленности, в то же время при определении протяженности косяка в вертикальной плоскости удобна характеристика узкая по вертикали (также несколько градусов) и широкая по горизонтали. Наличие более узких характеристик не увеличит возможности аппаратуры из-за рыскания судна, имеющейся погрешности установки направления характеристики и трудностей отсчета угловых координат с большой точностью при используемых системах индикации углов поворота и наклона, тем более, что в случае применения аппаратуры в промысловых условиях большие точности оценки размеров скопления и его границ практически не требуются (больше нескольких градусов – 4–6).

Следует, однако, учитывать, что сужение характеристик направленности почти всегда связано с увеличением размеров антенны в этих направлениях или переходом на более высокие частоты (хотя имеются и некоторые другие способы сужения, например, мультипликативный прием и обработка сигналов антенн [Кудрявцев, 1978]).

В специальной рыбопоисковой аппаратуре, предназначенной, например, для исследования структуры скоплений, для количественной оценки, желательно иметь большую угловую разрешающую способность и соответственно очень узкие характеристики направленности антенны. Примерно такие же требования предъявляются и к станциям для обнаружения и регистрации придонной рыбы в стороне от судна. В электронно-сканирующих гидролокаторах одновременного кругового и секторного обзора, предназначенных для использования на промысловых судах, ширина характеристики направленности выбирается в большинстве случаев путем определенного компромисса между необходимой угловой разрешающей способностью, возможностями технической реализации и сложностью аппаратуры.

Частота следования излучаемых импульсов определяет скорость получения информации об отражающих объектах, т. е. количество эхосигналов, которые могут быть приняты от цели в единицу времени. При повышении частоты повторения зондирующих импульсов (с учетом, конечно, необходимой зоны обзора) увеличивается и число отраженных от объекта сигналов в единицу времени, т. е. может быть улучшена различимость и выделение данного объекта на фоне шумов и помех, уменьшен коэффициент распознавания полезных эхосигналов. Тем самым может быть повышена и дальность обнаружения. Более низкая частота следования по сравнению с максимально возможной для данной глубины или дальности используется в основном при применении аппаратуры для навигационных целей, когда уменьшение количества принимаемых эхосигналов не имеет большого значения, при поиске скоплений на небольших глубинах.

Диапазоны отображения и индикации в рыбопоисковой аппаратуре вертикальной локации большей частью выбирают исходя из необходимости обеспечения приемлемого вертикального масштаба регистрации отдельных рыб. Для увеличения m_v необходимо увеличивать l_p или уменьшать h_p . Если ранее при применении в ней самопишущих регистраторов имели место некоторые специфические требования к диапазонам отображения эхосигналов, то замена их современными электронными дисплеями практически сняла все вопросы. Кроме обзорных диапазонов в рыболокаторах для поиска рыбы предусматривается возможность крупномасштабного отображения трасс и комплекса эхосигналов с выбранных участков для более детального анализа показаний, в т. ч. и еще более крупномасштабная регистрация эхосигналов от рыбы и других промысловых объектов, например, из придонного слоя воды. Крупномасштабная регистрация эхосигналов со слоя воды значительной толщины обычно осуществляется посредством электронной задержки начала развертки времени относительно импульса излучения; применением различных скоростей развертки времени с помощью устройств упрежде-

ния посылки, а одновременное отображение информации в очень крупном масштабе с узкого слоя воды — посредством запоминания эхосигналов и последующего воспроизведения их со значительно большей скоростью в отдельном окне экрана в момент подхода развертки к точке, соответствующей границе слоя, выбранного для более детальной оценки показаний. Для надежной регистрации и анализа эхосигналов с упреждением посылки достаточно их отображения с вертикальным масштабом, который в 2–3 раза больше минимального (0,5 мм/м).

Длительность излучаемых импульсов является одним из основных технических параметров, определяющих мертвую зону, или минимальное расстояние (глубину), с которого может воспроизводиться эхосигнал от объекта, а также разрешающую способность гидроакустической эхолокационной аппаратуры по расстоянию или глубине. Чем больше длительность зондирующего импульса, тем большее расстояние занимает импульс в пространстве, тем больше должно быть расстояние между объектами, чтобы отраженные от них сигналы не сливались в один общий эхосигнал, а поступали на вход прибора раздельно во времени. Кроме того, длительность импульса влияет на дальность и глубину обнаружения объектов прибором.

Для повышения разрешающей способности и сокращения мертвой зоны аппаратуры желательно выбирать более короткий импульс. Однако между длительностью импульса и полосой пропускания приемного тракта существует обратно пропорциональная зависимость. В связи с этим укорочение импульса с соответствующим расширением полосы пропускания приводит к увеличению порога в приемном тракте за счет чего при той же мощности в зондирующем импульсе уменьшается дальность действия прибора. Кроме того, по мере повышения длительности излучаемых импульсов заметно возрастает четкость регистрации отдельных рыб и разреженных скоплений на фоне помех. При длительности импульсов 2–3 мс, например, эхо от одиночных рыб фиксируются на эхограмме достаточно длинными штрихами и легко выделяется на фоне помех. При длительности 0,5–1 мс труднее выделять полезные сигналы при наличии значительных импульсных помех. В аппаратуре вертикального действия длительность зондирующих импульсов обычно находится в пределах от 0,5 до 3–5 мс (в высокочастотных — нижний предел может доходить до 0,1 мс).

В аппаратуре горизонтально-вертикального действия диапазон изменения длительностей более широк: обычно от 0,5–1 до 20–30 мс. В некоторых станциях для большей дистанции обнаружения достаточно плотных скоплений (т. е. более плотных, чем скопления или концентрации рассеивателей, являющихся источниками объемной реверберации) неплохие результаты часто дает применение импульсов посылки от 30 до 100 мс, т. к. общий эхосигнал от такого скопления суммируется из отражений от многочисленных рыб, занимающих довольно большой объем. Увеличение длительности импульса излучения позволяет снизить порог обнаружения, тем самым повысить дальность действия. Максимально допускаемая длительность импульса обычно определяется появлением реверберации, маскирующей эхо; после чего соотношение эхо/реверберация при увеличении длительностей посылок не может быть улучшено.

Коэффициент усиления — параметр приемного тракта рыболокационной аппаратуры, определяющий во сколько раз увеличено напряжение эхосигнала в цепи от выхода антенны до выхода устройства воспроизведения. Величина коэффициента усиления зависит от чувствительности акустической антенны и параметров устройства воспроизведения — его порогового уровня (напряжения), определяемого обычно минимальным напряжением, необходимым для появления отметки сигнала на экране дисплея и др.

Чувствительность приемного тракта — это коэффициент пропорциональности, связывающий напряжение, получаемое на его зажимах, с акустическим давлением звукового поля у антенны, и определяемый величиной напряжения на его зажимах, вызываемого плоской волной единичного акустического давления. Чем меньше чувствительность антенны и выше пороговый уровень устройства воспроизведения, тем большим должен быть коэффициент усиления. Изменение коэффициента усиления приводит к измене-

нию дальности обнаружения промысловых объектов. Одновременно можно регулировать и ширину просматриваемой зоны (например, для уточнения показаний, уменьшения искажений в отображении эхосигналов).

Полоса пропускания частот приемного тракта. Кроме используемых в приемных трактах рыбопоисковых приборов законов ВАРУ большое влияние на представляемую оператору визуальную и звуковую информацию оказывают частотные полосы пропускания приемного тракта, которая, соответственно, является важным параметром аппаратуры. Полоса пропускания приемного тракта определяет уровень шумовой составляющей результирующего сигнала на выходе приемного тракта, что учитывается при выполнении расчетов акустического давления шумов судна. Работа большинства таких приборов связана с излучением и приемом импульсов и импульсных сигналов, представляющих собой «пакеты» синусоидальных колебаний, т. е. радиоимпульсы с определенным амплитудно-частотным спектром. Существует понятие оптимальной полосы пропускания системы, при которой обеспечивается наиболее выгодное соотношение сигнал/шум.

На рис. 10.23 показано примерное влияние полосы пропускания на форму импульса и соотношение сигнал/шум на выходе приемного тракта. При оптимальной полосе пропускания амплитуда сигнала приближается к амплитуде прямоугольного импульса и соотношение сигнал/шум наибольшее. При полосе пропускания, превышающей оптимальную, обеспечивается лучшее воспроизведение формы импульса, но различимость сигнала ухудшается вследствие возрастания уровня шума. При полосе пропускания уже оптимальной ситуация является наименее благоприятной как с точки зрения воспроизведения формы сигнала, так и получения соотношения сигнал/шум. Полоса пропускания, выбранная равной примерно $1/\tau$, близка к оптимальной. При этом обеспечивается максимум отношения пикового значения сигнала к среднеквадратичному значению помехи. С учетом возможных нестабильностей несущей частоты $\Delta f_{\text{нест}}$ (например, при изменениях температуры, влажности и др.) общая ширина полосы пропускания приемного тракта аппаратуры вертикального действия $\Delta f_{\text{в}}$ выбирается как $\Delta f_{\text{в}} = 1/\tau + \Delta f_{\text{нест}}$, т. е. несколько шире оптимальной.

Кроме того, при использовании зондирующих импульсов с огибающей величина полосы пропускания приемного тракта влияет на форму огибающей принимаемых радиоимпульсов на выходе приемного тракта. Известно, что при воздействии прямоугольного радиоимпульса на резонансную колебательную систему форма огибающей импульса на ее выходе искажается (рис. 10.23) за счет возникновения переходных процессов в начале воздействия (передний фронт импульса) и после окончания радиоимпульса (задний фронт импульса).

Так как практически в любой рыбопоисковой аппаратуре активной локации имеются крупномасштабные диапазоны регистрации эхосигналов, то и передний, и задний фронты импульса могут наблюдаться на ее дисплеях. Длительности $\tau_{\text{пф}}$ и $\tau_{\text{зф}}$, соответственно, переднего и заднего фронтов импульса равны между собой. С достаточной степенью точности можно считать, что их протяженность равна Q периодам частоты за

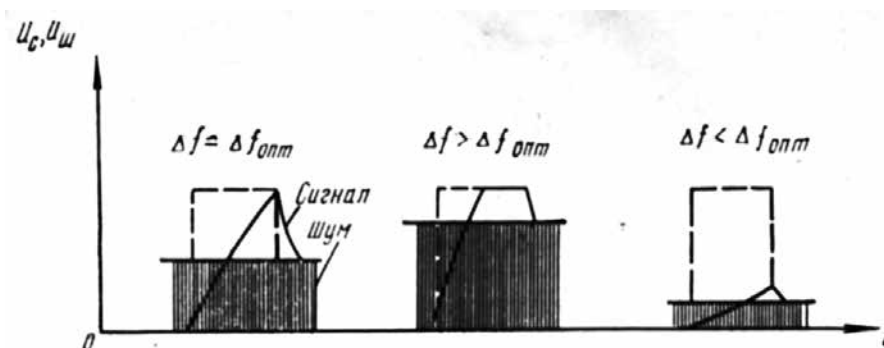


Рис. 10.23. Влияние ширины полосы пропускания на форму эхоимпульса и уровень шума

полнения радиоимпульса [Простаков, 1967]. Параметром Q определяется добротность резонансной колебательной системы, которая может быть рассчитана в соответствии со следующим выражением:

$$Q = (f_0 / 2\Delta f), \quad (10.32)$$

где f_0 – частота заполнения радиоимпульса; $2\Delta f$ – полоса пропускания приемного тракта на уровне 0,707.

Если принять допущение, что частотная характеристика полосового фильтра приемного тракта соответствует частотной характеристике одиночного колебательного контура, то для расчета переднего фронта радиоимпульса на выходе приемного тракта можно использовать следующее выражение [Простаков, 1967]:

$$U_{\text{пф}} = U_{\text{max}} [1 - 1/e^{\pi^2 \Delta f t}], \quad (10.33)$$

где $U_{\text{пф}}$ – амплитуда переднего фронта импульса в текущий момент времени t ; U_{max} – амплитуда импульса (при $t = \infty$ (при расчете принимается равной 1); $2\Delta f$ – полоса пропускания приемного тракта на уровне 0,707; t – текущее время, отсчитываемое от начала переднего фронта импульса.

При тех же допущениях для расчета заднего фронта радиоимпульса на выходе приемного тракта можно использовать следующее выражение [Простаков, 1967]:

$$U_{\text{зф}} = U_{\text{max}} (1/e^{\pi^2 \Delta f t}), \quad (10.34)$$

где $U_{\text{зф}}$ – амплитуда заднего фронта импульса в текущий момент времени t ; U_{max} – амплитуда импульса в момент окончания возбуждающего импульса (при расчете принимается равной 1); t – текущее время, отсчитываемое от начала заднего фронта импульса (совпадает с моментом окончания возбуждающего импульса).

В рыбопоисковых гидролокаторах сужению полосы пропускания препятствуют доплеровские сдвиги частоты. Если не предусмотрена компенсация влияния эффекта Доплера, то общая ширина полосы пропускания при горизонтальном зондировании Δf_r выбирается из условия (при скорости судна v_1 и цели v_2):

$$\Delta f_r = 4f_0 [(v_1 + v_2)/c + 1/\tau + \Delta f_{\text{несст}}],$$

где f_0 – несущая частота; c – скорость звука.

В рыбопоисковых приборах обычно используется ряд длительностей излучаемых импульсов, поэтому при изменении длительности послышки необходим переход на другую полосу пропускания. В основном это обеспечивается автоматическим переключением полосы пропускания приемного тракта с переключением длительности импульса излучения. Обеспечение лучшей помехоустойчивости гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры достигается и повышением коэффициента прямоугольности частотной характеристики приемного тракта, который определяется отношением ширины полосы пропускания на уровне 0,7 (по напряжению) к ширине частотной характеристики на уровне 0,1 или 0,05. При пологих частотных характеристиках приемно-усилительного тракта на его выход попадает значительно большее количество помех, лежащих вне полосы частот, занимаемых полезным сигналом.

10.8. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И РАБОТЫ УСТРОЙСТВ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЫБОПОИСКОВОЙ ЭХОЛОКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Некоторые из устройств и способов повышения эффективности эхолокационной аппаратуры разрабатывались для средств вертикальной локации, другие являются более универсальными.

Уже в первые годы применения рыболокационной аппаратуры вертикального действия с самопишущими регистраторами выявился серьезный ее недостаток, связанный

с низкой разрешающей способностью таких приборов при обнаружении и регистрации придонных объектов. Введение в рыболокаторы индикатора, позволяющего просматривать на экране эхосигналы от объектов с узкого придонного слоя в крупном масштабе и облегчающего разделение эхосигналов от рыбы и грунта (благодаря значительно большему динамическому диапазону электронной индикации отраженных сигналов со значительными различиями в их амплитудах по сравнению с обычным самописцем), способствовало частичному решению проблемы повышения разрешающей способности приборов при поиске рыб у дна.

Однако оставался целый ряд существенных эксплуатационных недостатков, один из которых связан с необходимостью постоянного наблюдения за экраном индикатора из-за отсутствия накопления информации (памяти). Кроме того, редкие посылки рыболокатора, связанные с малой скоростью распространения акустических колебаний, приводили к появлению мелькающего изображения эхосигналов на экране индикатора, что было утомительно для оператора. Следующий недостаток был связан с необходимостью постоянной подстройки начала линии развертки на экране при вертикальных перемещениях судна во время волнения моря, при быстрых изменениях глубины места и др. для удержания изображений, получаемых с узкого придонного слоя в пределах экрана индикатора.

Большую помощь в повышении эффективности рыбопоисковой аппаратуры вертикальной локации при облове промысловых объектов в придонных слоях оказало создание устройств типа «Белая линия», «Серая линия» или устройств «Отсечка грунта», которые позволяют увеличить возможности регистрации придонных рыб на экране дисплея отображения эхограмм. Действие этих устройств основано на использовании, как правило, значительного различия между интенсивностями эхосигналов от грунта и рыбы, т. к. коэффициент отражения звука от дна существенно выше коэффициента отражения его от рыбы, особенно от отдельных рыб и разреженных скоплений. Это свойство и используется в указанных устройствах для разделения отображения эхосигналов от придонных рыб и дна.

Схемы устройств «Отсечка грунта» обладают регулируемой избирательностью выделения эхосигналов по интенсивности или по амплитуде. При превышении эхосигналом определенного заданного уровня усилительный тракт запирается на небольшой промежуток времени или до момента снижения амплитуды сигнала ниже заданного уровня. Второй вариант предпочтительнее, т. к. позволяет получать информацию и о характере грунта, что важно при донном и придонном промысле рыбы. Для получения большей информации о характере грунта используется вариант устройства «Отсечка грунта» — «Динамическая линия». После приема эха от дна усилитель работает на другой характеристике. О плотности грунта следует судить по времени запирающего усилителя, т. е. по ширине белой полосы после отображения эха от кромки дна. Чем больше плотность грунта, тем шире белая полоса и наоборот. Для более эффективной работы указанных устройств также используется дополнительное различие в крутизне нарастания эха от грунта и рыбы.

В устройстве «Белая линия» при приходе эхосигнала от дна величина его быстро нарастает до заданного уровня запирающего. Однако при этом устройство обеспечивает регистрацию на экране дисплея передней части донного эха в виде тонкой черной (в современной аппаратуре цветной, соответствующей максимальной интенсивности) линии. Далее усилительный тракт полностью запирается и за узкой темной линией следует более широкая светлая белая полоса. Затем за белой полосой (после снижения уровня эха) регистрируется остальная часть эхосигналов от грунта. Последовательные пропуски в отображении эхосигналов на экране дисплея и создают область «Белой линии». Регулированием уровня запирающего усилительного тракта меняется ширина «Белой линии».

При таком способе получения отображения эхосигналов с помощью «Белой линии» имеется возможность также оценки и анализа характера дна, т. к. в зависимости от со-

става грунта характер и величина эхосигнала от него будут изменяться и, следовательно, при фиксированной установке регулятора уровня срабатывания будет меняться ширина белой полосы.

Устройство «Отсечка грунта» настраивается на эхосигналы от дна. Эхосигналы от рыбы в придонном слое обычно менее интенсивны, поэтому устройство от них не срабатывает и эхосигналы регистрируются обычным способом над белой линией слитно с тонкой темной линией кромки дна (рис. 10.24 *а*). В то же время имеющееся, например, возвышение на дне сразу можно отличить от скопления рыбы. В этом случае часто могут быть выделены даже отдельные рыбы, находящиеся достаточно близко у дна, по утолщению тонкой темной линии кромки грунта. При очень плотных скоплениях рыбы в толще воды или у дна, особенно на небольших глубинах, эхосигнал от них может иметь значительную величину и вызывать срабатывание устройства «Белая линия», что может служить дополнительным признаком при анализе эхограмм.

В устройстве «Серая линия» использовался несколько другой принцип разделения эхосигналов от грунта и рыбы, находящейся вблизи него. В этом случае применялись практически безинерционный метод срабатывания электронной схемы при приеме переднего фронта донного эхосигнала и неполное запирающее устройство усилительного тракта. В связи с этим на экране дисплея уже не фиксировался тонкой темной линией профиль морского дна, за которым следует белое пространство, а непосредственно от верхней кромки дна простиралась затененная серая (или другого цвета) зона-полоса, т. е. небольшой величины напряжение подавалось на схему дисплея. Далее за серой (или другого цвета) полосой регистрировалась в зависимости от интенсивности оставшаяся часть донных эх. Ширина серой полосы регулировалась как и в предыдущем случае. Над серой полосой, края которой повторяют очертания дна, выделялась более четко темная запись эха от рыбы, находящейся вблизи дна (рис. 10.24 *б*), если в данный момент она там имела. Как можно видеть из принципа работы устройства «Серая линия», в данном случае можно иметь более высокую разрешающую способность при регистрации рыбы вблизи дна, не менее, чем в два раза большую, чем при работе «Белой линией», т. к. минимальное утолщение темной тонкой линии профиля дна, которое можно заметить, равно примерно толщине этой линии.

В режиме регистрации с устройством «Серая линия» любые потемнения над серой полосой означают отметки от рыбы и их значительно легче различить, в т. ч. и отметки толщиной, равной толщине темной линии, при регистрации с «Белой линией». При регистрации сигналов с «Белой линией» имеется один существенный недостаток, проявляющийся при значительном волнении моря. Вследствие вертикальных перемещений судна в этом случае даже при неизменной глубине места постоянно изменяется расстояние от поверхности воды до дна моря, и на экране дисплея наблюдаются разрывы



Рис. 10.24. Режимы регистрации:
а — с «Белой линией»; *б* — с «Серой линией»

в трассе отображения линии контура грунта и тонкая черная линия, получающаяся при нормальной погоде, как бы размазывается. Это затрудняет распознавание и оценку эхосигналов от рыбы вблизи грунта (т. е. отметки от кромки дна при следующих один за другим циклах лоцирования будут воспроизводиться на несколько отличающихся расстояниях от нулевой линии – линии начала развертки). В результате ухудшается разрешающая способность аппаратуры при обнаружении рыбы у дна. При работе аппаратуры с устройством «Серая линия» подобное размывание (или колебание) кромки серой полосы во время волнения практически не будет сказываться на качестве отображения и возможностях распознавания показаний рыбы, т. к. более темные отметки эха над серой полосой означают отметки от рыбы. Регулируя ширину серой полосы в зависимости от волнения моря, можно обеспечить необходимое качество отображения эха от придонных объектов.

Несколько ухудшается положение при необходимости обнаружения разреженных концентраций рыб на значительных глубинах, когда приходится использовать максимальную чувствительность рыболокационной аппаратуры и работать на границе регистрации шумового, т. е. серого фона. При этом качество отображения в режиме «Серая линия» ухудшается и требуется постоянная тщательная регулировка уровней срабатывания для более или менее четкого выделения кромки и профиля серой полосы на общем сером шумовом фоне. В таких условиях, как правило, более эффективно применение устройства «Белая линия» [Fish News Int, 1972; Кудрявцев, 1978]. В связи с этим некоторые эхолоты вертикального действия имели в своем составе как устройство «Белая линия», так и устройство «Серая линия», что обуславливало достаточно эффективную регистрацию рыбы вблизи грунта в различных условиях промысла.

Вследствие различных отражающих свойств дна и объектов лова на практике приходится периодически регулировать (плавно или ступенчато) уровень или порог срабатывания устройств «Отсечка грунта», что создает определенные неудобства при эксплуатации, особенно при изменениях перепадов глубин. Преодоление указанного недостатка обеспечивается введением схемных устройств автоматического изменения уровня срабатывания «Серой линии» или «Белой линии» в зависимости от величины эха от дна [Mross, 1970].

Принцип работы схемы, обеспечивающей режим работы с контурной линией, также базируется на резком различии в интенсивностях эхосигналов от рыбы и дна. В этом случае эхо от грунта регистрируется в виде тонкой контурной линии, т. к. при приеме кромки донного эха усилительный тракт этим сигналом закрывается на значительный промежуток времени до момента излучения следующего зондирующего импульса. Применение указанного режима отображения целесообразно в том случае, когда не требуются характеристики морского дна, например, при пелагическом лове или определении глубин в навигационных целях.

Режим двойного усиления – это режим регистрации эхосигналов с автоматическим скачкообразным изменением коэффициента усиления. Такой способ отображения представляется полезным для эхолотов, установленных на исследовательских судах, а также при ведении донного промысла благодаря возможности получения оптимальной регистрации эхосигналов как от рыбы, так и от морского дна. При обычном отображении эхосигналов из-за значительных различий в интенсивностях эха от рыбы и дна нередко практически невозможно обеспечить более или менее пригодное для анализа и оценки одновременное воспроизведение обоих видов сигналов. Так как основным в рыболокаторах является обнаружение рыбы, то стремятся получить приемлемое отображение эхосигналов от рыбы. При этом эхо от грунта обычно автоматически усиливается до точки насыщения и регистрируется в виде однотонного фона. Однако, например, при донном и придонном лове важно получение сведений о характере грунта во избежание излишних аварий орудий лова, а также в связи с образованием промысловых концентраций рыбы и других донных объектов лова в основном на вполне определенных по характеру и строению грунтах.

Возможность более качественного одновременного анализа показаний рыбы и грунта реализуется специальным схемным устройством, которое при приеме передней кромки эха от дна автоматически уменьшает коэффициент усиления приемного тракта рыболокатора. В результате как бы компенсируется превышение уровня отраженных донных сигналов над эхосигналами от рыбы. При этом режиме используются два значения коэффициента усиления приемного тракта: одно применяется в интервале от цикла лоцирования до приема переднего фронта донного эха, а другое – от начала регистрации эха от грунта до момента излучения следующего импульса локации. Соответственно вводятся и два отдельных регулятора усиления. Применение режима двойного усиления целесообразно при исследованиях возможной корреляции между различными типами морского дна и популяциями рыбы, при изучении распределения и поведения донных и придонных рыб, а также для установления связи между свойствами грунтов и концентрациями рыбы [Torgvald et al., 1968].

Особенно эффективно использование этого режима в эхолокаторах, работающих на низких частотах и имеющих мощные генераторные устройства. Акустические колебания нижнего диапазона частот, применяемые в активной рыболокации (10–20 кГц), достаточно глубоко проникают в грунт, в то время как при использовании более высоких частот (порядка 30–50 кГц), можно иметь лучшую разрешающую способность для выявления различий в свойствах слоев, близких к поверхности дна.

Введение устройств «Отсечка грунта» позволило улучшить поисковые возможности эхолокационной аппаратуры вертикального действия при регистрации эхосигналов от придонных и донных объектов, однако при этом оставался серьезный эксплуатационный недостаток, особенно при использовании аппаратуры на промысловых судах донного лова, который заключался в малом вертикальном масштабе отображения эхосигналов с узкого придонного слоя. В то же время данные с небольшого участка воды у дна представляют наибольший интерес при придонном и донном лове. Например, при донных тралениях часто представляет интерес лишь рыба, находящаяся на расстоянии 3–5 м от грунта. Для большей наглядности изображения и облегчения оценки количества рыбы в таком узком слое целесообразно воспроизведение эхосигналов только с требуемого слоя воды в крупном масштабе, в т. ч. и с «привязкой» к эхосигналам от дна.

Для обеспечения регистрации или индикации эхосигналов от рыбы с привязкой к эх от дна, поступающих в любом случае позже первых, используется запоминание предыдущей информации (от предыдущего цикла лоцирования) и последующее воспроизведение ее по эхосигналам от дна. Указанная задача была решена путем разработки устройств «Привязки к грунту» (отображение подводной обстановки с придонного слоя «привязывается» к эхосигналам от дна, принимаемым за нулевые или опорные). При этом вертикальные перемещения судна при волнении и изменениях уровня дна не влияют на качество отображения. Расширение масштаба достигается применением режима считывания запомненных данных, обеспечивающего получение очень быстрой развертки времени. Без привязки воспроизведения информации в крупном масштабе к эхосигналам от грунта трудно обеспечить качественную регистрацию информации с узкого придонного слоя при волнении моря. Используется также и режим отображения эхосигналов с придонного слоя в крупном масштабе с сохранением контура дна (рис. 10.25).

Обязательным элементом всех рыбопоисковых эхолокаторов является схема временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ), с помощью которой обеспечивается автоматическое изменение коэффициента усиления приемного тракта эхолокационной аппаратуры после излучения зондирующего импульса. Непосредственно после окончания импульса лоцирования коэффициент усиления приемного тракта имеет небольшую величину и затем плавно увеличивается по определенному закону.

Устройства или алгоритмы ВАРУ обеспечивают поддержание постоянного уровня эхосигнала от определенной цели при изменении дистанции до нее [Кудрявцев В.И., 1979; Юданов, 1992; Кудрявцев Н.Н., 2001]. Компенсация уменьшения уровня сигнала

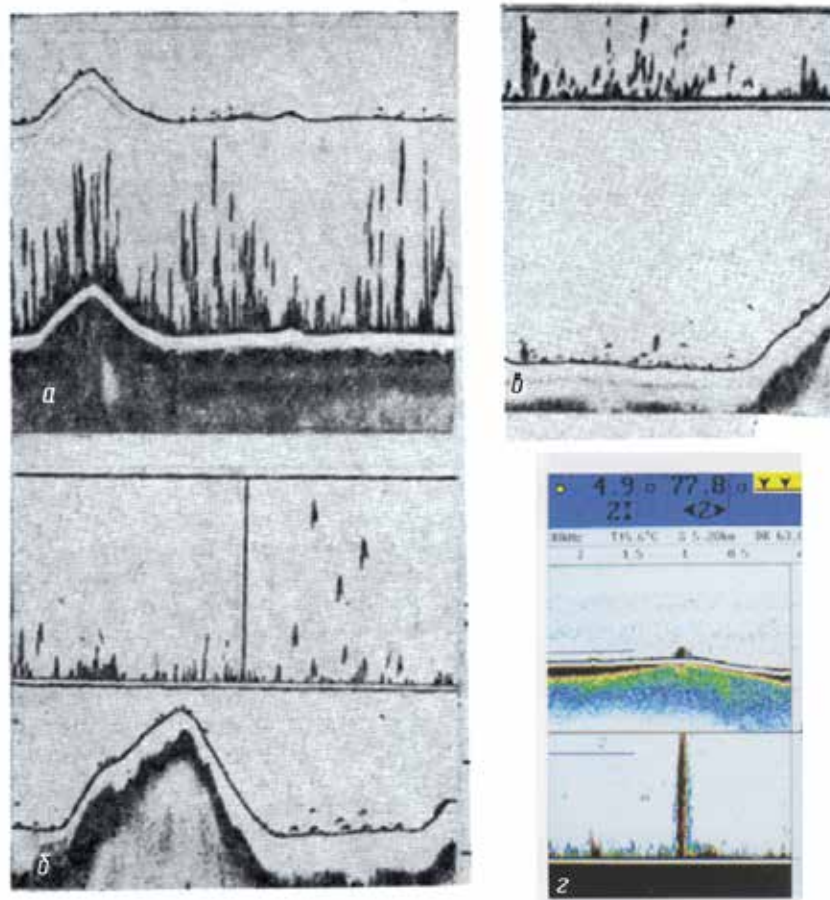


Рис. 10.25. Отображение эхосигналов от рыбы вблизи дна в крупном масштабе с сохранением контура дна (и с «Белой линией») — а; с «привязкой» к дну при различном характере изменения глубины — б и в; при отображении эхосигналов от рыбы в крупном масштабе в нижней части эхограммы — г

при увеличении дистанции обеспечивается путем соответствующего увеличения коэффициента усиления в аналоговых приемных трактах [Кобяков и др., 1986] или использования операций умножения на расчетные коэффициенты при программной реализации ВАРУ [Гаврилов и др., 2003].

Характер изменения коэффициента усиления можно представить в виде кривой, показанной на рис. 10.26. В качестве параметра оси абсцисс, приведенного на рис. 10.26 графика, используется дистанция до цели, которая пропорциональна времени от момента излучения зондирующего импульса до приема эхосигнала. В общем случае, как показано на графике, ось дистанции (времени) может быть разбита на три участка. Такое разбиение возникает из-за превышения динамического диапазона принимаемых сигналов над реализуемыми динамическими диапазонами устройств формирования ВАРУ.

На первом участке дистанции от 0 до r_n коэффициент усиления имеет минимальное значение и остается постоянной величиной. На участке дистанции от r_n до r_k собственно и осуществляется работа ВАРУ, в процессе которой коэффициент усиления изменяется от минимального до максимального значения по заданному за-

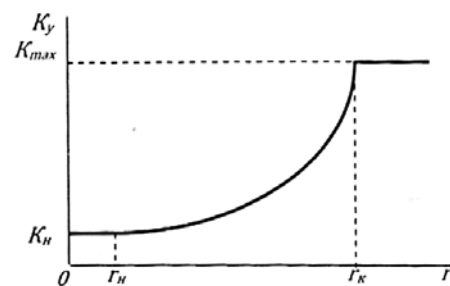


Рис. 10.26. Характеристика изменения коэффициента усиления приемного тракта эхолотатора с включенной ВАРУ

кону. На дистанциях больших r_k работа ВАРУ прекращается, и коэффициент усиления не изменяется, оставаясь равным K_{\max} .

В общем случае закон изменения коэффициента усиления напряжения $K_y(r)$ на участке дистанции от r_n до r_k может быть выражен в следующем виде [Кобяков и др., 1986]:

$$K_y(r) = K_n \left(\frac{r}{r_n} \right)^p \cdot 10^{0,0001\beta(r-r_n)}, \quad (10.35)$$

где K_n — коэффициент усиления приемного тракта в начале цикла приема; r — текущая дистанция, связанная с временем t соотношением $r=ct/2$; r_n — дистанция, с которой начинается работа ВАРУ; p — параметр, учитывающий скорость уменьшения звукового давления или напряжения эхосигналов от объектов с различной конфигурацией и структурой.

Наиболее часто в рыбопоисковых приборах вертикальной локации используются значения $p=1$ и $p=2$. В первом случае обеспечивается компенсация уменьшения амплитуды эхосигналов от протяженных поверхностей таких, как ровное морское дно или поверхность моря. Значение $p=2$ используется для компенсации уменьшения амплитуды эхосигналов от одиночных рыб, которые можно считать точечными объектами. В некоторых приборах, особенно в современных гидролокаторах, используются и другие значения p .

Напряжение на выходе приемного тракта в зависимости от дистанции (времени) определяется с учетом выражения (10.35) следующей формулой:

$$U_{\text{вых}}(r) = U_a(r)K_n \text{ при } r < r_n, \quad U_a(r)K_y(r) \text{ при } r_n \leq r \leq r_k, \quad U_a(r)K_{\max} \text{ при } r > r_k, \quad (10.36)$$

где $U_a(r)$ — напряжение на выходе антенны в моменты времени, соответствующие приему сигналов с дистанции r .

Выражения (10.35) описывают работу алгоритма ВАРУ при аппаратной реализации устройства ВАРУ в рыбопоисковых приборах. Но эти же формулы используются и при программной реализации алгоритмов ВАРУ путем расчета параметров K_n , $K_y(r)$ и K_{\max} специальными программными модулями.

Первоначально ВАРУ предназначалась в основном для снижения влияния реверберационных помех на воспроизведение (отображение) эхосигналов от промысловых

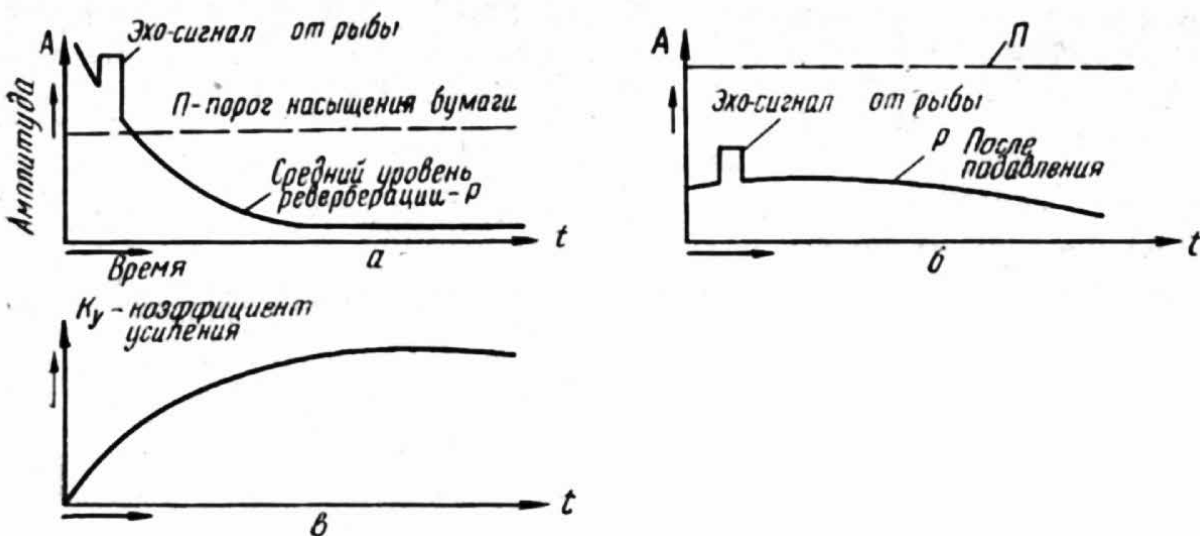


Рис. 10.27. Действие ВАРУ: выключенная ВАРУ (а), включенная ВАРУ (б) и характер изменения коэффициента усиления (в) [Haines, London, 1969; Кудрявцев, 1978]

объектов, т. к. при наличии в водной среде большого количества рассеивателей интенсивность реверберации сразу после излучения зондирующего импульса значительная, затем достаточно быстро убывает. Вследствие маскирующего действия реверберации эхосигналы даже от крупных косяков рыбы вблизи антенны рыболокатора могли не быть выделены на оконечных устройствах аппаратуры (рис. 10.27).

Из рис. 10.27 *а* видно, что при интенсивности реверберации, превышающей некоторый уровень насыщения, более сильный эхосигнал от крупной цели выделить на эхограмме невозможно. При уменьшении усиления такой эхосигнал, конечно, может быть выделен, но это приводит к сокращению дальности обнаружения. Введение схемы ВАРУ (рис. 10.27 *б, в*) подавляет как уровень реверберации, так и уровень полезного сигнала, однако, как показано на рис. 10.27 *в*, эхосигналы от указанного косяка при этом можно легко различить на фоне реверберации. При наличии схемы ВАРУ с широким динамическим диапазоном и большими пределами регулировки при горизонтальном и наклонном лоцировании часто может быть осуществлено достаточно эффективное снижение влияния как объемной, так и поверхностной реверберации в ближней зоне для эффективного обнаружения и индикации удаленных объектов. При горизонтальной локации на небольших глубинах целесообразно в ряде случаев использование ВАРУ и для ослабления влияния донных эхосигналов, принимаемых боковыми лепестками, т. к. они могут мешать нормальному восприятию (например, при слуховой индикации) эха от скоплений рыбы.

В аппаратуре вертикальной локации, особенно научно-исследовательской, применяются схемы ВАРУ, которые не только подавляют реверберационные помехи, но и служат для стационаризации принимаемых эхосигналов, т. е. для получения на выходе рыболокационной системы сигналов одинаковой силы от равных по отражающей способности объектов, находящихся на различной глубине от акустической антенны аппаратуры. Это схемы ВАРУ, реализующие более сложные (более точные) законы изменения коэффициента усиления приемного тракта во времени. В случае локации точечных целей (отдельных рыб и очень разреженных рыбных концентраций) вышеуказанному условию вполне удовлетворяет закон ВАРУ [Физические основы, 1955] $40\log r + 2ar$, вытекающий из основного уравнения гидролокации:

$$EL = SL - 40 \log r - 2ar + TS + A,$$

где EL – уровень эха, дБ; A – чувствительность приемного тракта, дБ.

Из этого следует, что если схема ВАРУ выполнена таким образом, что обеспечивается равенство $A = K(\text{постоянная}) + 40\log r + 2ar$, то принимаемый эхосигнал не будет зависеть от дистанции (или глубины) до объекта. ВАРУ, выполненное по закону $40\log r + 2ar$, компенсирует потери звука на расширение фронта волны ($40\log r$) и затухание звука при его распространении до объекта и обратно ($2ar$).

В случае локации дна или достаточно плотных и протяженных скоплений рыбы закон изменения ВАРУ $40\log r + 2ar$ уже не будет обеспечивать получение равных эхосигналов от одинаковых объектов при нахождении их на различных расстояниях, т. к. объекты большой протяженности занимают существенно большую часть акустического пучка рыболокатора, чем точечные цели. При локации таких объектов применяют ВАРУ, позволяющие изменять коэффициент усиления по закону $20\log r + 2ar$. Этот закон обеспечивает линейную пропорциональность между интенсивностью эхосигнала и плотностью скопления рыб одного размера независимо от расстояния до скопления. Если при отсутствии ВАРУ весьма сложно судить об объектах по величине принимаемых эхосигналов, то вводимая ВАРУ компенсация уменьшения интенсивности отраженных сигналов с увеличением расстояния соответствующим увеличением коэффициента усиления приемного тракта во времени облегчает анализ получаемых эхограмм и количественную оценку показаний.

Следует, однако, учитывать, что при практическом использовании эхолокаторов нередко весьма сложно осуществить разделение показаний на сигналы от точечных объектов и скоплений различного вида, что, несомненно, приводит к определенным по-

грешностям в оценке фактической силы целей. Дополнительные погрешности вносятся и вследствие имеющейся разницы между закладываемой в схему некоторой средней величиной α и фактическими его значениями в реальных условиях использования аппаратуры. Величина α может изменяться, например, в зависимости от степени насыщения водной среды пузырьками воздуха при волнении моря и т. д.

В гидролокаторах обычно имеется ряд законов ВАРУ: $10 \log r + 2\alpha r$, $15 \log r + 2\alpha r$, $20 \log r + 2\alpha r$, $25 \log r + 2\alpha r$ и $30 \log r + 2\alpha r$, переключаемых в зависимости от конкретных условий применения.

Качество и эффективность обнаружения эхосигналов от промысловых объектов определяется минимальной интенсивностью полезных эхосигналов, при которой они могут быть зарегистрированы рыбопоисковой аппаратурой на фоне акустических помех. Минимальную (пороговую) интенсивность эхосигналов I_c обычно связывают с уровнем акустических помех I_n через коэффициент распознавания δ_c (характеризуется отношением давления полезного сигнала к шуму в точке приема, при котором он может быть обнаружен на фоне помех), т. е.

$$I_c = \delta_c^2 I_n, \quad (10.37)$$

Допустимые значения коэффициента распознавания могут обеспечиваться различными техническими средствами. Из теории радиоприемных систем известно, что:

$$\delta_c = \frac{2K_\delta^2}{\Delta f \tau}, \quad (10.38)$$

где K_δ — коэффициент надежности приема, т. е. минимально допустимое отношение сигнала и помехи на входе дисплея; Δf — полоса пропускания частот приемного тракта; τ — время усреднения сигнала, равное длительности зондирующего импульса.

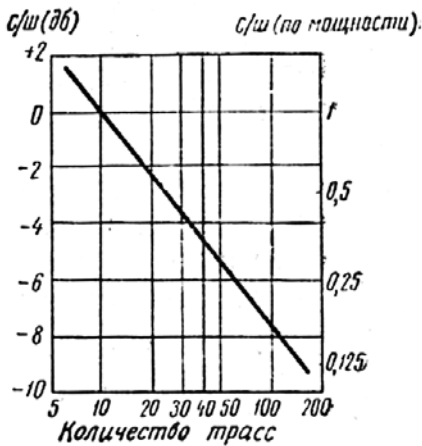


Рис. 10.28. Зависимость порога обнаружения от количества отметок эхосигналов на регистраторе [Tucker, 1966; Кудрявцев, 1978]

При отображении цели на экране дисплея, когда эхосигналы отмечаются параллельными штрихами, разборчивость изображения улучшается по мере увеличения количества эхосигналов. На рис. 10.28 приведена зависимость коэффициента K_δ^2 от количества эхосигналов, при котором отображение эха от цели на экране дисплея может быть распознано на фоне шумов.

Устройства и алгоритмы, обеспечивающие улучшение распознаваемости полезных эхосигналов на фоне импульсных, шумовых и реверберационных помех путем сопоставления сигналов, получаемых за несколько последовательных циклов излучения-приема, реализуются в системах вторичной обработки сигналов рыбопоисковых приборов [Кудрявцев, 1979; Оппенгейм, 1980; Кобяков и др., 1986].

Для борьбы с импульсными помехами в большинстве случаев используется метод накопления выборок огибающей эхосигналов, принимаемых за фиксированное количество циклов излучения-приема. Наиболее распространенный алгоритм, использующий метод накопления по m -циклам излучения-приема, может быть записан для фиксированной точки дистанции в виде следующего выражения [Кудрявцев, 1979; Кобяков и др., 1986]:

$$A_i^* = \frac{A_i + A_{i-1} + \dots + A_{i-m+1}}{m}, \quad (10.39)$$

где A_i^* – значение амплитуды огибающей эхосигналов, передаваемое в текущем цикле излучения-приема в устройства отображения информации; A_i – амплитуда огибающей эхосигналов, принимаемых в текущем цикле излучения-приема от фиксированной точки дистанции; A_{i-1} , A_{i-m+1} – амплитуды огибающих эхосигналов, зафиксированные в запоминающих устройствах в предшествующие циклы излучения-приема для той же фиксированной точки дистанции.

Реализация обработки в соответствии с выражением (10.39) при больших значениях m требует больших объемов оперативной памяти. В связи с этим в рыбопоисковых приборах часто используется рекурсивный алгоритм, реализуемый в соответствии со следующим выражением [Кобяков и др., 1986]:

$$A_i^* = A_{i-1}^* + \frac{A_i - A_{i-1}^*}{k_p}, \quad (10.40)$$

где A_{i-1}^* – значение амплитуды огибающей эхосигналов, рассчитанное и переданное в устройства отображения информации в предшествующем цикле излучения-приема; k_p – коэффициент рекурсии (целое положительное число).

Уменьшение количества отображаемых отметок протяженных во времени помех (шумов и реверберации) обеспечивается в рыбопоисковых приборах с помощью различных пороговых устройств [Кобяков и др., 1986]. В простейших пороговых устройствах величина порога устанавливается вручную оператором. Однако более эффективны автоматические пороговые устройства, которые обеспечивают формирование величины порога для каждой точки лоцируемого пространства с учетом изменяющихся со временем характеристик помехи. Величина порога Π может рассчитываться как по данным только текущего цикла излучения-приема независимо от предыдущих циклов, так и с учетом данных, полученных в предыдущих циклах излучения-приема. В первом случае величина порога для определенной точки пространства обычно рассчитывается как среднее арифметическое некоторого количества выборок огибающей эхосигналов, расположенных в окрестности этой точки. Эту операцию можно представить в виде следующего выражения:

$$\Pi_i = \sum_{k=i-n}^{i+m} \frac{A_k}{2n+1}, \quad (10.41)$$

где A_k – значение амплитуды k -й выборки огибающей эхосигналов; i – номер пространственной дискреты, для которой рассчитывается порог; n – полуширина окна, используемого для расчета величины порога.

Отсчет номера пространственной дискреты i может производиться как по дистанции (обычно в аппаратуре вертикальной локации), так и по углу (в многолучевых рыбопоисковых приборах). Чтобы исключить влияние на величину порога случайных импульсных помех, может использоваться рекурсивный алгоритм, подобный описываемому выражением (10.40). В этом случае в выражение (10.39) вместо значений амплитуд подставляются значения порогов, рассчитанные по формуле (10.41), соответственно, для текущего и предшествующего циклов излучения-приема. Обработка эхосигналов с учетом полученных значений порогов выполняется чаще всего в соответствии со следующим выражением [Кобяков и др., 1986]:

$$A_i^* = A_i \text{ если } A_i > k_n \Pi_i, \text{ и } 0, \text{ если } A_i \leq k_n \Pi_i, \quad (10.42)$$

где k_n – масштабный множитель ($k_n > 1$), обеспечивающий учет статистических параметров помехи.

Довольно часто алгоритмы вторичной обработки, используемые в данном рыбопоисковом приборе, неизвестны, но в рекламных материалах сообщается, что их использование позволяет увеличить дальность обнаружения с дистанции R_1 до дистанции R_2 . В этом случае, воспользовавшись основным уравнением гидролокации [Кобяков и др.,

1986], можно получить следующее выражение для выигрыша Q в соотношении сигнал/помеха:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_1^2} 10^{0,0001\beta(R_2 - R_1)}. \quad (10.43)$$

Фирмой «Симрад» (Норвегия) [Simrad, 1974, 1975] в свое время было разработано устройство «МС Сигнал Процессор» для повышения эффективности работы рыболокаторной аппаратуры горизонтального действия с одной характеристикой направленности, в т. ч. и существующих станций. В основу устройства положен метод улучшения обнаруживаемости эхосигналов путем последовательного их приема и накопления. В данном устройстве происходит накопление трех последовательно приходящих эхосигналов от подводных объектов, например, от рыбы. Как было показано, в этом случае выходное напряжение сигнала может в три раза превышать амплитуду огибающей отдельного эхосигнала, тогда как уровень помех в общем случае будет оставаться примерно тем же, что и при отсутствии накопления. Тем самым может быть повышен порог обнаружения и при работе устройства на регистраторе будет фиксироваться значительно меньше отметок помех и шумов (вероятность ложной тревоги будет иметь значительно меньшую величину). Благодаря этому данное устройство обеспечивало снижение или иногда полное подавление (отсутствие отметок помех) шумовых помех, создаваемых гребным винтом, главным двигателем и другими судовыми механизмами, рыболокаторными установками, работающими на соседних судах, а также части реверберационных помех, если их характеристики отличаются при последовательных излучениях зондирующих импульсов.

Действие устройства «МС Сигнал Процессор» показано на рис. 10.29 *а, б, в*. На рис. 10.29 *а*, представлена упрощенная блок-схема части гидролокатора с устройством обработки эхосигналов, на рис. 10.29 *б* – процессы трех последовательных зондирований гидролокатора и $1/3$ величины выходного сигнала с выхода устройства «МС Сигнал Процессор» на стопе судна. Принимаемые сигналы, поступающие в обычной станции с выхода приемного устройства на регистратор, в данном случае проходят к нему через «МС Сигнал Процессор». В связи с тем, что в гидролокаторах последовательные эхосигналы от объектов имеют большую скважность, в этом устройстве обработки применен электронный блок памяти и с выхода его снимается сумма эхосигналов от трех циклов лоцирования, т. е. принятых во время последнего и запомненных от двух предшествующих. Соответственно, эхосигналы от скопления рыбы, появляющиеся на одном и том же расстоянии от импульса излучения, будут иметь интенсивность в три раза большую по сравнению с интенсивностью импульса помехи, появляющегося каждый раз на различной дистанции от импульса посылки (если первоначально импульс помехи и одиночный эхосигнал имели равные интенсивности). Вследствие неизбежных флуктуаций амплитуды одиночного эхосигнала увеличение суммарной амплитуды в среднем будет несколько меньшим. Если затем увеличить порог примерно в три раза, что эквивалентно делению суммарных выходных напряжений устройства обработки на три, такие импульсы помех практически не будут фиксироваться или будут отмечаться очень слабо.

Когда судно движется в направлении цели, эхо от одного и того же скопления будет появляться с каждой посылкой на более близком расстоянии от нулевого импульса. Для исключения влияния скорости судна на характеристики обнаружения предусмотрена компенсирующая схема, которая может вводить необходимую коррекцию автоматически по данным судового лага или управляться оператором вручную. На рис. 10.29 *в* представлена реальная эхограмма, полученная с использованием данного устройства. Для сравнения слева приведены отметки и трассы эха с отключенным, а справа – с включенным устройством. Сигналы от гидролокаторов на соседних судах большей частью также приходят в различные моменты времени относительно момента очередного цикла локации, поэтому подавляются аналогично импульсам других помех.

Эффект улучшения обнаруживаемости эхосигналов при их последовательном накоплении практически используется в рыболокации со времени появления самопишущих

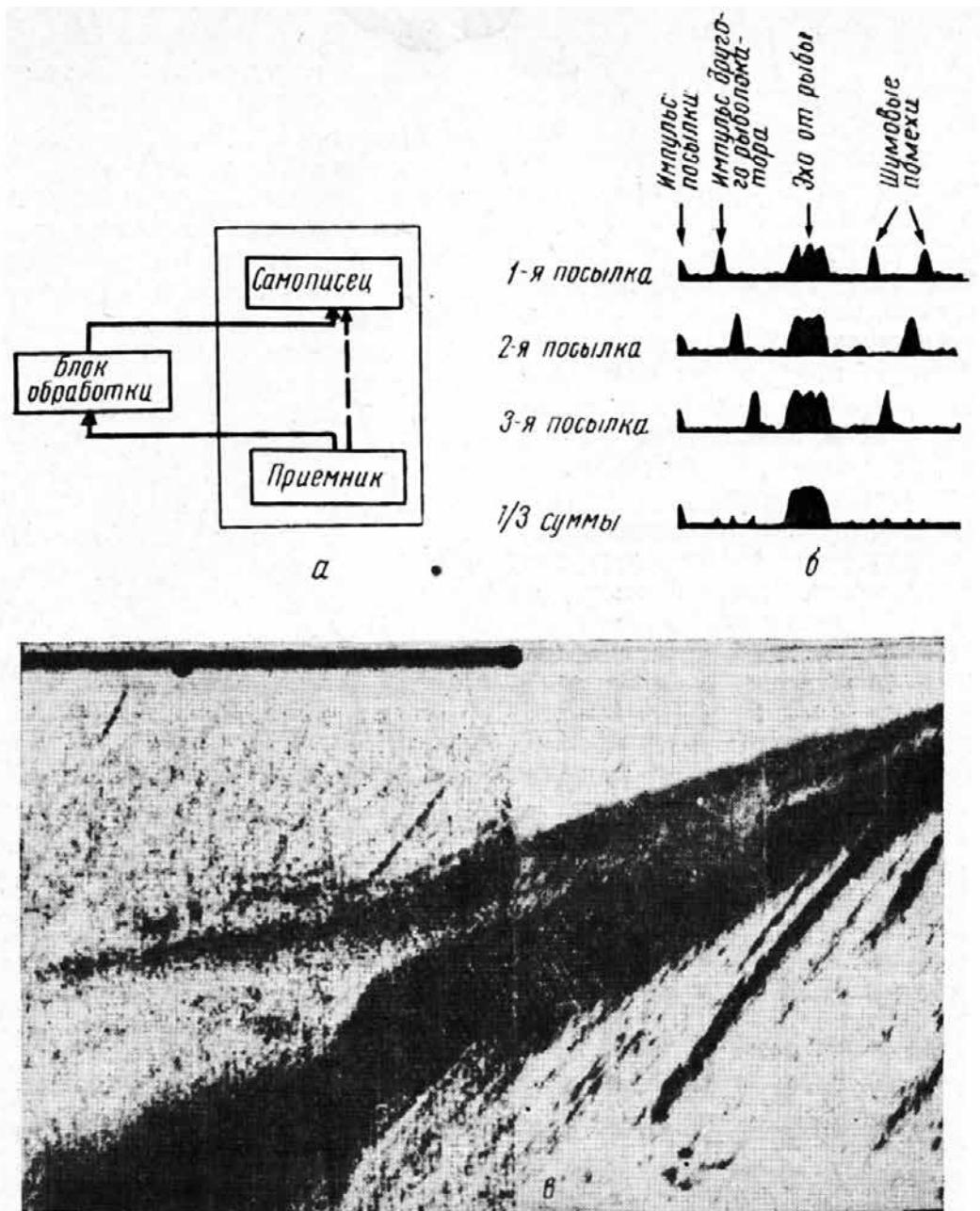


Рис. 10.29. Блок-схема (а), принцип работы (б) и эхограмма, иллюстрирующая работу устройства обработки эхосигналов (в)

регистраторов как в рыболокаторах вертикального, так и горизонтального действия, а также электронных индикаторов секторного и кругового обзора с яркостной отметкой при достаточно длительном послесвечении экрана ЭЛТ. Однако в основном он служит для облегчения распознаваемости эхосигналов от рыбы на фоне отметок шумовых и других помех. Выделение трасс принятых эхосигналов даже при наличии большого количества отметок помех обеспечивается благодаря визуальной корреляции последовательности зафиксированных отметок сигналов, так как они в общем случае характеризуются высоким значением коэффициента корреляции (каждая последующая отметка эхосигнала от одного объекта или скопления должна находиться рядом с предыдущей). При увеличении числа принимаемых эхосигналов от объекта и отметок от него обнаруживаемость полезного эхосигнала улучшается.

Так как шум в большинстве случаев является случайным процессом, его выбросы воспроизводятся в различных точках в течение каждой развертки времени. В то же время импульсы эхосигналов приходят и отмечаются при последовательных развертках времени близко один от другого.

На рис. 10.28 была представлена экспериментальная зависимость порога обнаружения при отображении эха от количества эхотрасс. Выражение «порог обнаружения» здесь означает наименьшее соотношение сигнал/шум, при котором обнаружение сигнала является практически полностью определенным (с вероятностью скажем большей, чем 0,95 или 95%).

10.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

Результаты практического использования рыболокационной аппаратуры при поиске промысловых рыбных скоплений показывают, что эффективность обнаружения эхосигналов от рыбы часто существенно зависит от длительности излучаемых импульсов. Можно считать, что эта эффективность определяется отношением энергии эхосигналов к уровню помех. Хотя при рыболокации достаточно однородных объектов небольшой протяженности, уменьшение длительности импульса снижает уровень реверберации, не уменьшая уровня эхосигнала, к большинству реальных рыбных скоплений это не относится. Косяки рыбы нельзя сравнивать со сплошными однородными объектами, т. к. они представляют собой совокупность многочисленных дискретных отражателей или рассеивателей акустической энергии. В связи с этим сокращение длительности импульсов зондирования при лоцировании скоплений рыбы зачастую приводит к снижению интенсивности эха от них.

Влияние длительности импульса локации на обнаруживаемость объекта-цели можно легко видеть даже при регистрации отдельных рыб: при большей длительности зондирующих импульсов эхосигналы от рыбы становятся более различимыми. Увеличение длительности импульсов приводит к повышению энергии излучения и энергии приходящего отраженного сигнала. Тот же эффект наблюдается и при локации скоплений, однако в этом случае существуют определенные пределы влияния длительности излучаемых импульсов на эффективность обнаружения. При импульсах большой длительности энергию эхосигналов можно считать независимой от энергии зондирующих импульсов, т. е. от их длительности. Получающаяся нелинейная зависимость энергии эхосигналов от скоплений рыбы при длинных посылках объясняется затуханием акустической энергии в водорыбной среде, занимаемой скоплением. Передний фронт импульса посылки в этом случае удален от заднего настолько, что часть энергии вследствие многократных отражений от рыб внутри скопления и поглощения телами рыб безвозвратно теряется. В результате увеличение длительности посылки не будет приводить к увеличению энергии приходящего сигнала, т. е. существует некоторая предельная длительность излучаемых импульсов, при которой при прочих равных условиях обеспечивается максимальная дальность обнаружения данного рыбного скопления. Она зависит в основном от плотности концентрации рыбы в скоплении. Указанные предельные длительности импульсов посылки при достаточно протяженных реальных скоплениях, как правило, оцениваются величинами, превышающими 100 мс.

Следует, однако, учитывать, что увеличение энергии излучаемых импульсов будет улучшать обнаруживаемость объектов лишь тогда, когда дальность действия ограничивается шумовыми помехами. При наличии сильных реверберационных помех, в частности объемной реверберации, увеличение энергии посылок будет повышать и энергию реверберационных помех, т. к. они связаны с собственным излучением рыболокационной аппаратуры. В результате обнаруживаемость объектов не будет улучшаться или будет улучшаться незначительно. В этом случае и уменьшение энергии излучения практически не меняет характер различимости полезного сигнала (или меняет в небольших пределах). При обнаружении локальных объектов, скоплений небольшой протяженно-

сти и компактных плотных косяков при сильной реверберационной помехе обнаруживаемость полезных эхосигналов может быть улучшена сокращением длительности импульсов лоцирования за счет пропорционального снижения интенсивности реверберации при сохранении постоянной амплитуды полезного эхосигнала. А в случае наличия достаточно протяженных и не очень плотных концентраций рыбы, когда эхосигнал приходит не от одной почти сплошной поверхности (а суммируется из отражений от многочисленных рыб, занимающих значительный объем и имеющих различную плотность концентрации), сокращение длительности посылки приводит к существенному снижению уровня эхосигнала от рыбы.

В то же время при практическом использовании судовой рыболокаторной аппаратуры во многих случаях основные ограничения на дальность ее действия накладываются шумовыми помехами (в эхолотаторах вертикального действия они всегда играют преобладающую роль), не связанными с работой самой аппаратуры. Поэтому для повышения эффективности обнаружения эхолотаторов весьма перспективным является использование энергетических характеристик эхосигналов. Этому, в частности, способствует и применение корреляторов. Однако, как было указано, эффект использования коррелятора типа К-100 повышается с возрастанием длительностей импульсов посылки, т. е. при уменьшении разрешающей способности аппаратуры по дистанции (или глубине). Что касается разрешающей способности по дистанции и точности определения расстояний, то эти параметры рыболокаторной аппаратуры зависят от формы зондирующих импульсов. Количественно разрешающая способность эхолотатора по дистанции (также и по углу) оценивается той минимальной разницей в координатах двух целей, при которой возможно уверенное раздельное обнаружение целей и измерение их координат. Оценивая качественно процесс разрешения, можно считать, что надежность разрешения зависит как и в случае обычного обнаружения, прежде всего, от отношения энергий эхосигналов и шума. Чем больше это отношение, тем меньшая разница в параметрах разрешаемых сигналов может быть уверенно отмечена в воспроизводящем оконечном устройстве эхолотатора. В принципе, если бы шум отсутствовал, можно было бы улавливать самые малые различия в параметрах эхосигналов. Однако на практике способность оператора (или, может быть, какого-либо автоматического анализатора) отличать малую разницу в параметрах разрешаемых сигналов имеет границы, определяемые физиологическими (или техническими) особенностями оператора.

Кроме отношения энергий эхосигналов и шума на достоверность разрешения большое влияние оказывает форма разрешаемых сигналов и, в первую очередь, их протяженность по параметру разрешения. Чем уже разрешаемые сигналы по этому параметру, тем ближе друг к другу они могут располагаться при условии их надежного разрешения, т. е. тем выше будет разрешающая способность. При одинаковой разнице в параметрах разрешения лучше разделяются более узкие сигналы. Это подтверждает и практика: лучшая разрешающая способность по расстоянию (дальности) достигается при импульсах малой длительности, а по угловым координатам — в случае применения антенн с узкими характеристиками направленности.

Однако, как известно, чем меньше длительность сигнала, тем шире его частотный спектр. Следовательно, чем шире частотный спектр зондирующего импульса, тем выше разрешающая способность аппаратуры и точность измерения координат объектов. В то же время уменьшение длительности излучаемых импульсов приводит к уменьшению энергии сигналов, а значит к сокращению дальности действия аппаратуры. В связи с этим для повышения эффективности эхолотаторов целесообразно использование сигналов, у которых произведение длительности импульса τ_c на ширину его спектра $\Delta f_{\text{сп}}$ имеет максимальное значение. Этому условию не удовлетворяют сигналы простейшей формы, у которых $\tau_c \Delta f_{\text{сп}} \approx 1$. Увеличение энергии таких сигналов возможно за счет повышения излучаемой мощности, что ограничивается целым рядом факторов (возможностями акустических антенн, генераторов, увеличением габаритов аппаратуры и т. д.). В то же время возрастание дальности действия аппаратуры при сохранении не-

обходимой разрешающей способности может быть достигнуто увеличением произведения $\tau_c \Delta f_{\text{сн}}$ путем применения зондирующих импульсов сложной формы. Импульс, модулированный по какому-либо параметру (частоте, фазе, амплитуде), имеет всегда более широкий спектр, чем немодулированный, при одинаковой длительности. Таким образом, осуществляя, например, амплитудную, фазовую или частотную модуляцию излучаемых импульсов, можно значительно расширить их спектр или при значительно большей длительности импульса получить ширину его спектра, равную ширине спектра немодулированного импульса меньшей длительности.

Применение сложных сигналов позволяет иметь большую дальность действия эхолокаторов при сохранении приемлемой разрешающей способности. Сложные сигналы (импульсы посылки) имеют широкий спектр частот или большое значение произведения ширины спектра на длительность импульса $\tau_c \Delta f_{\text{сн}} \gg 1$. Практическое применение в настоящее время находят линейная частотная модуляция (а также гиперболическая) и фазовая манипуляция сигналами. При применении импульсов посылки с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией увеличение выходного соотношения сигнал/шум за счет использования энергии сигналов может быть достигнуто с помощью так называемого метода временного сжатия импульса. Существуют две разновидности этого метода – суммирование с точностью до фазы (додетекторное суммирование) и суммирование с точностью до огибающей (последетекторное суммирование).

При додетекторном суммировании может быть достигнута значительно большая помехоустойчивость, чем при последетекторном, однако в этом случае требуется, чтобы фазовая структура сложного эхосигнала не была нарушена или чтобы изменения фазы не влияли (или оказывали небольшое воздействие) на суммирование. Когда цель состоит из множества практически случайно расположенных отражателей-рассеивателей (рыб), обеспечить указанное условие весьма сложно и суммирование может не произойти. При последетекторном же суммировании нарушение фазовой структуры эхосигнала значения не имеет. Введение соответствующей схемы обработки сигнала позволяет получить «сжатие» по времени выходного сигнала при частотно модулированном входном сигнале по сравнению с обычным немодулированным. Этот эффект оценивается коэффициентом сжатия $K_{\text{сж}}$, который при $\tau_c \Delta f_{\text{сн}} \gg 1$ определяется как $K_{\text{сж}} \approx \tau_c \Delta f_{\text{мод}}$, где $\Delta f_{\text{мод}}$ – девиация частоты внутри импульса. Следовательно, степень сжатия сигнала зависит от произведения девиации частоты $\Delta f_{\text{мод}}$ входного сигнала на его длительность

τ_c . Что касается амплитуды импульса на выходе, то она будет в $\sqrt{K_{\text{сж}} / 2}$ раз больше ам-

плитуды импульса на входе фильтра [Сиверс и др., 1959; Теоретические основы радиолокации, 1964; Сколник 1965; Moss, Walsh, 1970].

Так как система обработки (фильтр) представляет собой пассивную систему, то энергия сигнала на выходе должна быть такой же, как и на его входе. Поэтому увеличение амплитуды импульса неизбежно вызывает соответствующее уменьшение его длительности (оптимальный фильтр приемника разрушает внутриимпульсную ЧМ, сохраняя ширину спектра, и тем самым уменьшает длительность сигнала). При такой трансформации сигнала соотношение сигнал/шум по энергии не изменяется, но улучшается разрешающая способность по дистанции. Следовательно, при заданной длительности излучающего импульса, выбранной исходя из получения необходимой дальности (глубины) обнаружения, можно обеспечить большую разрешающую способность. Наиболее целесообразно применение указанного метода обработки при вертикальном лоцировании придонной рыбы на больших глубинах, когда наряду со значительной глубиной обнаружения рыбы требуется и высокая разрешающая способность аппаратуры. Пример реального излучаемого импульса с внутриимпульсной ЧМ, его частотный спектр и принятый эхосигнал после сжатия показаны на рис. 10.30.

Упрощенная схема возможной реализации метода временного сжатия импульса с суммированием по огибающей представлена на рис. 10.31. Отраженный от объекта ча-

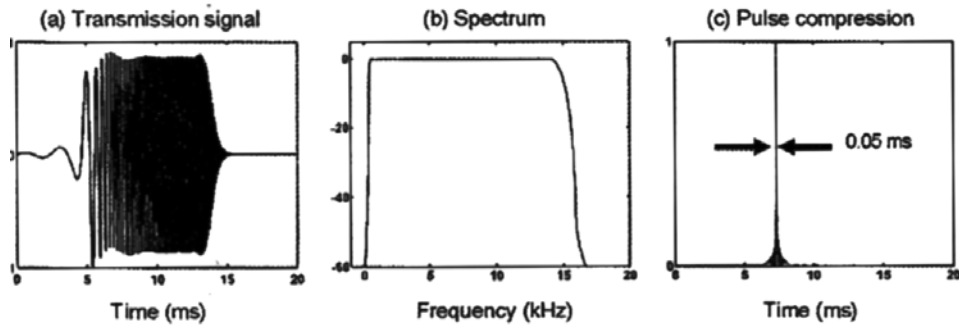


Рис. 10.30. Реальный излучаемый импульс с внутриимпульсной ЧМ, его частотный спектр и принятый эхосигнал после сжатия

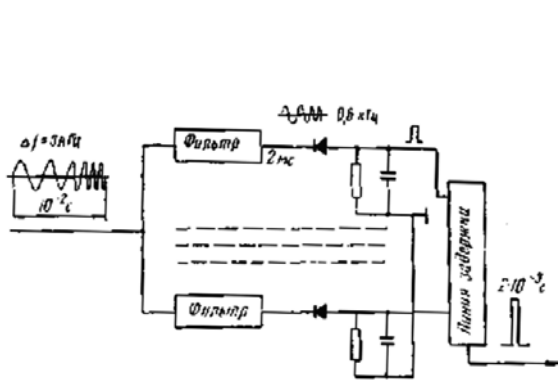


Рис. 10.31. Схема временного сжатия импульса

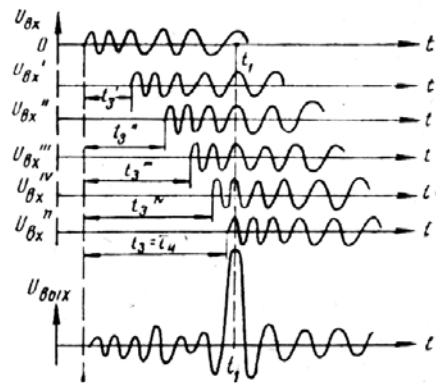


Рис. 10.32. Сигналы на входе и выходе оптимального сжимающего фильтра

стотно-модулированный сигнал поступает на гребенку фильтров, имеющую суммарную полосу частот, равную девиации частоты несущей зондирующего импульса (и эхосигнала). С помощью гребенки фильтров эхосигнал разбивается на ряд коротких импульсов, сдвинутых между собой во времени. Число этих импульсов и девиация частоты внутри каждого импульса определяется числом фильтров в гребенке. Далее импульсы на выходе каждого фильтра детектируются, интегрируются цепью RC и поступают на отводы линии задержки (время задержки равно длительности исходного импульса). На выходе линии получается импульс, длительность которого равна длительности импульса на выходе каждого из фильтров, но амплитуда его больше во столько раз, сколько фильтров имеет гребенка. Разрешающая способность по глубине будет определяться длительностью импульса после сжатия.

Фильтр сжатия может быть выполнен также в виде диспергирующей линии задержки (ЛЗ) обладающей дисперсией, т. е. имеющей зависимость от частоты групповую скорость распределения волны в ней и сумматора. Диспергирование достигается тем, что в сумматоре одновременно складываются сигналы, поступающие с разных отводов линии и имеющие поэтому различные задержки t_3 (рис. 10.32).

Пусть в момент времени $t = t_1$ импульс полностью вошел в линию. Тогда срез импульса, на котором частота f_c сигнала и $U_{ВХ}$ минимальная, окажется в начале линии ($t_3 = 0$). В следующих отводах, где задержка больше ($t_3 = t_3', t_3'' \dots$), частота сигнала пропорционально больше; с наибольшей задержкой $t_3 = \tau$ придет фронт импульса, где f_c максимальная. Таким образом, колебания проходят по линии тем меньший путь (групповая скорость их тем больше), чем меньше f_c . Отводы в ЛЗ располагаются таким образом, чтобы в момент времени t_1 сигналы со всех отводов суммировались в фазе, образуя короткий импульс большой амплитуды. Фазы слагаемых до момента t_1 и после него расходятся, в результате на остальном интервале времени суммирования амплитуды (назы-

ваемые обычно боковыми лепестками) будут значительно меньшими. Боковые лепестки «сжатых» импульсов достаточно слабые (первые боковые лепестки меньше максимального на 13 дБ). С возрастанием глубины модуляции расхождение между фазами суммируемых сигналов при отходе от точки t_1 будет наступать быстрее, поэтому длительность сжатого импульса будет тем меньше, чем больше девиация частоты Δf .

Указанный метод уже использовался в некоторой гидроакустической эхолокационной аппаратуре, например, в станции бокового обзора дальнего радиуса действия «Глория» с буксируемой акустической антенной. Станция «Глория» работала на частоте 6,4 кГц, имела излучаемую акустическую мощность 10 кВт и длительность излучаемых импульсов 2 с. С помощью этой аппаратуры была получена дальность обнаружения косяков сельди до 13 км [Long-range side-scan sonar, 1973; Rusby, 1970, 1973]. Благодаря излучению импульсов большой длительности обеспечивалась значительная дальность обнаружения, а использование внутриимпульсной частотной модуляции колебаний с последующим сжатием, принимаемых эхосигналов во времени служило средством обеспечения достаточно высокой разрешающей способности аппаратуры. Подобные устройства применялись и в более низкочастотной гидроакустической аппаратуре, с помощью которой осуществлялось обнаружение рыбных скоплений и на еще больших дистанциях, чем «Глорией» [Weston and Revie, 1971; Underwater acoustics, 1974; Weston и др., 1974].

Гиперболическая внутриимпульсная ЧМ, инвариантная к доплеровским сдвигам, была применена в рыбопоисковом гидролокаторе «Лещ-М» [Заярный, Зыбин, Кудрявцев, 2006]. Ее использование, кроме повышения разрешающей способности аппаратуры, позволило снизить уровень реверберационных помех. Реверберация, возникающая при излучении тональных импульсов, отличается по частоте от их несущей частоты и имеет более широкий частотный спектр. Это расширение спектра обусловлено как конечной длительностью импульса излучения, так и вследствие эффекта Доплера от перемещения носителя и движения рассеивателей, создающих реверберацию. Испытания подтвердили высокую эффективность работы гидролокатора с ИГЧМ сигналом в условиях мелкого моря по сравнению с тональным сигналом благодаря значительному снижению уровня реверберационных помех. Это можно видеть из рис. 10.33.

О более высокой разрешающей способности по расстоянию при внутриимпульсной ЧМ можно судить и по отображениям эха от косяков (хамса, пеленгас) при лоцировании станцией в вертикальном направлении (рис. 10.34) [Заярный, Зыбин, Кудрявцев, 2006].

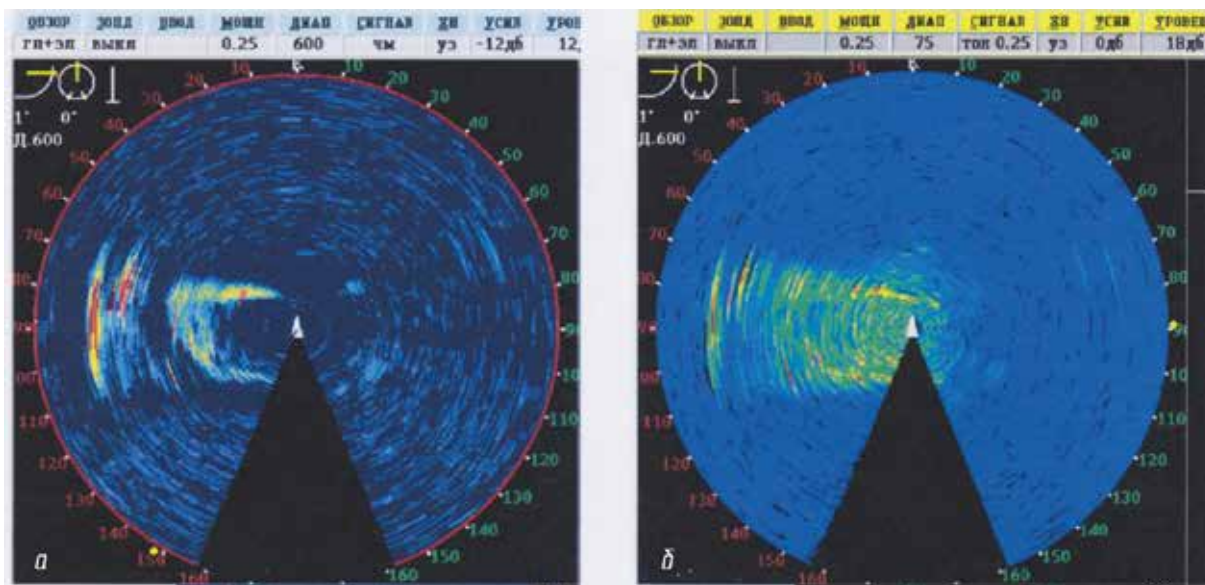


Рис. 10.33. Отображение эхосигналов гидролокатора «Лещ-М» при локации причальной стенки при использовании ИГЧМ – а и тонального импульса излучения – б

Все более расширяется применение гиперболической внутриимпульсной ЧМ в многоканальных гидроакустических рыбохозяйственных эхолокационных системах. Она используется в последней модели рыбопоискового гидролокатора объемного сканирования SX90 норвежской фирмы Симрад, в многоканальных гидролокаторах одновременного секторного обзора SEAPIX (Франция) и ПГЛС (Россия).

Большого расширения спектра сигнала при одновременном увеличении его длительности можно достигнуть путем применения импульсов посылки, модулированных шумами. Этот способ пока не используется из-за трудностей, связанных с его реализацией. Основная сложность заключается в том, что обработка сигналов должна проводиться в корреляционных приемниках, для которых требуется «копия» излученного шумового сигнала; эта копия должна запоминаться в течение времени запаздывания эхосигнала, что представляет довольно сложную техническую задачу. Могут использоваться и так называемые шумоподобные сигналы, например, высокочастотные колебания, фаза которых изменяется через некоторые интервалы времени Δt . Манипуляция фазы проводится таким образом, чтобы спектр сигнала был достаточно широким, приближающимся к спектру шумового сигнала. «Запоминание» закона манипуляции фазы проводится с помощью оптимального фильтра. Хотя принципиально фазу можно изменять на любой угол, на практике чаще всего используется манипуляция на 180° . Таким образом, на «кодových» интервалах фазы колебаний могут отличаться одна от другой на π .

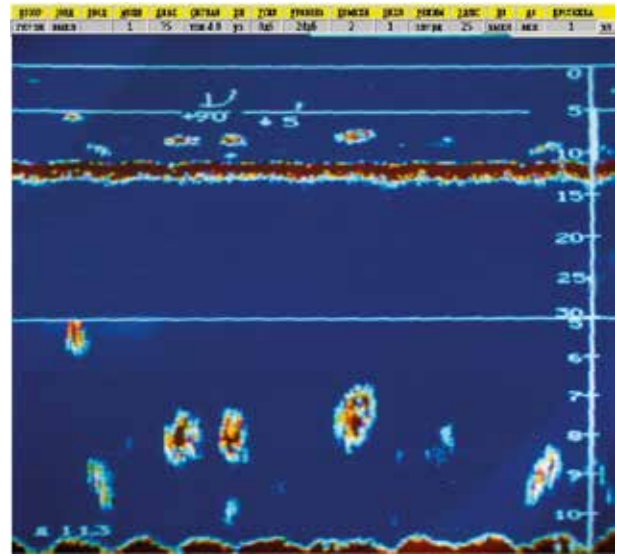


Рис. 10.34. Отображения эха от косяков рыбы на дисплее гидролокатора «Лещ-М»: сверху обзорный диапазон, внизу – расширенный слой 5–11 м

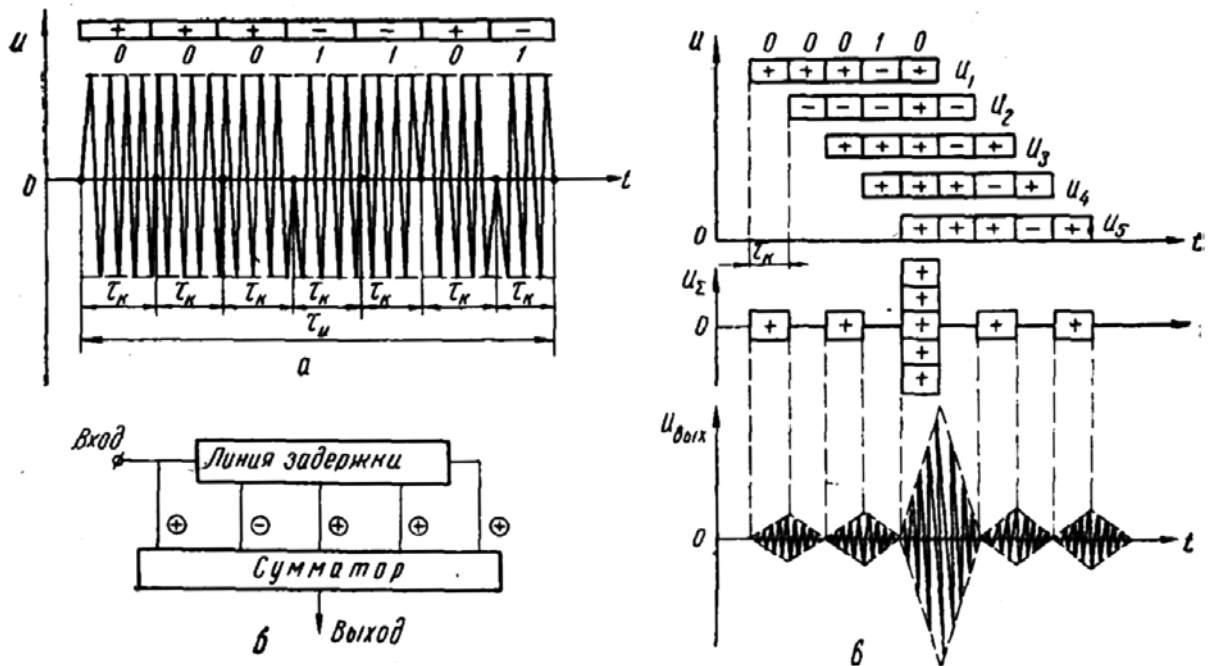


Рис. 10.35. Зондирующий импульс с внутренней фазовой манипуляцией (а), оптимальный фильтр для фазоманипулированного сигнала (б) [Радиолокационные устройства., 1970] и временные диаграммы – справа (в)

В результате зондирующий импульс t_n может быть представлен n -м количеством соприкасающихся парциальных (частных) импульсов длительностью $t_n = t_n/n$, сдвинутых по фазе относительно предыдущего парциального импульса на угол $\Delta\varphi = 0$ или π . При $\Delta\varphi = 0$ двоичный код парциального импульса 0 (или +) или 1 (или -), не меняется, а при $\Delta\varphi = \pi$ — меняется на обратный (рис. 10.35 *a*). Оптимальный фильтр устройства обработки таких сигналов (рис. 10.35 *б*), состоящий из линии задержки с отводами и сумматора, совершает операцию, обратную формированию зондирующего импульса, разрушает фазовую манипуляцию и сжимает импульс по длительности от t_n до $t_k = t_n/n$. Следовательно, расширение спектра зондирующего излучения в n раз, осуществляемое в генераторе в результате внутриимпульсной фазовой манипуляции, позволяет во столько же раз сжать импульс во времени при оптимальной фильтрации в приемнике. Линия задержки в приемнике имеет отводы с интервалами τ_k и такие же параметры, как и формирующая в генераторе. Порядок чередования знаков, с которыми производится суммирование напряжений с отводов (т. е. декодирование), выбирается обратным тому, который был при формировании — кодировании.

На временных диаграммах (рис. 10.35, справа) последовательности импульсов на входе (U_{1-5}) и выходе (U_{Σ}) сумматора показаны условными знаками (+), (-), чтобы сосредоточить внимание на начальных фазах парциальных импульсов. В задержанных на $2\tau_k, 3\tau_k, 4\tau_k$ последовательностях U_{1-5} (для взятого в качестве примера кода 00010) знаки одинаковы, а в задержанной на τ_k и повернутой по фазе на π последовательности U_2 — обратные по сравнению с входной последовательностью U_1 , имеющей код 00010.

Сумматор производит алгебраическое сложение импульсов в каждом кодовом интервале, и когда последний импульс кодовой последовательности U_1 входит в линию задержки, то на выходе сумматора (рис. 10.35, справа) образуется прямоугольный импульс U_{Σ} с максимальной амплитудой, которая больше исходной в 5 раз. В общем случае коэффициент сжатия равен числу кодовых интервалов n , т. е. в оптимальном фильтре длительность импульса уменьшается от τ_n до $\tau_k = \tau_n/n$ и соответственно в n раз возрастает мощность сигнала. Далее на выходе фильтра, оптимального для одиночного прямоугольного импульса длительностью τ_k (рис. 10.35, справа), получаются треугольные импульсы с пиковыми значениями, пропорциональными амплитудам соответствующих по времени импульсов U_{Σ} . При надлежащем выборе модулирующего кода фазоманипулированные импульсы после сжатия имеют боковые лепестки с равными, но более низкими (более чем на 13 дБ) уровнями по сравнению с частотно-модулированными.

Основная трудность составления кода, по которому модулируется фаза, заключается в том, что необходимо обеспечить большую протяженность кода, т. е. неповторяемость закона изменения фазы для возможно большего количества временных интервалов Δt .

При этом необходимо выполнить и второе условие, а именно: напряжение на выходе оптимального фильтра, которое в этом случае представляет собой автокорреляционную функцию сигнала (фазоманипулированного), не должно иметь больших «боковых выбросов» или «остатков». В настоящее время известно большое количество кодов, удовлетворяющих этим требованиям. К ним прежде всего относятся коды Баркера, Хаффмена, коды нулевой последовательности и др. [Радиолокационные устройства, 1970]. Протяженность кодов Баркера ограничена 13 знаками. В табл. 10.1 приведена последовательность изменения фаз кода Баркера при различной его длине — N .

Упомянутые выше изменения фаз 0001101 и 00010 являются кодами Баркера при $N=7$ и $N=5$. Формирование таких сигналов осуществляется с помощью балансного модулятора БМ, генератора высокой частоты (ω_0) ГВЧ и источника управляющих импульсов (рис. 10.36). Последний состоит из генератора импульсов ГИ, вырабатывающего импульсы длительностью $\tau_n = \Delta t$, линии задержки с отводами и сумматора. Линия задержки имеет $N-2$ отводов, располагающихся так, что задержка сигнала между двумя соседними отводами равна Δt . В сумматоре происходит сложение импульсов со всех отводов со знаками, определяемыми кодом. Коды нулевой последовательности име-

Таблица 10.1. Последовательность изменения фаз кода Баркера при различной его длине

Число кодовых интервалов	Изменения фазы на кодовых интервалах												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3	0	0	π	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	0	0	0	р	0	—	—	—	—	—	—	—	—
7	0	0	0	р	р	0	π	—	—	—	—	—	—
11	0	0	0	р	р	р	0	π	π	0	π	—	—
13	0	0	0	0	0	р	π	0	0	π	0	π	0

ют значительно большую протяженность (N достигает 1000 и даже 2000–4000). Формирование управляющих импульсов такой последовательности осуществляется с помощью устройства, состоящего: из генератора импульсов, линии задержки с отводами, логических элементов типа ИЛИ и сумматора. Более сложна реализация оптимального фильтра, линия задержки которого должна задерживать сигнал на время $t_{\text{зад}} = (N-1) \Delta t$ и иметь большое количество отводов ($N-2$). Тем не менее, такие кодовые последовательности весьма перспективны. Коэффициент сжатия для них достигает большой величины $K_{\text{ск}} = N$. Следовательно, эти сигналы могут обеспечить получение высокой разрешающей способности эхолотаторов при большой длительности зондирующих импульсов, т. е. при большой глубине (дальности) обнаружения объектов. Ширину спектра фазоманипулированного сигнала можно ориентировочно выразить величиной $\Delta f_{\text{сп}} \approx 1/\Delta t$.

Таким образом, увеличение дальности (глубины) обнаружения может быть достигнуто увеличением длительности излучаемых импульсов (соответственно, энергии излучения) при сохранении допустимой с технической точки зрения импульсной мощности. Расширение же частотного спектра импульсов при применении внутриимпульсной модуляции позволяет одновременно получить хорошее разрешение по дистанции (глубине).

10.10. ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭХОЛОКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА БОКОВОГО И ТРАВЕРЗНОГО ОБЗОРА

Свое обычно используемое название указанная разновидность эхолотационной гидроакустической аппаратуры (side-look sonar) получила в связи с особенностью применяемого в ней способа обзора. Станция имеет острую характеристику направленности в горизонтальной плоскости и очень широкую в вертикальной, расположенную перпендикулярно диаметральной плоскости носителя антенны. Кроме того, она имеет наклон в вертикальной плоскости в направлении дна для обеспечения большей ширины озвучивания донной поверхности, т. к. основное назначение указанной аппаратуры заключается в обнаружении препятствий на дне. Обзор пространства моря и поверхности дна происходит по мере продвижения носителя вперед, т. е. за счет перемещения самого носителя аппаратуры. Обычно станция имеет две акустические антенны, характеристика направленности одной из которых направлена в сторону правого борта, а другой — в сторону левого. Благодаря этому по мере продвижения носителя просматривается сплошная полоса, симметричная относительно линии пути.

В последние десятилетия имеется ряд примеров эффективного применения таких устройств в рыбном хозяйстве [Тревогов, 1997]. Из-за наличия указанных специфиче-

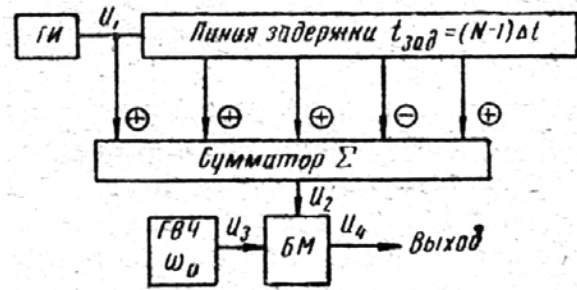


Рис. 10.36. Схема формирования фазоманипулированных сигналов [Радиолокационные устройства, 1970]

ских особенностей подобные гидроакустические станции относят к отдельной разновидности эхолокационных систем, тем более что интерес к ним постоянно растет, в т. ч. в связи со все большим развитием исследований дна моря, донных ландшафтов и донных биотопов. Подобная аппаратура полезна и для рыбопромысловых целей при оценке характеристик дна в районах промысла. Кроме того, работа со станциями бокового обзора показала, что они могут оказывать помощь и при обнаружении рыбных скоплений [Long-range side-scan sonar, 1973].

Важной отличительной чертой аппаратуры бокового обзора является высокая угловая разрешающая способность в горизонтальной плоскости благодаря очень узкой характеристике направленности в этой плоскости (и, соответственно, значительного размера акустической антенны по длине). Имеются, например, станции бокового обзора с шириной характеристики направленности порядка 20° на частоте 200 кГц. Они обеспечивают за один цикл лоцирования просмотр полосы шириной всего 1,5 м (длина полосы в этом случае составляла около 700 м). Наличие очень узкой характеристики направленности в горизонтальной плоскости часто является одной из причин размещения антенны станций бокового обзора в буксируемых носителях, существенно уменьшающих возможные колебания характеристики, особенно при волнении моря.

При исследовании характеристик рельефа дна антенну иногда буксируют на сравнительно небольшом удалении от дна (например, до 10 м). В этом случае характеристика направленности оказывается под небольшими углами скольжения к поверхности дна, что позволяет фиксировать даже небольшие неровности и выступы на дне (трещины, скалы и другие неровности дна, а также выступающие над поверхностью дна предметы). Аппаратура бокового обзора может быть использована при обследовании районов донного и придонного тралового лова для обнаружения и нанесения на карты опасных мест (во избежание повреждения тралов).

При использовании станций бокового обзора в случае движения носителя недалеко от дна характеристики получаемых при этом эхограмм довольно сильно отличаются от характеристик обычных эхограмм гидроакустической рыболокационной аппаратуры и требуется определенный навык для их расшифровки и анализа. На получаемой панораме эха от дна (на экране дисплея) каждая линия развертки времени представляет собой «след» (отображение эхосигналов от дна) пересечения акустического импульса с поверхностью дна. Выбором скорости движения носителя, ширины характеристики направленности антенны, частоты повторения излучаемых импульсов и скорости развертки времени в дисплее отображения может быть обеспечено получение в некотором роде изображения пространственной формы обнаруженного объекта. Для достижения относительно постоянной интенсивности отображения при изображении сравнительно ровной поверхности дна осуществляется нормирование донных эхосигналов изменением усиления приемного тракта во времени (чтобы компенсировать ослабление отраженного сигнала вследствие рассеяния, поглощения и изменения угла падения или скольжения).

При появлении неоднородностей или объектов на дне или над ним на пути распространения излученного импульса интенсивность принимаемого эхосигнала увеличивается (вследствие повышения коэффициента отражения, так как выступы и предметы на ровном дне будут находиться под большими углами к падающим лучам). При больших размерах неровностей дна или находящегося на нем объекта по сравнению с длиной волны акустических колебаний на обратной стороне этих неровностей образуется зона акустической тени, и за эхосигналом более высокой интенсивности будет наблюдаться резко ослабленный сигнал, приходящий из зоны тени. При относительно ровном дне отображения эха на экране дисплея будут примерно одинаковой интенсивности (например, при определенном положении регулятора усиления в виде одного слабого тона) с более темными отметками отражения от объекта (или неровностей), переходящей в светлую отметку акустической тени. В общем случае при наличии ряда неровностей или объектов будут чередоваться темные и светлые (акустические тени) оттенки ото-

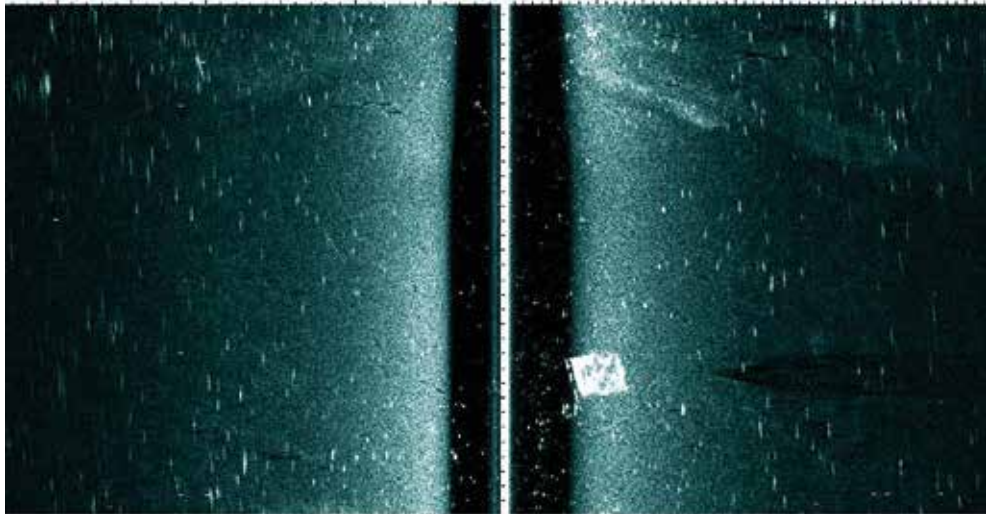


Рис. 10.37. Пример отображения отдельных рыб на экране дисплея высокочастотного гидролокатора бокового обзора «Неман» (предусмотрен как бы обратный режим отображения – наиболее слабые эха отображаются темным цветом, а более сильные – белым)

бражения на сером фоне эхосигналов от ровного дна (применяется и обратный вариант отображения, как показано на рис. 10.37).

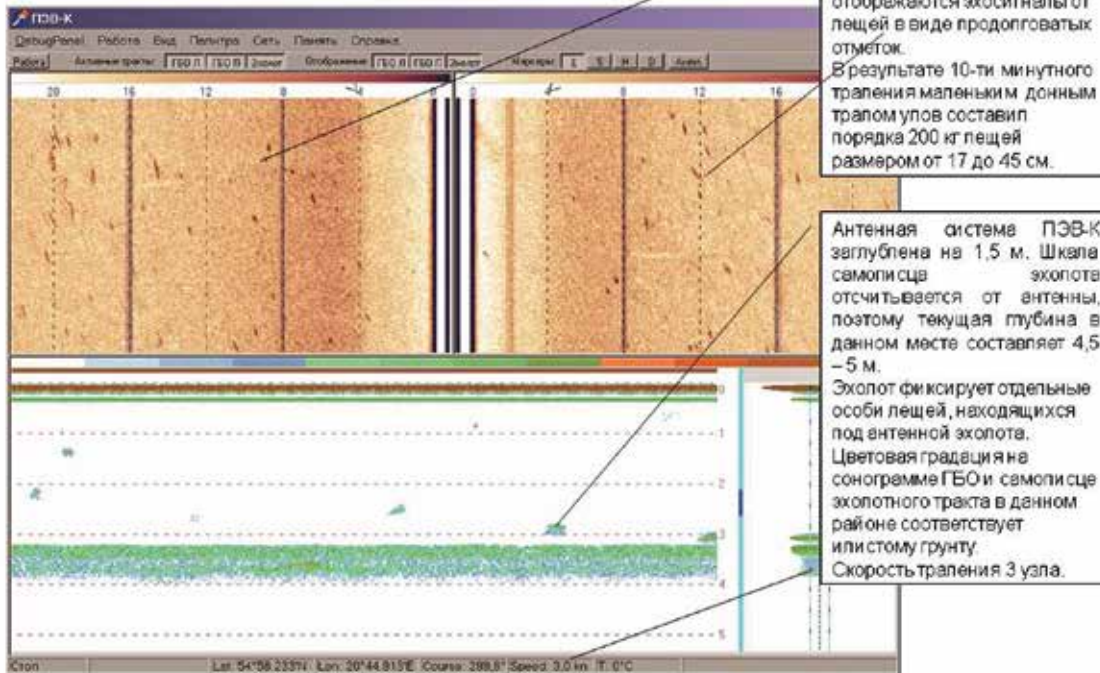
При поступательном перемещении характеристики направленности (например, при движении носителя) последовательные развертки времени на эхограмме ложатся одна рядом с другой, так что оператор может визуально различать цели и характеристику дна. Способ наложения разверток времени создает как и при регистрации в обычных эхолотаторах эффект интегрирования (накопления), позволяющий визуально выделить цели даже при плохом соотношении сигнал/шум. Однако для извлечения полезной информации из эхограмм подобного типа необходима предварительная тренировка оператора путем набора и анализа статистических данных. Наличие в эхограммах темных отметок без последующих светлых пятен свидетельствует о появлении шумов, изменении характера донных отложений или наличии небольших объектов, не создающих акустическую тень, а наличие светлых участков перед темными – о существовании углублений в поверхности дна или при изменениях характера донных отложений меняется коэффициент отражения, также зависящий от состава дна.

Приобретению навыков в расшифровке показаний такой аппаратуры способствует применение одновременно с боковым обзором тракта (или аппаратуры) вертикальной локации. На рис. 10.38 *a, б* приведены примеры эхограммы эхосигналов от рыб у дна, а также от неровностей и камней на дне при работе с аппаратурой ПЭВ-К, разработанной КБ «Вектор» и имеющей тракты бокового обзора и вертикальной локации (в мелководном Куршском заливе Балтийского моря).

На рис. 10.38 *в, г, д* представлены подобные эхограммы аппаратуры ПЭВ-К при работе в мелководной части Северного Каспия (апрель 2002 г.), характеризующейся достаточно однородным дном. Как можно видеть из эхограммы тракта бокового обзора (рис. 10.38 *в*), глубина места в районе работы составляла примерно 5 м, а на расстоянии порядка 20 м от судна была обнаружена достаточно крупная рыба вблизи дна, т. к. зона тени начинается практически почти непосредственно за эхосигналами от объекта. На рис. 10.38 *г* показано обнаружение крупной цели в толще воды (тюлень) по положению зоны тени далеко от эхосигналов от обнаруженного объекта. На рис. 10.38 *д* показано обнаружение одиночных осетровых на дне (светлые отметки зоны тени начинаются сразу за эхосигналами от рыб).

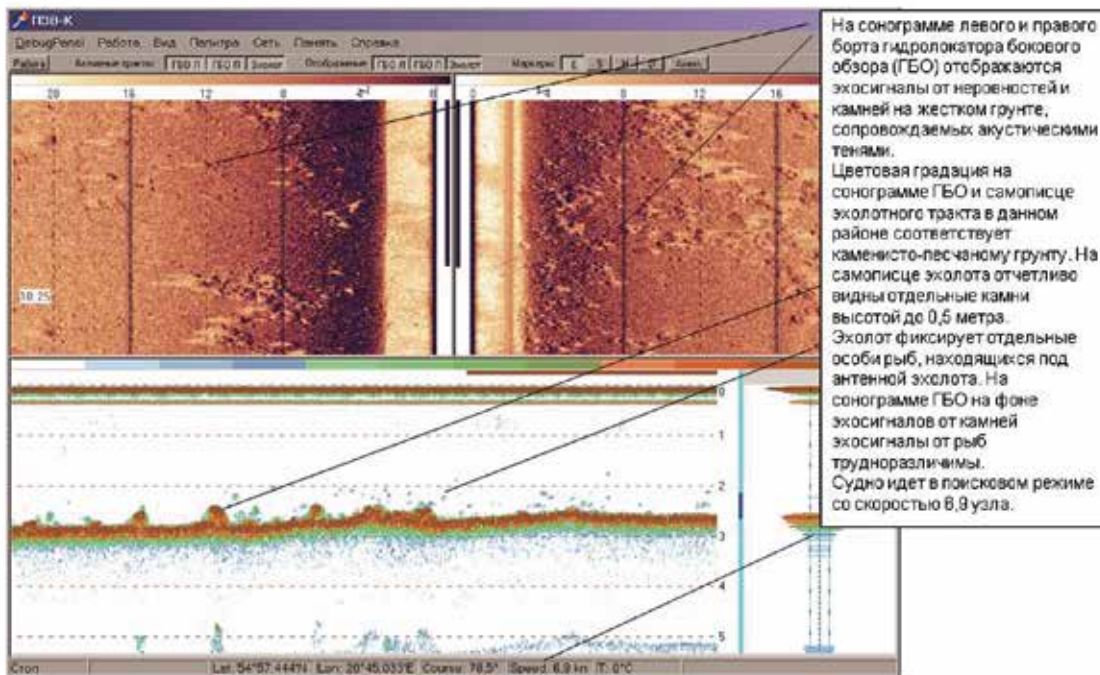
Раздельное обнаружение и воспроизведение эхосигналов от двух объектов, расположенных на дне близко друг к другу, возможно тогда, когда расстояние между ними больше элемента разрешения. Величина элемента разрешения определяется разреша-

Куриский залив. Сентябрь 2002г.



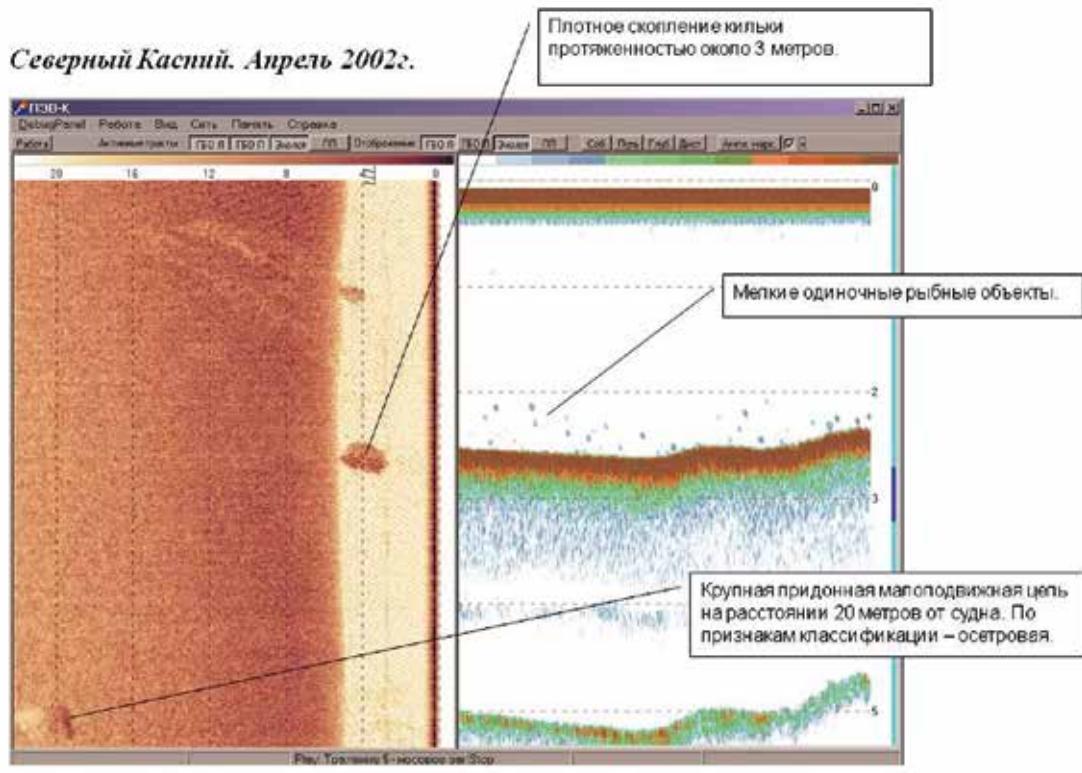
а

Куриский залив. Сентябрь 2002г.

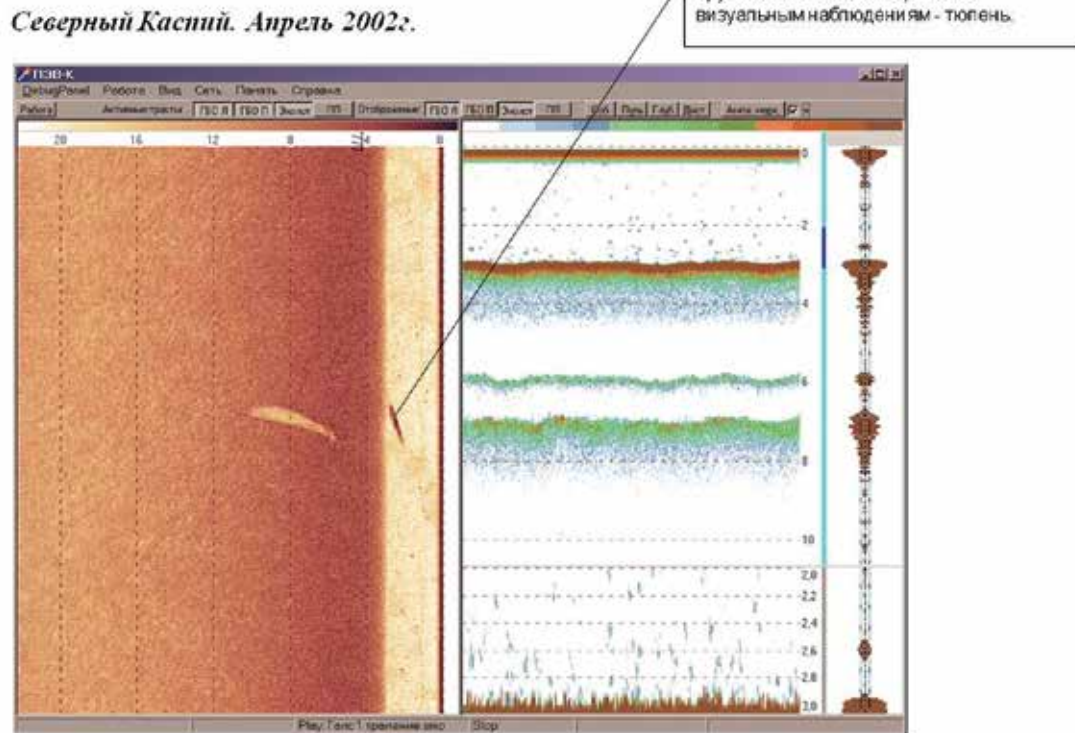


б

Рис. 10.38. Отображение отдельных рыб трактами бокового обзора (вверху) правого и левого борта и трактом вертикальной локации аппаратуры ПЭВ-К в мелководном Куршском заливе Балтийского моря (сентябрь 2002 г.) – а; отображение эхосигналов от неровностей и камней на жестком грунте трактами эхолокационной аппаратуры ПЭВ-К бокового обзора правого и левого борта и трактом вертикальной локации, показывающем отметки рыб недалеко от дна (Куршский залив, сентябрь 2002 г.) – б;



в



з

Рис. 10.38. (Продолжение): эхограмма горизонтальной и вертикальной локации в северном Каспии – в; эхограмма работы тракта бокового обзора левого борта и вертикальной локации аппаратуры ПЭВ-К – з.

Северный Каспий. Апрель 2002г.

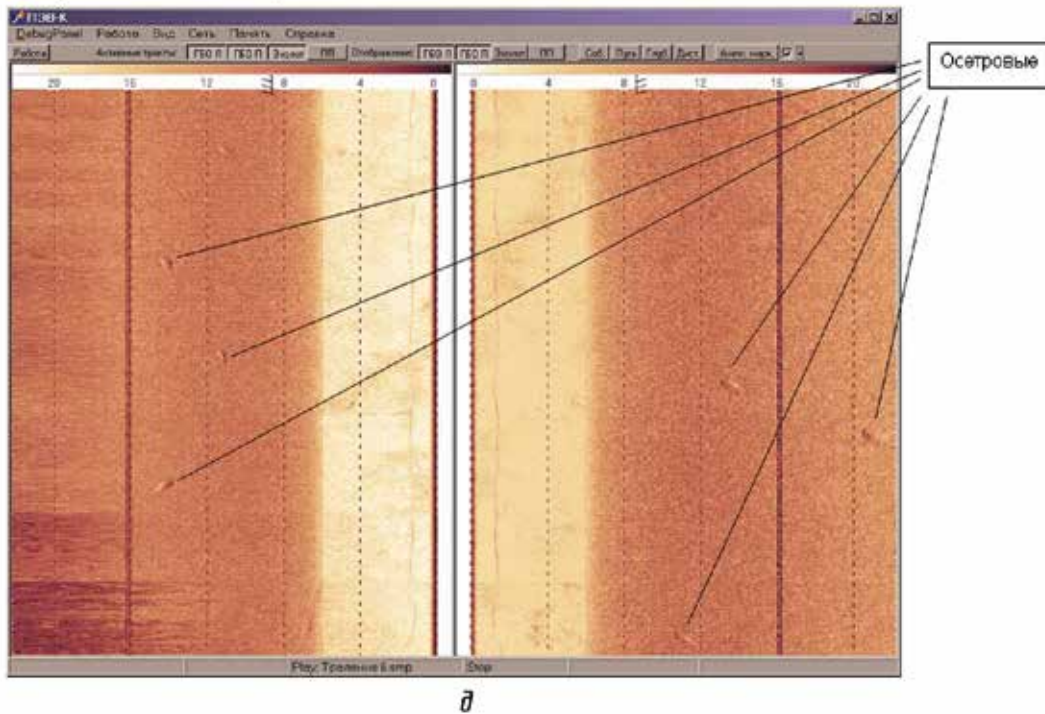


Рис. 10.38. (Окончание). По положению зоны тени достаточно далеко от лоцируемого объекта можно определить, что он находится в толще воды вдали от дна (Северный Каспий, апрель 2002 г.; эхограмма осетровых у дна при боковом обзоре аппаратурой ПЭВ-К (светлые отметки слева – левый тракт бокового обзора – после эха от рыбы и справа – в зоне регистрации правого тракта) – δ

ющей способностью станции по дальности ΔD , которая зависит от длительности импульса $\Delta D = c\tau/2$, и угловой разрешающей способностью, определяемой в данном случае шириной характеристики направленности θ на уровне 3 дБ. Соответственно, одна сторона элемента разрешения равна в каждый момент времени ΔD , а другая при малой величине ширины характеристики (в горизонтальной плоскости), что всегда имеет место в аппаратуре бокового обзора, может быть принята равной $r\theta$ (r – дистанция; θ – направленность в радианах).

На эхограмме станции бокового обзора могут быть обнаружены цели, находящиеся на дне, даже при их размерах, меньших элемента разрешения, если уровень отраженного от цели сигнала выше уровня эхосигналов фона (отраженных от поверхности дна). Классификация целей по размерам возможна при размере цели, составляющем около 3 элементов разрешения, а классификация и распознавание целей по конфигурации в том случае, если хотя бы один из размеров цели намного больше элемента разрешения.

Имеются также варианты станций бокового обзора с так называемой теневой индикацией, режим воспроизведения принимаемой информации, который несколько отличается от рассмотренного выше. При теневой индикации уровень фона (эхо от ровного дна) на эхограмме регулируется таким образом, что вместо серого он регистрируется темным. При увеличении интенсивности приемный усилительный тракт работает так, что общее усиление падает, когда интенсивность эхосигналов превышает интенсивность фона. Поэтому на экране дисплея станции с теневой индикацией в случае неровностей на дне или наличия объектов на нем на темном фоне будут появляться светлые отметки, переходящие в более темную отметку акустической тени. При последовательном отображении эхограмма будет иметь более темный фон с чередованием светлых (цели на дне, неровности дна) и более темных участков – оттенков (акустические тени).

В известных станциях с малой дальностью действия обеспечивается высокая разрешающая способность (например, стороны элемента разрешения составляют 0,15 м по дистанции и 0,14 м – по угловому размеру при дальности 90 м). Для успешной эксплуатации станции с теневой индикацией необходима соответствующая подготовка оператора по регулировке и выравниванию интенсивности фона, а также по идентификации целей.

Таким образом, классические гидроакустические станции бокового обзора с характеристикой направленности антенны очень узкой в горизонтальной плоскости и очень широкой в вертикальной при наклонном зондировании представляют отображение эха от дна и объектов на нем или возле него так, что нет четкого разделения границы вода–грунт (как в обычных эхограммах эхолотаторов). Такая информация представляет большое число качественных данных, по которым при соответствующем навыке иногда можно определить, есть ли рыба. Получение количественных данных (размер косяка, его отстояние от грунта) пока достаточно ориентировочное. В то же время такие станции позволяют получать большое количество информации о характеристиках дна, что важно при ведении донного и придонного промысла.

В настоящее время имеется очень много моделей гидроакустических станций бокового обзора. В качестве примера можно привести аппаратуру S-150 фирмы DSME (рис. 10.39) со схемой формирования акустического изображения лоцируемых объек-

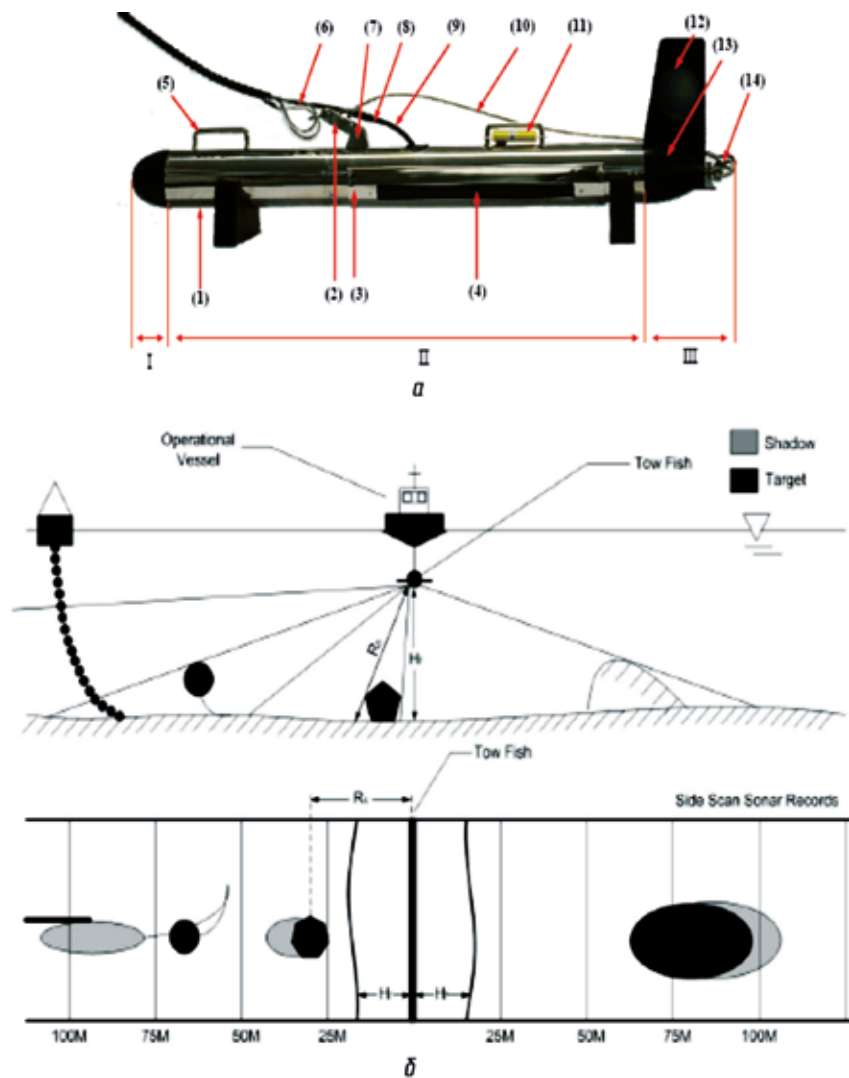


Рис. 10.39. Буксируемый носитель с гидроакустическими антеннами станции бокового обзора S-150 – а; схема формирования акустического изображения лоцируемых объектов – б

тов на дне и вблизи него. Она имеет следующие рабочие частоты в кГц – 400, 900, 1250, 100/400, 400/900, 400/1250. Приемно-передающие антенны (ППА) установлены по обеим сторонам буксируемого тела. Основной рабочий элемент, излучающий ультразвуковые

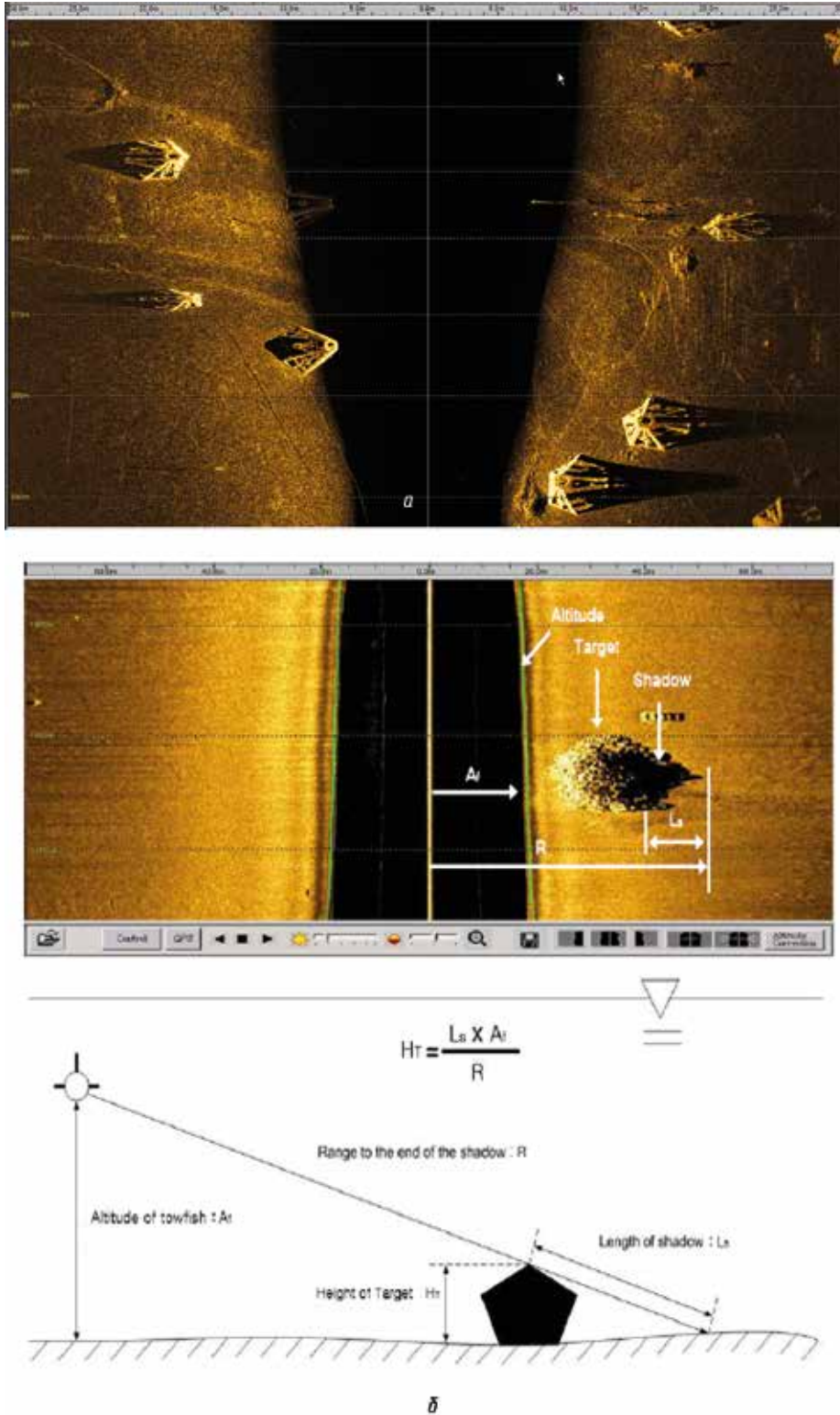


Рис. 10.40. Эхограмма станции бокового обзора S-150 с антеннами правого и левого борта с отображением искусственных целей на дне: самый темный цвет соответствует минимальной интенсивности принятых эхосигналов, самый светлый – соответствует максимальной. Соответственно, темная полоса посередине эхограммы (справа и слева от нулевой линии) относится к зоне обзора под буксируемым носителем до дна, темные участки у целей показывают зоны их акустической тени – а; определение высоты объекта на дне по данным, снимаемым с эхограммы станции бокового обзора: вверху – эхограмма, внизу – схема расчета – б

импульсы и принимающий отраженные сигналы, — пьезокерамика. Диаграммы направленности ППА при излучении веерные. У ППА на 100 кГц ширина горизонтального лепестка диаграммы направленности (ДНА) — $1,2^\circ$, вертикального — 40° . У ППА на 400 и 900 кГц ширина горизонтального лепестка ДНА $0,3^\circ$, вертикального — 40° . У ППА на 1250 кГц ширина горизонтального лепестка ДНА $0,3^\circ$, вертикального — 30° .

На рис. 10.40 представлены эхограмма станции бокового обзора S-150 с антеннами правого и левого борта с отображением искусственных целей на дне — *а* и схема определения высоты объекта на дне — *б*.

Своего рода вариантом бокового обзора является режим траверзного обзора. Он использовался еще при работе гидролокаторов с одной характеристикой направленности. Отличие его от бокового обзора состоит в том, что в данном случае работает обычная антенна, развернутая перпендикулярно курсу судна. Антенна или ее характеристика направленности также может быть наклонена под выбранным углом.

При наклонном падении акустической энергии на сравнительно ровный грунт без рыбы значительная часть звука испытывает зеркальное отражение (не возвращается к антенне), а при наличии рыбы к антенне возвращается большее количество отраженной от нее энергии вследствие диффузного рассеяния (рис. 10.41 *а*). При наличии идеально плоского дна вся падающая на него акустическая энергия должна отражаться от него в сторону от антенны гидролокатора, и при нахождении скопления рыбы у дна должны приниматься эхосигналы только от этого скопления (рис. 10.41 *а*). Так как практически идеально плоского дна не существует, то обычно на дисплее будет фиксироваться определенная часть эхосигналов от грунта.

При работе в районе с достаточно ровным дном, особенно при малых наклонах характеристики направленности и прямолинейном (или близком к прямолинейному) характере распространения звука эхосигналы от стай и косяков рыбы, находящихся вблизи дна, могут поступать и позже эхосигналов от грунта и превышать по интенсивности донную реверберацию (рис. 10.41 *б*). Возможности различения эхосигналов от скоплений рыбы у дна тогда улучшаются, и при правильной установке регуляторов усиления и соответствующей регулировке ВАРУ может быть получена большая дальность обнаружения. В 70–80-х гг. прошлого века указанный режим работы гидролокатора применялся на Камчатке для контроля и оценки подходов лососевых к прибрежным водам для последующей миграции по рекам на нерестилища. Характеристика гидролокатора устанавливалась таким образом, чтобы было можно лоцировать приповерхностные слои воды [Николаев, Новак, 1987].

Следует отметить, что близкий к изложенному способ обзора применялся в промышленном рыболовстве практически с начала использования на рыболовных судах рыбопоисковых гидролокаторов с самопишущими регистраторами эхосигналов для поиска концентраций и косяков рыбы, в основном благодаря возможности получения панорамных эхограмм, подобных получаемым при вертикальной локации. Отличие данного способа состоит в том, что он является лишь одним из режимов работы гидролокатора при расположении его антенны в основном в направлении, перпендикулярном курсу движения судна с некоторым наклоном в вертикальной плоскости, и не предъявляются какие-либо требования к ширине характеристики направленности аппаратуры.

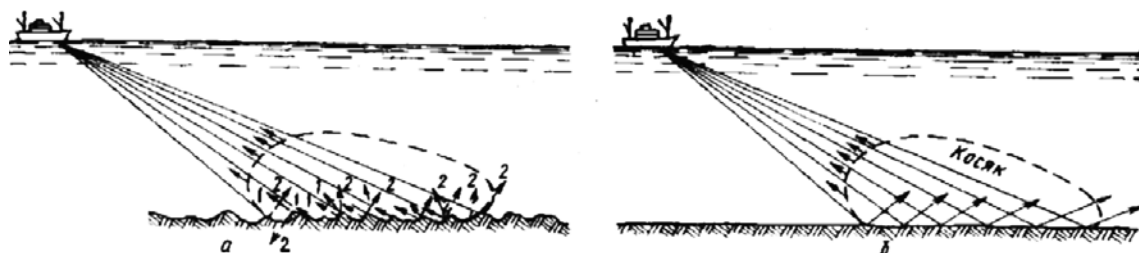


Рис. 10.41. Отражение акустической энергии от сравнительно ровного (*а*) и идеально плоского (*б*) дна

В последние десятилетия траверзное лоцирование все более широко применяется при гидроакустической количественной оценке состояния запасов в мелководных внутренних водоемах. В современных рыбопоисковых гидролокаторах с электронным сканированием характеристик направленности антенны в горизонтальной или вертикальной плоскости или в обеих плоскостях также обычно предусматривается режим отображения траверзного обзора.

10.11. РЫБОЭХОЛОКАТОРЫ С РАДИОКАНАЛАМИ ПЕРЕДАЧИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭХОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для дистанционного наблюдения и обнаружения промысловых объектов расширяется применение и эхолокационных гидроакустических систем с радиоканалами передачи данных. В таких системах в отличие от эхолокаторов обычного типа периодический запуск эхолокационных систем производится по радиоканалам, в т. ч. спутниковым. Принимаемые гидроакустическим трактом эхосигналы поступают в тракт передачи радиоканала связи и транслируются в пункт наблюдения, находящийся на определенной дистанции от места расположения эхолокационного устройства, где и отображаются на оконечных устройствах регистрации и индикации. Такие системы могут состоять из n -го количества рыболокационных трактов (вертикального или горизонтального зондирования), конструктивно размещаемых, к примеру, в плавучих буюх, соответствующих радиопередающих и радиоприемных устройств с ЧМ- или АМ-модуляцией и регистрирующей аппаратуры. Прием и регистрация получаемой информации могут выполняться судовыми и береговыми центральными комплексами.

Применение таких систем на научно-исследовательских судах или с регистрацией данных в береговых центрах представляется весьма целесообразным. Для анализа обстановки в обследуемом районе устанавливается, к примеру, определенное количество буюв с рыболокационной аппаратурой (без тракта регистрации) и затем в течение необходимого времени на судне или на берегу фиксируется эхолокационная телеметрическая информация о поведении, распределении и количестве рыбы в выбранном участке. Указанные системы могут устанавливаться и в прибрежных районах моря для наблюдения, например, за подходами рыбы к местам нереста, за заходами рыбы в ставные неводы, ловушки. В этом случае информация может регистрироваться как на судах, так и береговыми станциями.

Рассмотрим принцип работы гидроакустической рыбопоисковой системы с радиоканалом связи при наличии одного канала с телеуправлением (принудительной синхронизацией) от приемного бортового или берегового устройства. Канал работает следующим образом. Генератор-передатчик канала связи бортового или берегового приемо-регистрирующего комплекса излучает сигналы, представляющие собой запускающие импульсы обычного эхолокатора. Эти сигналы принимаются буйковым устройством (его приемным трактом связи, работающим в режиме дежурного приема), детектируются и служат для запуска генераторного устройства эхолокационного тракта, расположенного в бую. Указанным трактом излучаются в воду акустические импульсы. Эхосигналы от подводных объектов принимаются приемным устройством рыболокационного гидроакустического бую, детектируются и служат для модуляции передающего тракта канала связи буйкового устройства. Тракт передачи через антенну обеспечивает излучение сигналов, несущих информацию о подводной обстановке в районе бую в направлении базовой приемо-регистрирующей станции. Сигналы принимаются и преобразуются приемным трактом бортовой или береговой станции и поступают на регистрирующее устройство. Так как скорость распространения электромагнитных волн в воздухе значительно больше скорости распространения акустических волн в воде, то линия связи практически не вносит временных искажений в регистрируемую информацию. Система фактически представляет собой телеуправляемый рыболокатор с передачей получаемых данных по каналу телеизмерения.

В рассмотренном режиме работы приемо-передающее устройство буйкового рыболокатора работает в дежурном режиме (питание подается лишь на тракт приема) и включается только при поступлении импульсов с базовой станции. Благодаря этому в случае отсутствия сигналов запуска автономное буйковое устройство потребляет малое количество энергии. Проведенные экспериментальные работы [Hashimoto, 1970; Кудрявцев, 1972] дали положительные результаты. Эхограммы, полученные от обычного эхолокатора вертикального действия и подобной системы, практически одинаковы. В случае необходимости такие рыболокационные системы могут работать и в режиме принудительной синхронизации бортовой или береговой аппаратуры по сигналам буйковых устройств, а зондирование может проводиться как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. При нескольких буйковых станциях с базовой станции можно обеспечить последовательное их включение или одновременную работу, используя разные несущие частоты канала связи.

Указанная система может быть построена на базе электронных дисплеев с отдельными «окнами» для отображения данных от каждого автономного буйкового устройства, обеспечивающими одновременное отображение на экране дисплея информации от нескольких буйковых станций. Более целесообразными в данном случае представляются системы с принудительной синхронизацией от базовой станции. Подобная аппаратура также может найти широкое применение при лове на свет. Судно ставит несколько автономных станций с рыболокационными устройствами для контроля концентрации рыбы в районе света. Бортовая аппаратура системы сбора информации регистрирует получаемую информацию и затем по полученным данным осуществляется последовательный облов собранных на свет скоплений [Кудрявцев, 1972]. В Японии такая аппаратура находит применение при прибрежном лове рыбы ставными неводами. С береговой станции при этом проводится периодическое наблюдение и проверка наличия рыбы в стационарных орудиях лова; автономные рыболокационные устройства устанавливаются на буях в зоне орудия лова [Кудрявцев, 1972]. Возможны и другие варианты использования таких рыболокаторов, например, для прослушивания звуков, издаваемых рыбами (благодаря малому уровню шумов), при исследованиях по привлечению рыб и др.

В 2005 г. ООО «ПромГидроакустика» разработал гидроакустический программно-технический комплекс «NetCor» по количественной оценке рыб в условиях мелководья с радиоканалом передачи импульсов запуска генератора акустического тракта и информации с приемного акустического тракта (эхосигналов) на береговую станцию. Основное назначение комплекса — количественная оценка проходящих рыб через сканируемое сечение реки с возможностью восстановления распределения силы цели зарегистрированных одиночных рыб и определения направления их движения в грациях вверх-вниз по течению. Комплекс состоит из сети плавучих гидроакустических высокочастотных многолучевых («веер» из 6 отдельных приемо-передающих характеристик направленности) станций, связанных по радиоканалу пакетной передачи данных с береговой компьютеризированной контрольно-измерительной системой. Радиопередача ведется в нелицензируемом диапазоне радиочастот ISM 2.4 ГГц с использованием трансиверов nanoNET (стандарт IEEE802.15.4a). Акустическое зондирование может осуществляться в горизонтальной плоскости под любым заданным углом к поверхности воды, в вертикальном направлении в направлении дна или поверхности воды.

Основные характеристики комплекса «NetCor»:

- рабочая частота 455 кГц;
- электрическая мощность на антенне 40–80 Вт;
- частота следования зондирующих импульсов — до 12 Гц;
- ширина каждой характеристики направленности на уровне — 6 дБ 10 градусов, ширина сектора обзора одной станции до 80 градусов в плоскости веера характеристик лучей;
- в горизонтальном режиме обеспечивается регистрация рыб при глубине места до 1 м;

- максимальная дальность регистрации в горизонтальном режиме одиночной рыбы с силой цели – 50 дБ – 20 м;
- минимальная дальность регистрации – 0,5 м;
- дистанция устойчивой радиосвязи – до 200 м, дистанция предельной радиосвязи – до 600 м (в зависимости от уровня помех и используемых антенн);
- число плавучих гидроакустических высокочастотных многолучевых станций в сети – до 16;
- математическое обеспечение системы состоит из программы управления комплексом и сбора данных с сети плавучих гидроакустических станций в реальном времени и программы камеральной обработки данных в отложенном времени на компьютерах под управлением ОС «Windows». В системе «NetCor» реализован подход с использованием сети пространственно разнесенных высокочастотных гидроакустических эхолотаторов (модули «slave») с многоэлементными антеннами, передающих по радиоканалу информацию о подводной обстановке в виде цифрового представления огибающей эхосигнала на береговую контрольно-измерительную компьютеризированную станцию (модуль «master»). Набор модулей «slave» образует неподвижную зону регистрации в выбранном для наблюдения сечении реки. Рыба в своем естественном движении пересекает эту зону и происходит гидроакустическая регистрация проходящей рыбы. Общая схема использования комплекса «NetCor» представлена на рис. 10.42.

Для установки модуля «slave» в комплексе «NetCor» разработана и изготовлена плавучая платформа из стеклопластика грузоподъемностью 30 кг с габаритами 1370×1050×270 мм, со сквозным колодцем для пропуска гидроакустической антенны на поворотно-выдвижном координатном штативе, с самоотливным кокпитом для аккумулятора. На рис. 10.43 представлены фотографии модулей «master», «slave», сети из трех

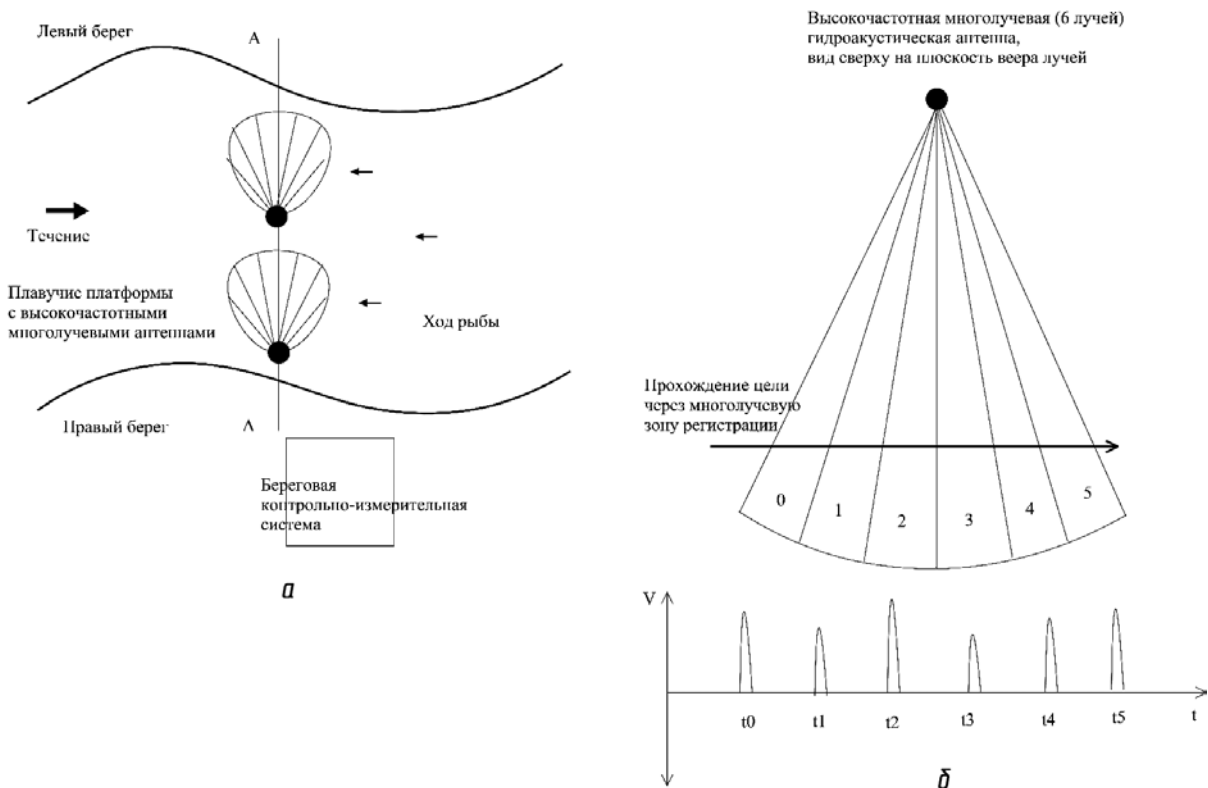


Рис. 10.42. Схемы функционирования аппаратуры «NetCor»:

a – расположения модулей «slave» в поперечном сечении реки А-А. Вид сбоку; *б* – определения направления движения цели в градациях вверх-вниз по течению по зарегистрированной трассе в зоне регистрации (в допущении близкого к горизонтальному движению рыбы)

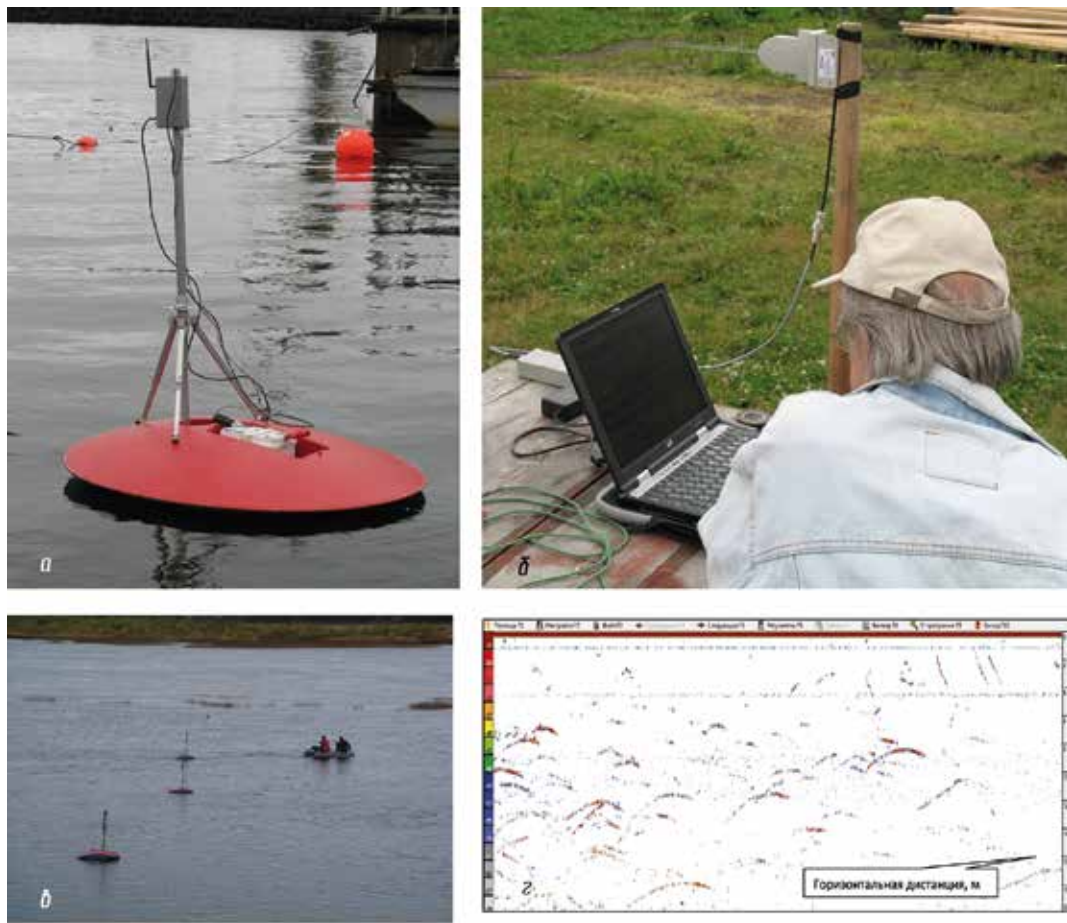


Рис. 10.43. Фотографии модулей «master», «slave», сети из трех модулей «slave» на р. Онега и эхограмма регистрации разноразмерных рыб (15–70 см) комплексом «NetCor»:

a – фотография модуля «slave»; *б* – натурная проверка работы первого образца аппаратуры «NetCor» с фотографией модуля «master»; *в* – фотография сети из трех модулей «slave»; *г* – эхограмма регистрации разноразмерных рыб (15–70 см) комплексом «NetCor»

модулей «slave» на р. Онега и характерная эхограмма регистрации разноразмерных рыб (15–70 см) комплексом «NetCor».

В 2006–2008 гг. были проведены экспериментальные работы по использованию комплекса на р. Онега, Северная Двина, Шуя, Иртыш, Ухтолок, Поной, которые показали надежную регистрацию рыб в зоне действия прибора, с возможностью восстановления количества, распределения силы цели и направления движения зарегистрированных рыб. В настоящее время он используется при экспериментальных исследованиях по контролю миграции лососевых в р. Камчатка [Дегтев и др., 2012].

Норвежской фирмой Симрад разработан вариант гидроакустической рыболокационной аппаратуры вертикального зондирования ЕК60 с дистанционным управлением и передачей акустической инфор-

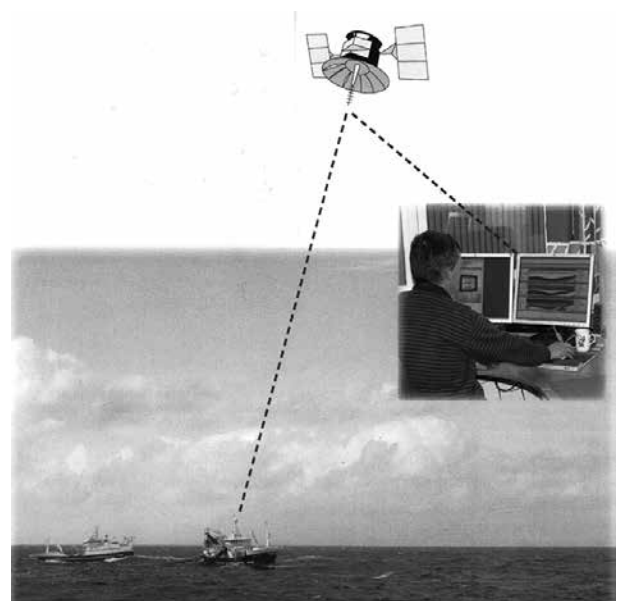


Рис. 10.44. Общая схема дистанционного управления гидроакустической локационной аппаратурой и передачи получаемых эхолокационных данных по спутниковой системе связи

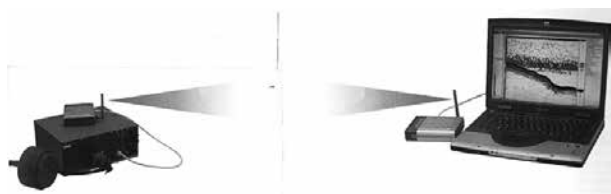


Рис. 10.45. Схема дистанционного управления гидроакустической локационной аппаратурой и передачи получаемых эхолокационных данных с помощью радиомодемов: слева — блоки акустической эхолокационной аппаратуры и одним радиомодемом; справа — второй радиомодем и блок управления и отображения эхосигналов

мации по спутниковому радиоканалу связи на береговые центры. Установленная на борту промысловых рыболовных судов, выполняющих сбор гидроакустических данных при определенной кооперации с норвежским Институтом морских исследований, указанная гидроакустическая аппаратура может дистанционно управляться и передавать информацию непосредственно по командам научного сотрудника (рис. 10.44). Ею также разработан вариант с использованием радиомодемов (рис. 10.45).

На выставке Vigo EXPO [Fish News Intern., 2009] фирмой Marine Instruments of Nigrón был представлен гидроакустический буй с трактом вертикальной акустической локации присутствия или отсутствия тунцов под дрейфующими искусственными рифами для обеспечения экономии топлива тунцевых сейнеров. Он работает с системой спутниковой передачи информации Inmarsat D Plus.

Системы с большим числом буйковых гидроакустических эхолокаторов и радиоканалами передачи гидроакустической информации представляются целесообразными для контроля подходов лососевых на Дальнем Востоке к прибрежным районам для последующего перехода в реки на нерестилища [Кудрявцев, 2013].

10.12. ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА И ОБСТАНОВКИ В ЗОНЕ ИХ ДЕЙСТВИЯ

Данную аппаратуру можно отнести к средствам рыбохозяйственной гидроакустики, т. к. акустические колебания в них обязательно используются или для получения информации, или для ее передачи пользователю, или одновременно для того и другого. Указанная аппаратура имеет существенное значение в современном промышленном рыболовстве. Наиболее широкий набор телеметрических средств дистанционного контроля применяется при пелагическом траловом лове, особенно при лове подвижных скоплений рыбы.

При траловом промысле в общем случае после обнаружения объектов лова информационное обеспечение процесса разноглубинного траления во многом зависит от телеметрической аппаратуры дистанционного наблюдения и контроля [Кудрявцев, 1991].

С ее помощью осуществляется:

- 1) в процессе наведения судна и трала на рыбу она способствует определению положения трала;
- 2) она позволяет оценивать результат наведения трала на косяки и скопления рыбы;
- 3) оценка поведения рыбы в зоне устья трала;
- 4) оценка хода траления: характера прохождения рыбы от устья к мешку трала и ее поведения в пределах трала;
- 5) контроль результатов траления: степень и характер заполнения тралового мешка рыбой;
- 6) измерение и контроль параметров траловой системы (вертикальное, горизонтальное раскрытия трала, его симметрия, расстояние между досками, их положение относительно верхней подборы по вертикали, разность длины вытравленных ваеров и др., т. е. характеристики, которые могут изменяться в ходе траления в результате воздействия внешних факторов, скорости судна, течений и др.).

Использование телеметрических систем контроля характеристик трала и рыбы в зоне их действия [Кудрявцев, 1972] во многом способствовало расширению сферы

практического применения разноглубинных рыболовных тралов. Без гидроакустических систем дистанционного измерения и контроля параметров трала, рыбы и обстановки в зоне их действия было бы практически невозможно развитие и распространение разноглубинного тралового лова, в настоящее время наиболее универсального вида морского и океанического промысла рыбы. Производительность и возможности рационализации указанного вида лова во многом определяются полнотой и эффективностью дистанционного контроля процессов тралений в реальном масштабе времени, начиная с момента обнаружения скоплений и косяков промысловых объектов и вплоть до завершающей стадии – контроля характера и степени заполнения мешка трала рыбой. Его роль еще более возрастает в связи с увеличившимися за последнее время размерами разноглубинных тралов, их устьев, необходимостью существенного снижения энергозатрат на вылов единичной массы рыбы, расширением и развитием работ по созданию формоизменяемых адаптирующихся траловых систем. В связи с углубляющимся старением отечественного рыбопромыслового флота обеспечение более или менее эффективной работы промысловых судов практически возможно только за счет применения совершенных средств дистанционного контроля и управления процессами лова.

Создание и практическое внедрение в рыбное хозяйство телеметрических систем контроля характеристик трала и рыбы в зоне их действия началось в конце 50-х гг. прошлого века с разработок приборов контроля глубины хода трала с передачей данных по гидроакустическому каналу на основе манометрических датчиков. Параллельно происходило развитие траловых устройств телеметрического контроля с датчиками информации эхолокационного типа. Были разработаны системы с ультразвуковым зондированием в нижнем, затем в нижнем и верхнем направлениях относительно трала с кабельными и гидроакустическими линиями связи между тралом и судном [Кудрявцев, 1972], в т. ч. с привязкой к поверхности воды с помощью манометрических и акустических эхолокационных датчиков. Японскими фирмами проводились разработки траловых зондов с гидроакустической линией связи между судном и тралом, западноевропейскими – с кабельной (в настоящее время ими выпускаются устройства как с кабельной, так и гидроакустической линией связи).

В 1963 г. нами (КБ морской электроники БалтНИРО) были проведены морские натурные испытания тралового зонда с эхолокационным датчиком нижнего направления лоцирования и кабельной линией связи [Кудрявцев, Романенков, 1965].

10.12.1. Принцип действия и работы систем рыбохозяйственной телеметрии

Аппаратура контроля параметров орудий лова рыбы и обстановки в зоне их действия с непрерывной передачей полученной информации на борт судна непосредственно в процессе лова относится к классу систем телеизмерения или телеметрии. Телеметрическая система – это совокупность приборов и устройств, с помощью которых осуществляется измерение и контроль параметров и состояния какого-либо объекта или процесса на расстоянии путем передачи специальных кодированных сигналов, т. е. дистанционное получение сообщений, содержащих определенную информацию о данном объекте или процессе.

Следует отметить, что понятия «сообщение» и «информация» не тождественны. Под сообщением понимается то, что подлежит передаче, т. е. некоторая сумма каких-то сведений. Информацией являются лишь сведения, содержащиеся в сообщениях, которые ранее были неизвестны получателю. Информация и сообщения, получаемые от телеметрической системы, используются для управления производственными процессами, к которым относятся и процессы лова.

В любом управляемом производственном процессе независимо от того, производит ли управление человек или машина, можно выделить управляемый объект (или процесс) и управляющее устройство (рис. 10.46).

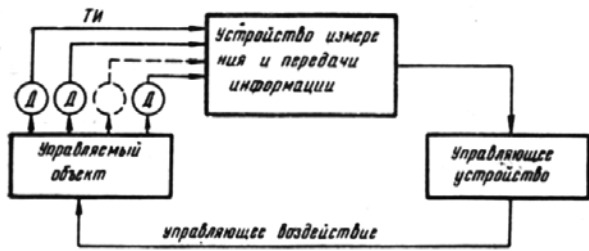


Рис. 10.46. Обобщенная блок-схема управляемого процесса

Процесс управления при этом можно условно разделить на несколько операций. Первая операция заключается в получении информации и сообщений о значениях параметров, характеризующих управляемый объект, например, рыболовный трал. Сведения об этих параметрах собираются датчиками Д или чувствительными элементами. Датчики представляют собой первичные преобразователи, превращающие различные (обычно неэлектрические) измеряемые величины (глубину хода, раскрытие трала, акустические сигналы и др.) в электрические, удобные для дальнейшего преобразования и передачи. Таким образом, в системе управления имеется процесс сбора информации. Вторая операция заключается в передаче полученной информации и сообщений в управляющее устройство по каналу измерения и сигнализации. Третья операция осуществляется в управляющем устройстве и заключается в переработке информации.

В процессе лова рыбы, когда в управлении объектом, например, тралом, принимает участие человек, в управляющем пункте возникает необходимость регистрации и представления информации в форме, удобной для восприятия ее человеком. Для этого используются сигнализация, стрелочные приборы, цифровые индикаторы, самопишущие регистраторы и электронные дисплеи.

Последняя операция заключается в воздействии на управляемый объект на основании полученной информации, т. е. использование информации. При этом происходит изменение параметров объекта или процесса, которое снова фиксируется датчиками и передается в управляющее устройство и т. д.

Системы телеизмерения ТИ в таком процессе осуществляют сбор информации, ее передачу и регистрацию или воспроизведение. Передача информации производится с помощью так называемых «переносчиков» информации. Переносчик с нанесенной на него информацией называется сигналом. В качестве переносчиков информации в подводной телеметрической аппаратуре используются акустические и электромагнитные колебания. Сигналами в этом случае будут модулированные высокочастотные электромагнитные или акустические колебания или серии модулированных акустических колебаний и радиопульсов.

Передача сигналов в системах телеизмерения происходит по каналам связи. Принцип телеизмерения и заключается в том, что для увеличения дальности передачи по каналу связи передается не сама измеряемая величина, а вспомогательная величина–сигнал, более удобная для передачи на большие расстояния. Для передачи выбирают сигналы, подвергающиеся минимально возможным искажениям в канале связи. Под каналом связи понимается тракт, по которому производится независимая передача сообщения от контролируемого объекта к получателю (управляющему устройству). Следует подчеркнуть, что «канал связи» и «линия связи» — это различные понятия. Линией связи является физическая среда, используемая для передачи сигналов (кабель, полоса ультразвуковых и радиочастот и др.). В образовании канала связи, помимо линии связи, участвует приемо-передающая аппаратура и другие устройства телеметрической системы. С помощью различных технических средств на одной и той же линии связи можно получить ряд каналов.

На рис. 10.47 представлена упрощенная блок-схема телеметрической системы. Датчик телеизмерения ДТ предварительно преобразует контролируемую величину А в соответствующий ей первичный (промежуточный) параметр или сообщение. Преобразователь передающего устройства ППер формирует сигнал телеизмерения, передаваемый на передатчик П устройства связи. Операцию превращения сообще-

ния в сигнал обычно называют способом передачи.

На приемной стороне устройства связи сигнал телеизмерения с выхода приемника Пр поступает на преобразователь приемного устройства ППр, превращающий принятый сигнал в сообщение. Эту операцию называют способом приема. Приемный прибор ПП (индикаторный или регистрирующий) воспроизводит значение телеизмеряемой величины A' . Это значение в общем случае может отличаться от действительного из-за несовершенства характеристик аппаратуры, а также действия различных помех. Под помехами подразумеваются любые искажающие сигнал воздействия, возникающие в процессе передачи сообщения. На рис. 10.57 условно показано, что помехи действуют в линии связи. В реальных системах мешающие воздействия могут возникать также в устройствах системы (аппаратурные помехи). В конкретных системах телеметрии возможно совмещение в одном узле таких функциональных элементов схемы рис. 10.47, как ДТ и ППер, ППр и ПП и т. д. В то же время в ряде случаев датчик телеизмерения выполняется в виде сочетания первичного измерителя, фиксирующего заданный электрический или неэлектрический параметр, и собственно датчика-преобразователя с электрическим выходом.

Все сообщения, передаваемые в телеметрических системах контроля параметров орудий лова, можно разделить на два вида: непрерывные и дискретные. К непрерывным сообщениям можно отнести сведения о таких величинах, контролируемых системами телеизмерения, которые могут принимать любые значения в заданных пределах измерения (например, глубина хода трала, отстояние его от грунта, температура в месте нахождения трала и др.). Эти сообщения являются непрерывными функциями времени и характеризуются тем, что описывающая их функция $\lambda(t)$ может принимать любое значение в некотором интервале $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ в произвольные моменты времени.

К дискретным сообщениям относятся позиционные или предельные извещения о состоянии контролируемых объектов (например, заполнен куток трала — не заполнен, часть кутка заполнена и т. д.). Эти сообщения обычно передаются конечным числом отдельных элементов, например, импульсов или групп импульсов фиксированной амплитуды и длительности, но с определенным временным положением, зависящим от состояния измеряемого параметра, или импульсов различной, но фиксированной длительности и т. п.

В простейшем случае источник сообщений определяет и характер сигналов, используемых для передачи этих сообщений: дискретные сообщения передаются дискретными сигналами, а непрерывные сообщения — непрерывными сигналами. Однако непрерывные сообщения могут быть переданы и дискретными сигналами после квантования сообщений, т. е. замены непрерывного ряда значений измеряемой физической величины ограниченным и конечным числом ее значений.

В телеметрических системах применяется квантование по уровню и по времени. Получаемые в результате сигналы называют квантованными. В процессе квантования в измеряемую величину вносится некоторая погрешность, называемая ошибкой квантования.

При квантовании по уровню действительное значение измеряемой величины заменяется ближайшим дискретным значением и передается уже это значение величины. Обычно применяется равномерное квантование по уровню, но используются и другие преобразования такого типа. Наиболее широко используется квантование по времени, т. е. замена непрерывного сообщения дискретным по времени сообщением, когда сигналы передаются не непрерывно, а через определенные интервалы времени. Такие

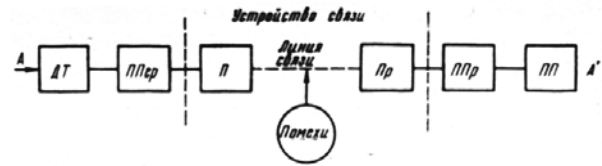


Рис. 10.47. Упрощенная блок-схема телеметрической системы

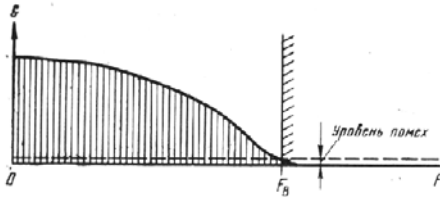


Рис. 10.48. Типичный частотный спектр реального сообщения

сообщения описываются функцией, значения которой изменяются только в дискретные моменты времени. Обычно применяется равномерное квантование по времени и эти моменты времени следуют периодически с периодом повторения, называемым интервалом временного квантования. Для описания такого сообщения достаточно знать значения передаваемой функции $X(t)$ только в дискретные моменты

времени.

Квантование по времени широко применяется также и в телеметрических приборах контроля параметров орудий лова. Оно лежит в основе импульсных методов модуляции, а также многоканальных систем с временным разделением каналов. На приемной стороне в таких случаях обычно непосредственно фиксируются значения λ в моменты квантования. Возможность такой дискретизации основывается на следующем. Все реальные измеряемые процессы и непрерывные сообщения изменяются с конечной скоростью, и информация об этих изменениях, преобразованная в соответствующие электрические колебания, представляет собой сигнал с ограниченной полосой частот, основная часть спектра которого сосредоточена в конечном интервале частот. Это объясняется частотными свойствами реальных источников сообщений и их получателей. Например, в телеметрии сообщения обычно имеют спектр, не превышающий десятков герц, в подводной промысловой телеметрии — не превышающий единиц герц и в основном составляющий десятые и даже сотые доли герца.

Начиная с некоторой частоты, компоненты высокочастотной части спектра сообщения оказываются значительно ниже уровня помех на выходе канала и не воспринимаются получателем. Это обстоятельство позволяет ввести идеализацию, заключающуюся в том, что все реальные непрерывные сообщения рассматриваются как функции с ограниченным спектром G , который не содержит частот выше некоторой граничной (верхней) частоты.

Возможность восстановления непрерывной функции с ограниченным спектром по ее значениям в отдельные дискретные моменты времени была доказана В.А. Котельниковым. Теорема Котельникова заключается в следующем: если непрерывная функция времени имеет спектр, заключенный в ограниченной полосе частот от 0 до F_0 , то она полностью определяется последовательностью своих мгновенных значений, которые берутся в точках, отсчитываемых через интервалы времени — $\frac{1}{2}F_0$.

Значение этой теоремы в телеметрических системах состоит в том, что если требуется передать непрерывную функцию $\lambda(t)$ с ограниченным спектром, то в принципе нет необходимости передавать бесконечное множество всех значений непрерывно меняющейся функции $\lambda(t)$, а достаточно передать ее отдельные мгновенные значения, отсчитанные через интервалы времени Δt . Точность передачи при этом практически не нарушается. Мгновенные значения функции $\lambda(t)$, взятые в точках $1\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$ и т. д., полностью определяют ход непрерывной функции. Доказательство Теоремы Котельникова основано на представлении функции $\lambda(t)$ с ограниченным спектром в виде особого ряда, получаемого после разложения функции $\lambda(t)$ в ряд Фурье и проведения соответствующих математических преобразований.

Согласно теореме, такой сигнал записывается в виде ряда:

$$\lambda(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_0(t - k\Delta t)}{2\pi F_0(t - k\Delta t)}, \quad (10.44)$$

где $\lambda(k\Delta t)$ — мгновенные значения функции, отсчитанные через интервал $\Delta t = 1/2F_0$; F_0 — наибольшая частота спектра функции $\lambda(t)$.

Функция

$$\frac{\sin 2\pi F_{\sigma}(t - k\Delta t)}{2\pi F_{\sigma}(t - k\Delta t)} = \frac{\sin z}{z} \quad (10.45)$$

равна 1 при $z=0$, т. е. в той точке отсчета, где $t=k\Delta t$ и равна нулю во всех остальных точках отсчета.

На рис. 10.49 дано графическое разложение функции $\lambda(t)$ в ряд Котельникова. Суммирование всех этих графиков от $k=1$ до $k=\infty$ восстанавливает первоначальную функцию. Из рис. 10.49 видно, что для всех моментов времени, за исключением точек отсчета, функция $\lambda(t)$ равна сумме бесконечного числа непрерывных слагаемых, а в точках отсчета она определяется только одним слагаемым $\lambda(k\Delta t)$. Все остальные слагаемые в этих точках равны нулю. Теорема Котельникова справедлива и для случая, когда непрерывная функция времени $\lambda(t)$ имеет спектр, заключенный в ограниченной полосе частот от $F_{\text{н}}$ (нижняя частота) до $F_{\text{в}}$. В этом случае отсчеты берутся через интервалы времени:

$$\Delta t = 1/[2(F_{\text{в}} - F_{\text{н}})] = 1/2\Delta f_{\text{сп}}, \quad (10.46)$$

где Δf — ширина спектра функции $\lambda(t)$.

Если $F_{\sigma} \gg F_{\text{н}}$, $\Delta t \approx 1/2F_{\text{в}}$.

Если функция $\lambda(t)$ имеет конечную продолжительность во времени (что относится к большинству реальных сообщений), то ее можно приближенно заменить рядом Котельникова с конечным числом членов, т. е.

$$\lambda(t) \approx \sum_{k=1}^{k=m} \lambda(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_{\sigma}(t - k\Delta t)}{2\pi F_{\sigma}(t - k\Delta t)}, \quad (10.47)$$

где m — число отсчетов.

Приближенность выражения (10.47) обусловлена тем, что при конечном числе членов сумма точно совпадает с мгновенными значениями функции $\lambda(t)$ не на всем интервале времени T_c существования функции $\lambda(t)$, а только в точках отсчетов. В интервалах между точками отсчета значения функции $\lambda(t)$ и сумма конечного числа членов различаются, т. е. между ними появляется погрешность. Наибольшие значения она имеет на краях интервала T_c , а наименьшие — в его середине. Чем больше m , тем точнее выражение (10.47), т. е. условие малой погрешности выражается как:

$$m = \frac{T_c}{\Delta t} = 2F_{\sigma} T_c \gg 1. \quad (10.48)$$

Замену передачи непрерывной функции времени передачей дискретной во времени последовательности ее мгновенных значений иногда называют импульсным преобразованием непрерывной функции времени. В реальных системах с учетом практических возможностей осуществления интерполяции для повышения точности восстановления

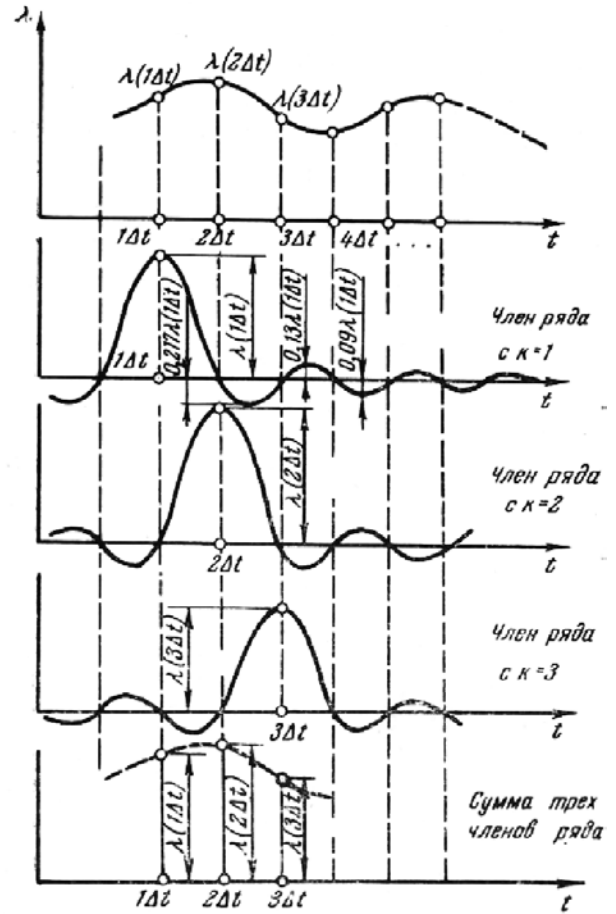


Рис. 10.49. Представление функции через ее значения в дискретные моменты времени

измеряемой функции по дискретным значениям частоту выборок (повторения) $F_n = 1/\Delta t$ берут из условия $F_n > 2F_B$, т. е. уменьшают интервал дискретизации Δt по сравнению с интервалом, определяемым теоремой Котельникова. Степень этого неравенства определяется требованиями точности интерполяции (восстановления исходной функции), характеристиками аппаратуры и др.⁴.

Рассмотрим порядок величин допустимой дискретности передачи сообщений во времени или Δt , которые могут иметь место при передаче непрерывной телеметрической информации в аппаратуре контроля параметров орудий лова и обстановки в зоне их действия. В этом случае информацию и сообщения можно разделить на два вида: измерительную и контрольную информацию о параметрах орудия лова и среды в зоне его работы и информацию о рыбе в районе орудия лова.

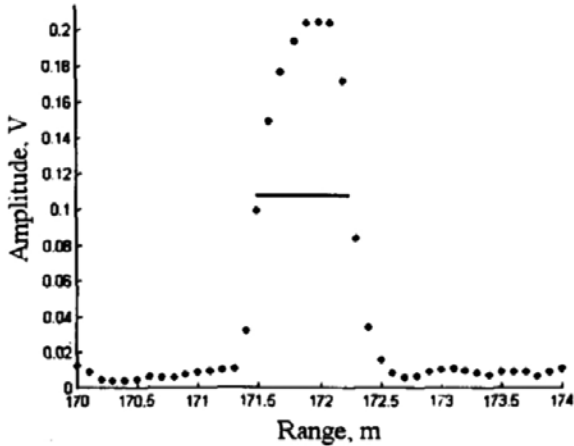


Рис. 10.50. Дискретизация эхосигнала от небольшой цели в толще воды, зарегистрированного цифровым эхолокатором. Горизонтальная линия показывает продолжительность эха длительностью около 1 мс или длиной 0,75 м на уровне половины его амплитуды

(рис. 10.50). Излучаемый импульс имеет длительность $\tau = 1$ мс и, соответственно, длину в воде примерно 75 см. При частоте дискретизации (выборок) 7,5 кГц получается 7,5 выборок на длине импульса излучения, что удовлетворяет критерию Nyquist с приемлемым запасом. В настоящее время в научной гидроакустической аппаратуре вертикальной локации используемая минимальная частота дискретизации излучаемых импульсов составляет четыре выборки на импульс. Следует отметить, что частота выборок для использования при обработке сигналов в такой аппаратуре может быть выше, чем допускаемая для отображения и хранения.

Остановимся на основных сообщениях первого вида (глубина хода, температура, вертикальное раскрытие и др.). Продолжительность указанных сообщений определяется временем процесса лова. В связи с тем, что такие зависимости, как изменение горизонта хода трала, его вертикального раскрытия, температуры в процессе траления носят случайный характер и представление их в аналитическом виде для определения граничной частоты спектра F_g и соответственно частоты выборок F_g практически невозможно, для нахождения Δt целесообразно использовать графические и графо-аналитические методы расчета. Если контролируемая величина h в процессе измерения не меняется, то в принципе для ее воспроизведения достаточно передать всего одно значение этой величины; если измеряемая величина на каком-то участке имеет постоянный градиент изменения — достаточно передать два ее дискретных значения в точках, соответствующих началу и концу этого участка.

Если изменение функции не является линейным, возможный интервал между сообщениями Δt определяется скоростью отклонения измеряемой величины от линейной зависимости, т. е. скоростью изменения градиента, или второй производной функции

⁴ Практически F_n обычно выбирают не меньше $(3-4)F_n$, а иногда и больше.

$d^2\lambda/dt^2$, и заданной точностью измерения. Время, за которое измеряемая величина отклоняется от линейного изменения на величину допустимой ошибки δ , определяет временной интервал между передачей отдельных дискретных сообщений Δt . В связи с тем, что при разработке телеметрической системы необходимо знать минимальное значение $\Delta t_{\text{мин}}$, его следует определять на участке функции, имеющем наибольшую кривизну, т. е. где $d^2\lambda/dt^2 = \alpha_{\text{макс}}$

Основным параметром, который претерпевает наиболее быстрые изменения в процессе лова, является горизонт хода трала при прицельном разноглубинном тралении, когда для наведения трала на обнаруженное скопление часто необходимы быстрые изменения его глубины хода. Приемлемую дискретность передачи информации в таких режимах можно определить исходя из максимально возможных изменений скорости погружения или подъема трала при изменениях длины вытравленных ваеров и скорости движения судна, т. к. графическое построение указанных функций для нахождения Δt весьма затруднено и для реальных систем не является необходимым.

Как известно, максимальная скорость изменения горизонта хода трала при пелагическом лове составляет примерно 7–10 м/мин, что позволяет практически без ухудшения точности измерений иметь дискретность передачи глубины, равную нескольким десятым долям герца или нескольким секундам (до 6 сек). При этом погрешность из-за дискретности передачи не будет превышать 1 м, что вполне допустимо*. Остальные параметры, передаваемые телеметрической аппаратурой контроля, в процессе лова изменяются значительно медленнее, поэтому они не являются определяющими при нахождении $\Delta t_{\text{мин}}$. При отдаче трала параметры могут меняться быстрее, однако в этом режиме не требуется высокая точность их измерения. При использовании приборов контроля, измеряющих также температуру воды в районе трала, необходимо учитывать, что в некоторых случаях при эволюциях трала в районе резких изменений градиента температуры (в зоне температурного скачка) могут иметь место дополнительные погрешности в измерении температуры из-за дискретности передачи сообщений в случае различных знаков изменений горизонта хода трала и температурного градиента.

[*При измерении отстояния трала от грунта интервал дискретизации должен быть несколько меньше.]

При необходимости точных измерений в этом случае нужно уменьшить скорость погружения или подъема подводного блока с измерителем температуры. Применяемая на рыбопромысловых судах телеметрическая аппаратура имеет обычно дискретность передачи до 2 сек (соответственно частоту повторения до 0,5 Гц), которая выше минимально необходимой с точки зрения воспроизведения передаваемых сообщений, однако позволяет повысить надежность передачи сообщений благодаря использованию их избыточности, т. к. вероятность повторных однотипных искажений сигнала относительно мала.

Как уже отмечалось, для передачи информации по каналу связи последняя должна быть нанесена на переносчик. Процесс нанесения информации или сообщения заключается в изменении того или иного параметра переносчика по закону $\lambda(t)$ изменения передаваемого сообщения. Этот процесс получил название модуляции. При модуляции задача сводится к функциональному преобразованию одной величины (параметр сообщения) в другую (параметр сигнала). Цель такого преобразования состоит в замене параметра сообщения величиной, удобной для передачи по каналу связи и, прежде всего, наименее подверженной искажениям при изменении характеристик канала связи и действию помех. Способы модуляции делятся на непрерывные, импульсные и дискретные или кодовые. В телеметрической аппаратуре контроля параметров орудий лова находят применение все указанные способы. Используются также многократные методы модуляции.

Переносчиком в случае непрерывных видов модуляции служит синусоидальное напряжение $U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, где U_m , ω и φ — соответственно амплитуда, частота и начальная фаза колебаний.

При амплитудной модуляции (АМ) амплитуда синусоидального сигнала изменяется в зависимости от значения передаваемого параметра λ , т. е. $A = \varphi(\lambda)$. Обычно эта связь линейна, т. е.

$$A(\lambda, t)_{\text{АМ}} = U_0 [1 + m\lambda(t)] \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

где U_0 – среднее значение амплитуды сигнала, соответствующее $\lambda = 0$; m – коэффициент модуляции ($m \leq 1$); $\lambda(t)$ – изменяется в пределах $+1 \div -1$ (нормированная функция); ω_0 – несущая частота, которая при АМ остается постоянной.

Ширина спектра АМ равна $\Delta f_{\text{АМ}} = 2F_m$, где F_m – наивысшая частота спектра функции $\lambda(t)$.

При частотной модуляции (ЧМ) частота синусоидального сигнала изменяется во времени по закону изменения измеряемого параметра λ . При линейной ЧМ

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_d \lambda(t), \quad (10.48)$$

где ω_0 – значение несущей частоты, соответствующее $\lambda = 0$; ω_d – максимальное отклонение или девиация частоты.

Амплитуда модулируемого колебания в этом случае постоянна.

Так как

$$\Omega = d\psi/dt,$$

где $\psi = \omega(t)t + \varphi$ – аргумент синусоидальной функции, сигнал ЧМ записывается в виде:

$$A(\lambda, t)_{\text{ЧМ}} = U_m \sin(\psi) = U_m \sin \left(\int_0^t \omega dt + \varphi \right) = U_m \sin \left[\omega_0 t + \omega_d \int_0^t \lambda(t) dt + \varphi \right],$$

т.е. результирующее колебание является функцией интеграла от модулирующего колебания $\lambda(t)$, поэтому ЧМ называют интегральным видом модуляции. В тех случаях, когда $\lambda = \text{const}$ в некотором интервале наблюдения $0 - t$, сигнал ЧМ может быть записан следующим образом:

$$A(\lambda, t)_{\text{ЧМ}} = U_m \sin[\omega_0 + \omega_d \lambda],$$

т. к. $\int_0^t \lambda(t) dt = \lambda t$.

Ширину спектра сигнала ЧМ для приближенных расчетов при любых соотношениях между $f_d = \omega_d/2\pi$ и максимальной частотой спектра модулирующего сигнала F_m можн

$$\Delta f_{\text{ЧМ}} \approx 2(f_d + F_m).$$

Частотная модуляция достаточно широко используется в системах рыбохозяйственной телеметрии благодаря удобству реализации и высокой помехоустойчивости. В системах с фазовой модуляцией (ФМ) фаза синусоидального колебания функционально связана с λ . Обычно эта связь линейна, т. е. $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi\lambda$, где $\Delta\varphi$ – постоянный коэффициент (индекс фазовой модуляции).

Сигнал ФМ имеет вид:

$$A(\lambda, t)_{\text{ФМ}} = U_m \sin[\omega_0 t + \Delta\varphi\lambda(t) + \varphi_0].$$

Амплитуда модулируемого колебания в этом случае, как и при ЧМ, постоянна. Текущая частота сигнала ФМ пропорциональна производной $d\lambda(t)/dt$. Действительно, используя выражение (10.48), получим:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\varphi (d\lambda(t))/dt.$$

Таким образом, сигнал ФМ эквивалентен сигналу ЧМ с модулирующей функцией $d\lambda(t)/dt$. Ширина спектра сигнала ФМ приближенно может быть найдена по формуле $\Delta f_{\text{ФМ}} = 2F_m(1 + \Delta\varphi)$.

Колебания при АМ и ФМ являются функциями модулирующего напряжения $\lambda(t)$, поэтому их иногда называют прямыми видами модуляции. В телеизмерительной аппаратуре фазовая модуляция редко используется в качестве первичной модуляции. Это объясняется тем, что для измерения фазы в приемном устройстве необходимо иметь опорное напряжение, синхронное и синфазное с опорным напряжением на передающей стороне. В большинстве случаев это опорное напряжение в приемном тракте отсутствует и для его передачи требуется специальный канал связи. Когда ФМ применяется в качестве вторичной модуляции, передача опорного сигнала не нужна.

Импульсные виды модуляции используют в качестве переносчика информации последовательность импульсов (видеоимпульсов или радиоимпульсов). При амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) амплитуда импульсов изменяется в соответствии с изменением контролируемого параметра λ , а период следования и длительность импульсов остаются при этом постоянными. Различают АИМ первого и второго рода. При АИМ первого рода амплитуда импульса на протяжении всей его длительности в каждый момент соответствует текущему значению $\lambda(t)$; при АИМ второго рода амплитуда одного импульса постоянна и ее значение соответствует значению $\lambda(t)$ в тактовой точке, т. е. в начале импульса. При линейной амплитудной модуляции второго рода сигнал одного k -го периода записывается в виде

$$A(\lambda, t) = U_m[1 + m\lambda(kT_0)]\psi(t - kT_0),$$

где $\psi(t)$ — функция, описывающая импульс и отличная от нуля только в течение длительности импульса; T_0 — период следования импульсов; m — индекс модуляции; U_m — средняя амплитуда импульсов, соответствующая $\lambda = 0$. Если длительность импульсов мала $\tau \ll T_0$, так что за время существования импульса функция $\lambda(t)$ изменяется мало, то различие между АИМ-1 и АИМ-2 становится несущественным. Анализ показывает, что АИМ-2 сопровождается искажениями и на передающей стороне этот вид модуляции обычно не применяется. АИМ-2 получается на приемной стороне, если перед демодуляцией АИМ-1 осуществляется удлинение импульсов. К недостаткам АИМ следует отнести большую погрешность передачи вследствие нестабильности амплитуды. Именно поэтому АИМ редко используется в качестве первичной однократной модуляции для передачи сообщений в телеметрических системах. В основном модуляция типа АИМ в телеизмерении применяется в качестве первичной модуляции в многоканальных системах с временным разделением каналов и с использованием ЧМ во второй ступени, обеспечивающей высокую помехоустойчивость. Ширина спектра сигнала АИМ практически равна ширине спектра одного импульса. При передаче информации с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) длительность передаваемого импульса функционально связана с λ . Обычно эта связь линейна, т. е.

$$\tau_{\text{и}} = \tau_0 + \Delta\tau\lambda, \quad (10.49),$$

где τ_0 — средняя длительность импульса; $\Delta\tau$ — временная девиация.

Различается односторонняя и двусторонняя широтно-импульсная модуляция (ШИМ-1 и ШИМ-2). В случае односторонней ШИМ начало импульса совпадает с тактовой точкой, а изменение λ меняет положение заднего фронта импульса. При двусторонней ШИМ зафиксировано положение середины импульса. Оба фронта смещаются относительно середины импульса на величину, пропорциональную λ . В ШИМ погрешность передачи зависит от длительности фронта $\tau_{\text{ф}}$ импульса. Отношение $T_{\text{в}} = 2\Delta\tau / \tau_{\text{ф}}$ называют индексом временной модуляции. В случае прямоугольных видеоимпульсов сигнал в одном периоде ШИМ-1 записывается в виде:

$$U_m \text{ при } kT_0 \leq t \leq kT_0 + \tau_{\text{и}}(\lambda - kT_0)$$

$$A(\lambda, t) = 0 \quad (10.50)$$

при $kT_0 + \tau (\lambda = kT_0) \leq t < (k+1)T_0$.

Ширина спектра сигнала ШИМ практически определяется длительностью фронта импульсов $\Delta f = \mu / \tau_{\phi}$, где $\mu = 0,5-1$ в зависимости от формы фронта видеоимпульса. Широтно-импульсная модуляция довольно широко используется в промышленных системах телеметрии, что объясняется обычно простотой модуляторов и демодуляторов.

Времяимпульсная модуляция (ВИМ), называемая иногда также фазо-импульсной модуляцией (ФИМ), заключается в изменении запаздывания импульсов стандартной амплитуды и длительности относительно тактовой точки или тактового импульса. При этом длительность импульса τ обычно во много раз меньше периода следования импульсов T_0 . Таким образом, значение измеряемого параметра в одном цикле измерения характеризуется сдвигом по времени одного короткого рабочего импульса относительно тактовой точки или тактового импульса. При линейной ВИМ запаздывание t_{3k} переднего фронта в k -м периоде импульса связано с λ соотношением $t_{3k} = t_{30} + \Delta\tau\lambda(t - kT_0)$, где t_{30} — запаздывание, соответствующее $\lambda = 0$; $\Delta\tau$ — временная девиация, т. е. диапазон сдвига импульса относительно тактовой точки.

Математическая запись сигнала в одном цикле имеет вид:

$$A(\lambda, t) = U(t - t_3) \text{ при } kT_0 + t_{3k} \leq t < t_{3k} + \tau \text{ и } 0 \text{ при } t_{3k} + \tau \leq t < (k+1)T_0, \quad (10.51)$$

где $U(t)$ — функция, описывающая форму импульса.

Так же, как и в ШИМ, отношение $m_b = 2\Delta\tau / \tau_{\phi}$, где τ_{ϕ} — длительность фронта, называется индексом временной модуляции. Ширина спектра сигнала ВИМ при $m_b \gg 1$ определяется шириной спектра одиночного импульса. Частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) характеризуется тем, что частота следования передаваемых импульсов изменяется в соответствии с величиной измеряемого параметра λ . Различается ЧИМ-1, при которой длительность импульсов постоянна, и ЧИМ-2, при которой длительность импульса всегда равна половине периода следования импульсов, т. е. скважность передачи всегда равна двум. Сигнал ЧИМ-2 может быть получен из сигнала ЧМ путем двустороннего ограничения. Частота следования импульсов f_{Π} связана с λ соотношением $f_{\Pi} = f_0 + f_d \lambda$, где f_d — девиация частоты; f_0 — частота повторения при $\lambda = 0$.

При $\lambda = \text{const}$ сигнал ЧИМ будет представлять собой периодическую последовательность импульсов с периодом $T_{\Pi} = 1/F_{\Pi} = 1/f_0 + f_d \lambda$.

Такая последовательность записывается в виде суммы отдельных импульсов, сдвинутых относительно первого импульса на величину kT_{Π} :

$$A(\lambda, t) = \sum \psi(t - kT_{\Pi} - t_0),$$

где k — номер импульса; $\psi(t)$ — функция, описывающая одиночный импульс; t_0 — запаздывание начального импульса ($k = 0$), меньшее T_{Π} .

Ширина спектра сигнала ЧИМ, так же как ВИМ и ШИМ, приближенно определяется длительностью фронта импульсов или минимальной длительностью импульса. В живых организмах передача сообщений по нервной сети осуществляется с помощью модуляции, близкой к ЧИМ-1. В промышленной телемеханике чаще используется ЧИМ-2, получаемая из ЧМ путем двустороннего ограничения.

При кодово-импульсной модуляции (КИМ) передача информации осуществляется посылкой различных кодовых комбинаций импульсов. При этом передаваемая функция $\lambda(t)$ подвергается квантованию по амплитуде (уровню), а иногда и по времени. В системах телеизмерения широко используются многократные методы модуляции, особенно часто — двойные. В одних случаях это объясняется лучшими показателями таких модуляций, например, более высокой реальной помехоустойчивостью, в других — характеристиками переносчика информации или удобством построения систем, в особенности многоканальных. При двукратной модуляции параметр $\lambda(t)$ используется в каче-

стве модулирующего сигнала при первичной модуляции. Образованный в результате первичной модуляции сигнал служит затем модулирующим сигналом для вторичной модуляции.

В качестве примера рассмотрим модуляцию типа ВИМ-АМ и ВИМ-ЧМ. Сигнал ВИМ формируется как было описано выше и поступает на амплитудный или частотный модулятор. Амплитуда или частота сигналов ВИМ-АМ или ВИМ-ЧМ в каждый момент времени пропорциональна напряжению сигнала ВИМ. Если импульсы ВИМ имеют прямоугольную форму, то амплитуда сигнала ВИМ-АМ изменяется скачком и на выходе возникает радиоимпульс постоянной амплитуды; частота сигнала ВИМ-ЧМ также изменяется скачкообразно. При пологом фронте амплитуда или частота во время фронта меняется плавно.

В случае модуляции типа ЧМ-ЧМ первичный модулированный сигнал ЧМ поступает на частотный модулятор генератора более высокой частоты. Частота этого генератора изменяется пропорционально напряжению первичного сигнала ЧМ. По такому же принципу образуются тройные виды модуляции.

В заключение можно указать, что частотный спектр сигналов, возникающих при модуляции, теоретически неограничен, однако для правильного воспроизведения сигнала на приемном конце достаточно передать по каналу связи только составляющие спектра, занимающие определенную полосу частот. Ширина полосы частот выбирается такой, чтобы искажения сигнала, возникшие в результате ограничения его частотного спектра, при последующей расшифровке сигнала не вызывали появления погрешностей, превышающих допустимое значение. Например, для сигнала с временным параметром ограничение полосы частот сигнала искажает форму принимаемого импульса и, что особенно важно, крутизну его фронтов. В результате возникает ошибка в отсчете длительности импульса. Поэтому ширину полосы частот передаваемого сигнала необходимо выбирать исходя из допустимой ошибки в отсчете длительности импульса.

Для передачи по одной линии связи сообщений от нескольких источников — датчиков телеинформации $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, ..., $\lambda_N(t)$ используются многоканальные системы телеизмерения. Существует три основных способа построения многоканальных систем ТИ: временное разделение каналов; частотное разделение каналов и кодовое разделение каналов. В системах с временным разделением передача сообщений отдельных каналов производится поочередно по времени, циклически, с помощью специальных устройств, называемых распределителями или коммутаторами. На приемной стороне с помощью подобного распределителя осуществляется рассортировка сообщений по отдельным каналам. В таких системах сначала в течение времени Δt_1 передается сигнал $\lambda_1(t)$, затем в течение времени Δt_2 — сигнал $\lambda_2(t)$ и т. д. до $\lambda_N(t)$. Затем снова передается $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ и т. д. Сумма всех Δt_i называется временем цикла. Если все каналы идентичны, то

$$T_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^N \Delta t_i = N\Delta t. \quad (10.52)$$

При временном разделении в каждом из каналов передаются отдельные значения параметров, разделенные интервалом $T_{\text{ц}}$. Такая передача допустима благодаря возможности замены непрерывной функции ее отдельными дискретными значениями согласно теореме Котельникова. Очевидно, что в многоканальной системе с временным разделением каналов длительность цикла должна выбираться из условия:

$$T_{\text{ц}} < 1/2(F_{\text{ml}})_{\text{макс}}, \quad (10.53)$$

где $(F_{\text{ml}})_{\text{макс}}$ — наибольшая по всем параметрам максимальная частота спектра параметра $\lambda_i(t)$.

При передаче сигналов в многоканальных системах обычно используются сложные (двойные и тройные) виды модуляции: ЧИМ-АМ, ВИМ-АМ, ВИМ-ЧМ и др. Последние буквы указывают на способ модуляции несущей частоты, а первые — на вид модуляции

в отдельных каналах системы. В системах с временным разделением в качестве первичной модуляции часто используется модуляция типа ВИМ (например, применялась в аппаратуре «Ленинград», ФНР-200). Ширина спектра сигнала в многоканальной системе с временным разделением равна ширине спектра наиболее широкополосного канала. При частотном разделении производится одновременная независимая передача различных сообщений колебаниями разных частот. Системы с частотным разделением каналов делятся на две группы: с частотным разделением по несущим и с частотным разделением по поднесущим.

При частотном разделении по несущим сигнал каждого канала занимает отдельный участок спектра. При этом для передачи одного параметра используется свой генератор несущей, который подвергается модуляции, т. е. имеется несколько выходных генераторов $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$ с частотами f_1, f_2, \dots, f_n , и сигналы телеизмерения передаются на разных несущих частотах. На приемной стороне сигналы различных частот разделяются с помощью полосовых фильтров (рис. 10.61 а) $1ПФ', 2ПФ', \dots, nПФ'$. Средние частоты полосы пропускания этих фильтров соответствуют f_1, f_2, \dots, f_n . При этом все собственно телеизмерительные блоки и другие устройства системы сохраняют свой индивидуальный характер, а объединяется лишь часть приемных устройств. На передающей стороне также могут быть включены полосовые фильтры $1ПФ, 2ПФ, \dots, nПФ$, аналогичные приемным фильтрам. Эти фильтры необходимы для ограничения полосы частот сигналов, посылаемых в линию связи с тем, чтобы избежать пропускания частотных составляющих данного сигнала через приемные фильтры, относящиеся к другим каналам.

Используемые фильтры (ими могут быть любые резонансные системы, в т. ч. УВЧ, УПЧ) не обладают идеальными характеристиками, т. е. пропускают не только частотные составляющие, находящиеся в полосе пропускания фильтров, но и ослабленные колебания за пределами полосы пропускания. Поэтому полосы частот пропускания отдельных каналов не могут располагаться вплотную друг к другу, а должны быть разделены некоторыми защитными частотными интервалами Δf_3 (рис. 10.51).

Очевидно, что чем круче частотная характеристика фильтра за пределами полосы пропускания, тем меньше может быть Δf_3 .

Общая ширина полосы пропускания такой многоканальной системы равна сумме полос частотных спектров сигналов в отдельных каналах (полоса частотного спектра каждого канала определяется видом модуляции и скоростью изменения контролируемого параметра) плюс защитные интервалы между полосами частот соседних каналов, необходимые для устранения взаимного влияния каналов. Указанные системы занимают довольно большую полосу частот линии связи и поэтому применяются в основном при сравнительно небольшом числе каналов. Частотное разделение по несущим особенно удобно в случае рассредоточенных источников информации.

Если отдельные источники сообщений сосредоточены в одном месте, выгоднее использовать частотное разделение по поднесущим, при котором для первичной модуляции в каждом из каналов используется генератор поднесущей. Чаще всего в таких системах используется частотная модуляция поднесущих. Частоты генераторов поднесущих

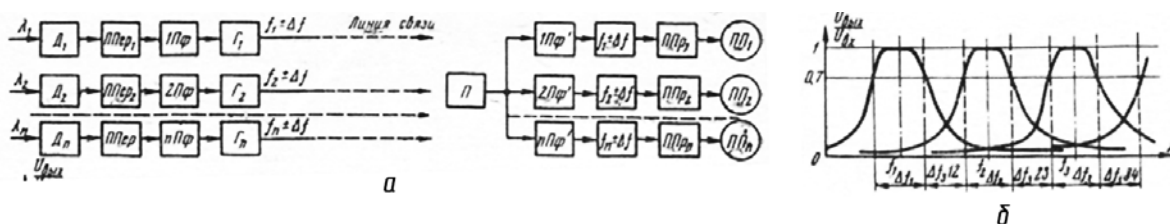


Рис. 10.51. Блок-схема телеизмерительной системы с разделением по несущим (а) и ее частотные характеристики (б):

Д – датчики, ППер, ППр – преобразователи передающего и приемного устройства; ПП – приемные индикаторные приборы; П – общий блок приемного тракта

для отдельных каналов различны. Модулированные сигналы всех генераторов поднесущих суммируются и сумма поступает на общий вторичный модулятор. Обычно при вторичной модуляции используется один из видов непрерывной модуляции – АМ, ЧМ или ФМ. Если первичной была частотная модуляция, соответственно получим системы ЧМ-АМ, ЧМ-ЧМ и ЧМ-ФМ. Первые буквы указывают на первичную модуляцию поднесущих, а вторые – на вид вторичной модуляции в многоканальной системе, общей для всех каналов.

Многоканальные телеизмерительные системы с временным разделением обладают преимуществами по сравнению с системами с частотным разделением при сосредоточенных источниках информации. Существенно, что по линии одновременно передается только один сигнал, в котором и сосредоточена вся энергия. Это увеличивает отношение напряжения сигнала к напряжению помехи при ограниченной мощности передачи. По той же причине отсутствуют и перекрестные помехи от комбинационных частот, характерные для частотного разделения. Отсутствие фильтров значительно упрощает конструирование аппаратуры, сокращается число индивидуальных блоков и узлов. В системах ТИ с кодовым разделением каждому из каналов присваивается сигнал адреса. Информация ТИ во всех каналах может передаваться после сигнала адреса одинаковым способом, например, непрерывным, импульсным или кодовым. Порядок передачи каналов устанавливается программой либо зависит от характера информации в отдельных каналах, например, более срочные сообщения могут быть переданы вне очереди.

10.12.2. Линии связи в подводных телеметрических системах измерения и контроля параметров орудий промышленного рыболовства

Как уже отмечалось, передача сообщений и информации в телеметрических системах, в т. ч. и подводных, осуществляется по линиям связи. Направление разработки, проектирования телеизмерительной системы, построения отдельных элементов и узлов схемы и ее дальнейшее применение в большинстве случаев определяются характеристиками и типом использованной линии связи. Линия связи в подводной телеметрической аппаратуре должна обеспечивать надежность и эффективность связи, помехоустойчивость, достаточную пропускную способность, удобство эксплуатации, высокую механическую прочность (для проводной линии связи), автоматичность действия, т. е. немедленную готовность к работе при появлении сигнала и др.

В начальный период развития указанных систем рассматривались возможности применения различных линий связи между орудием лова и судном, проводные, по валам рыболовных тралов и гидроакустические. По результатам нашего изучения и натурной проверки на судне в Атлантике была определена бесперспективность использования ваерной линии связи [Кудрявцев, 1972]. В серийно выпускаемой телеметрической аппаратуре NS-36 (ГДР) использовался одножильный кабель, состоящий из стального оцинкованного троса, являющегося токонесущей жилой, и наружной пластмассовой изоляции. В качестве второго проводника пластмассовой изоляции использовались токопроводящие свойства морской воды [Кудрявцев, 1972]. В настоящее время в телеметрических системах контроля параметров орудий лова используются гидроакустические (бескабельные) и проводные (кабельные) линии связи. В последнее время стали использоваться и оптоволоконные.

10.12.3. Развитие телеметрических систем измерения и контроля параметров орудий промышленного рыболовства

Создание и практическое внедрение телеметрических систем контроля характеристик трала и рыбы в зоне их действия началось в 60-х гг. прошлого века с разработок приборов контроля глубины хода трала на основе манометрических датчиков.

Параллельно происходило развитие траловых устройств дистанционного контроля с датчиками информации эхолокационного типа. После выпуска ряда траловых зондов с манометрическими датчиками и гидроакустической линией связи между судном и тралом японскими фирмами были начаты разработки траловых зондов с датчиками информации эхолокационного типа, частотной и кодово-импульсной модуляцией, в частности, фирмой Фуруно последовательно выпускались серии аппаратуры типа ФНР вначале с одним эхолокационным датчиком нижнего направления, затем с эхолокацией в верхнем и нижнем направлениях от трала. Западноевропейскими фирмами выпускались траловые зонды эхолокационного типа с кабельными линиями связи. После проведения нами в 1963 г. морских испытаний экспериментального образца тралового зонда с эхолокационным датчиком нижнего направления лоцирования и кабельной линией связи [Кудрявцев, Романенков, 1965] КБ, затем СЭКБ промысловства была последовательно разработана серия гидроакустических траловых зондов с кабельной линией связи (на основе каротажных кабелей связи с использованием в качестве второго проводника брони кабеля) ИГЭК, ИГЭК-У, ИГЭК-УМ, Дейма, получивших широкое распространение на отечественных промысловых судах. Было выпущено также некоторое количество приборов с манометрическим датчиком «Глубина». Заводом «Прибой» и ОКБ «Бриз» были разработаны траловые зонды с эхолокационными датчиками верхнего и нижнего направления зондирования СКОЛ, СКОЛ-1500 (с глубиной погружения до 1500 м) с гидроакустической линией связи и СКОЛ-2000Р [Кудрявцев, 1969, 1970, 1974, 1976, 1977, 1977 а; Аристов, Кудрявцев, 1980; Кудрявцев и Шубный, 1988] и некоторое количество приборов с манометрическим датчиком «Горизонт».

Передача информации на борт судна в СКОЛ-2000Р могла осуществляться не только по гидроакустической, но и по кабельной линии, что позволяло увеличить надежность канала связи, работать подводным устройствам без перезарядки аккумуляторов от судовой сети переменного тока (они получают электропитание непосредственно по кабелю связи). При порыве или повреждении кабеля судоводитель непосредственно с пульта управления в рулевой рубке мог оперативно переключить аппаратуру на гидроакустический канал связи. Передача по кабельной линии могла обеспечиваться при наличии на судне кабельной лебедки (или при дополнительной установке лебедки). Для подключения кабеля в «СКОЛ-2000Р» был предусмотрен разъем от обычных кабельных зондов. В составе ряда систем «СКОЛ-2000Р» имелось два типа подводных измерительно-передающих устройств – ИП-1 для работы в диапазоне глубин до 2000 м и ИП-III до глубины 400 м. Они существенно отличались от системы «СКОЛ-1500» как в конструктивном (выполнены в виде двух цилиндров, в одном размещалась электронная схема, в другом – блок питания с антенным блоком между ними, так и в схемном отношении. В состав ИП-1 и ИП были введены дополнительно датчик давления (глубины) и антенна для приема сигналов от приборов контроля степени наполнения мешка трала рыбой (КНТ).

Большое внимание уделялось развитию устройств дистанционного контроля непосредственно во время траления степени наполнения трала рыбой. Нами проводились экспериментальные исследования в садках по определению затухания акустических колебаний в водорыбной среде (на частотах 25,5 и 40 кГц), по результатам которых разрабатывались гидроакустические датчики контроля степени заполнения вертикальной локации для установки на траловом мешке [Кудрявцев и др., 1965; Кудрявцев, 1972]. Также были разработаны датчики наполнения дискретного действия «Оберон» [Круковер, Кудрявцев, 1975], «Эридан» [Кудрявцев, 1979; Кудрявцев, Зубарев, 1983] с гидроакустической линией связи между датчиками, устанавливаемыми на мешке трала, и центральным траловым блоком зонда на верхней подборе трала с приемом их сигналов боковыми лепестками акустической антенны центрального блока. Они широко применялись на промысловых судах. В аппаратуре «Оберон» был применен эластичный строб, позволивший реализовать три степени наполнения тралового мешка при одном траловом блоке [Кудрявцев, 1979]. Подобная конструкция в принципе могла бы использоваться для обеспечения непрерывного (не дискретного) контроля степени наполне-

ния тралового мешка рыбой, во всяком случае, в определенных пределах. Непрерывная оценка изменения наполнения нередко весьма важна при промысловой работе траулера [Кудрявцев, 1992].

Отечественные серийные приборы контроля степени наполнения трала стали выпускаться и применяться на наших промысловых судах раньше, чем был начат их выпуск зарубежными фирмами.

Параллельно были начаты разработки траловых систем дистанционного определения положения косяков рыбы относительно трала в направлении его движения после того, как судно пройдет над косяком. При прицельном траловом лове с помощью обычной телеметрической аппаратуры (особенно при большой длине ваеров) часто имеют место случаи, когда трал выводится на горизонт нахождения скопления или косяка, зарегистрированного судовым эхолотом вертикального действия, но улов отсутствует и траловый зонд не фиксирует рыбу. Это связано с тем, что после прохождения судна над рыбой и до подхода трала к этому месту проходит определенное время (до 10–15 мин), в течение которого на судне отсутствует какая-либо информация о косяке и данные о точном положении трала относительно судна. Косяк рыбы за это время может изменить свое положение как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости, а сведения об этом в кормовом секторе судна нередко сложно получить вследствие сильного влияния кильватерной струи и шумов гребного винта на работу бортовых рыбопоисковых гидролокаторов. Положение трала относительно судна также не остается неизменным и зависит от дрейфа, течений и других факторов, под действием которых он может идти не точно за кормой траулера. Эти причины могут привести к пролову даже при нормальной работе гидроакустической аппаратуры и орудия лова.

Для преодоления указанных недостатков разрабатывались телеметрические системы, определяющие положение косяка рыбы относительно трала в ближней зоне [Петров, Кудрявцев, Орлов, 1965]. Они предназначались для заполнения того пробела в подводной информации, который был после прохождения судна над рыбой при применении траловых зондов обычного типа. Кроме того, такие системы использовались для изучения поведения рыбы в зоне трала, т. е. характеристик взаимодействия рыбы и трала с целью совершенствования существующих и создания новых типов рыболовных тралов.

В СЭКБ промысловства была разработана и выпускалась траловая система «Прицел» с шестью акустическими антеннами и кабельной линией связи [Петров, Кудрявцев, Орлов, 1965; Петров, 1980]. Характеристики направленности 4-х антенн располагались таким образом, чтобы обеспечить попеременное зондирование обстановки перед тралом в направлениях вперед-вверх, вперед-вниз, вперед-вправо и вперед-влево относительно траектории движения трала. Кроме того, были предусмотрены две дополнительные антенны: одна для наблюдения обстановки над тралом и измерения горизонта хода трала, а другая — для наблюдения обстановки в устье и ниже трала, измерения отстояния трала от грунта и вертикального раскрытия. Передача информации с трала на судно и сигналов управления с судна осуществлялась по одножильному каротажному кабелю. В траловом устройстве, кроме акустических антенн, был установлен коммутатор, позволяющий подключать по командам с судна ту или другую антенну. Аппаратура также предусматривала возможность подключения к ней и других источников информации, например, датчиков температуры в месте нахождения трала, датчиков степени наполнения и др.

Прицельный лов с применением аппаратуры «Прицел» проводился следующим образом. При обнаружении косяка судовым гидролокатором ориентировочно определялась и затем уточнялась посредством акустической вертикальной локации глубина нахождения косяка в момент прохождения над ним судна, и трал предварительно выводился на заданный горизонт по показаниям вертикально направленной вверх антенны аппаратуры. После прохождения судна над косяком оператор последовательно переключал антенны системы и зондировал обстановку в различных секторах по направлению движения трала, тем самым определялось положение косяка относительно трала.

Если косяк фиксировался всеми четырьмя антеннами, это означало, что трал движется прямо на косяк, если же косяк регистрировался одной или двумя антеннами в зависимости от местоположения косяка, то соответственно корректировалось положение трала изменением скорости или курса судна, или же изменением длины вытравленных ваверов. Все антенны размещались в специальном обтекаемом щитке, устанавливаемом на верхней подборе трала. Бортовая часть аппаратуры состояла из приемно-передающего и регистрирующего устройства, пульта управления и кабельной лебедки. Пульт управления предназначен для подачи команд на переключение каналов информации и для индикации включенного канала. Исходя из проведенных расчетов возможной корректировки положения трала в пространстве необходимая дальность обнаружения средних косяков указанной системой была выбрана равной порядка 500 м. Аппаратура работала на частоте 50 кГц, имела электрическую мощность генератора в импульсе 5 кВт, длительность излучаемых импульсов около 10 м/сек.

Фирмой Elac (Германия) была разработана телеметрическая система Elac Netsounder NES6 с четырьмя акустическими антеннами, две из которых с рабочей частотой 30 кГц предусматривались для зондирования обстановки над тралом и ниже трала, а две других с рабочей частотой 37,5 кГц для зондирования в горизонтальном направлении по направлению движения трала. Оси диаграмм направленности этих двух антенн были немного отклонены вправо и влево от направления движения трала, но их характеристики частично перекрывались. Индикация эхосигналов, принимаемых антеннами переднего направления локации, осуществлялась на специальном электронном индикаторе, а верхним и нижним – на самопишущем регистраторе. Электронный индикатор мог подключаться и ко второй паре антенн. В связи с необходимостью постоянной работы вертикально направленных антенн предусматривалась возможность непрерывного получения информации обеими группами акустических антенн с помощью одновременно зондирования на двух различных частотах.

В траловой системе дистанционного контроля института Fangtechnik для определения положения рыбы относительно трала по глубине в его передней зоне использовались две акустические антенны, одна из которых излучала в горизонтальном направлении по ходу трала, а другая – под углом 15–25° вниз к направлению движения трала. Обнаружение рыбы перед тралом обеспечивалось до расстояния 200 м. Приемные тракты этих двух антенн были подключены к отдельному специальному самопишущему регистратору и с помощью реле автоматически последовательно переключались, обеспечивая быстрый просмотр пространства впереди трала. В системе также были предусмотрены каналы акустического наблюдения в верхнем, нижнем и перпендикулярных направлениях от центра нижней подборы трала. Кроме того, один эхолокационный датчик предназначался для установки на дели, за верхней подборой трала, с излучением вниз, для наблюдения за распределением рыбы внутри трала по вертикали. В траловом блоке аппаратуры также устанавливался измеритель течения для определения скорости трала относительно воды и экспериментальный акустический буй для определения положения трала относительно судна с помощью судового гидролокатора.

Последней разработкой этого института был вариант вышеуказанной телеметрической аппаратуры Super Multinetz-sonde, который имел акустическую систему наведения трала из четырех вперед направленных акустических антенн (вперед-вверх, вперед-вниз, вперед-вправо и вперед-влево) с диаграммами направленности $27,5 \times 76,5^\circ$, соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях [Кудрявцев, 1974].

СЭЖБ промысловства (группой Коренькова А.И.) также был разработан и использовался на промысле траловый гидролокатор «Инструч» для определения положения косяков рыбы в передней зоне трала с двумя веерными характеристиками направленности с разными наклонами вееров в вертикальной плоскости.

В настоящее время на промысловых судах нередко применяется даже большее количество средств гидроакустического дистанционного контроля параметров орудий лова и обстановки в зоне их действия, чем на научно-исследовательских.

Выпускаемая в настоящее время телеметрическая аппаратура контроля лова представляет собой большей частью комплексные системы с самыми различными датчиками подводной информации, обеспечивающие, кроме контроля горизонта хода трала, его вертикального раскрытия и рыбы в зоне устья трала, также следующие характеристики траловой системы:

- определение координат элементов трала (положения трала) или кошелькового невода относительно судна;
- контроль геометрии (горизонтального раскрытия и возможного перекоса) устья трала;
- определение расстояния между траловыми досками;
- контроль наполнения тралового мешка рыбой;
- сигнализацию появления опасного препятствия перед тралом;
- контроль подводной обстановки и рыбы в передней зоне трала;
- сигнализацию об опасной близости нижней подборы трала к донной поверхности и касания с ней.

Так, траловый зонд *CN-24* фирмы *Fuguno* (Япония) относится к системам дистанционного контроля с гидроакустической линией связи подводного блока с бортовой аппаратурой. Конструкция подводного блока зонда рассчитана на глубину погружения до 2000 м. Питание на электронные устройства подводного блока начинает подаваться при достижении им глубины 10 м. Зондирование пространства может осуществляться как в нижнем, так и верхнем направлениях. Получаемая информация о подводных объектах как над, так и под верхней подборой трала передается на судно в кодированном виде. Для кодирования интенсивности эхосигналов и помех используются семь цветовых градаций. Приемная антенна установлена на буксируемом за судном параване. Принятая и декодированная гидроакустическая информация отображается в виде цветных эхограмм на дисплее. На нем также отображается в графическом и цифровом виде температура воды на горизонте хода трала, значение глубины хода трала, метки времени, полоса с используемой для отображения эхосигналов цветовой гаммой, индикатор мощности принимаемого по акустическому каналу связи сигнала. При наличии сопряжения дисплейного блока с гироскопом, судовым лагом и приемником навигационной системы на экран дисплея выводятся числовые значения скорости и курса судна и его географические координаты. Кроме стандартного режима отображения эхосигналов с привязкой к тралу предусмотрен режим привязки акустической информации с трала к поверхности воды (стартовые линии обоих направлений зондирования отслеживают погружение или подъем подводного блока).

Скорость смещения эхограмм по горизонтали может синхронизироваться с зондирующими импульсами эхолокационных трактов подводного блока или определяться временем прохождения вертикальной строки от одного края экрана до другого. В первом случае каждая вертикальная строка изображения может смещаться на один пиксель влево за один, за два, за четыре, за шесть или за восемь циклов излучения-приема. Во втором случае время перемещения изображения по всей ширине экрана может составлять 5, 10, 15, 30, 60, 90 или 120 мин.

Оценка дистанции от подводного блока (от верхней подборы трала) до интересующего подводного объекта (в режиме привязки к поверхности воды это оценка глубины залегания подводного объекта) может выполняться с помощью электронной шкалы глубин. Точное измерение дистанций осуществляется с помощью перемещаемого вверх или вниз электронного визира, над которым индицируется соответствующая дистанция (глубина).

Траловый зонд *CN-24* имеет рабочую частоту эхолокационных трактов подводного блока 75 или 175 кГц; ширину ХН антенн эхолокационных трактов 33° (для частоты 75 кГц) и 15° (для частоты 175 кГц), диапазон измерения температуры воды от минус 5 °С до плюс 40 °С (с шагом 0,1 °С).

Траловый гидроакустический комплекс TCS770 фирмы Wesmar (США) относится к классу траловых акустических систем с кабельной линией связи подводного блока с бортовой аппаратурой. В состав его тралового подводного блока, кроме гидроакустических антенн вертикального лоцирования как в нижнем, так и в верхнем направлениях, входят две антенны с одной характеристикой направленности (ХН) и их электро-механическим сканированием. С помощью одной из этих антенн обеспечивается сканирование устья трала в поперечной плоскости, а второй – обзор пространства перед тралом (лоцирование объектов лова и траловых досок).

Подводный блок может поставляться с рабочей частотой 180 или 310 кГц. Ширина ХН антенны в первом случае составляет $4^\circ \times 30^\circ$, а во втором случае $2,3^\circ - 25^\circ$. Для гидролокатора, обеспечивающего обзор перед тралом, используется рабочая частота 110 кГц, ширина ХН антенны составляет $8,5^\circ \times 8,5^\circ$. В гидролокационном тракте обзора в поперечной плоскости используется рабочая частота 110 кГц при ширине ХН антенн $28^\circ \times 28^\circ$ и сектор обзора 180° или 360° . Траловый гидролокатор переднего обзора может сканировать пространство в горизонтальном и в вертикальном секторах 180° , а также по образующим кругового конуса.

Получаемая гидроакустическая информация отображается на цветном дисплее с разрешением 640×480 пикселей. Предусмотрено 12 режимов отображения информации, использующих различные комбинации дисплейных окон с гидроакустическими данными, получаемыми от обоих гидролокаторов и трактов вертикальной локации. Интенсивность эхосигналов может кодироваться 9 или 16 цветовыми градациями, а цвет фона может быть выбран синим или черным. Управление режимами работы каждого тракта тралового гидролокатора TCS770 осуществляется с помощью панели управления и многоуровневого электронного меню. Наличие двух экранных курсоров позволяет измерять расстояния между любыми элементами, отображаемыми на экране дисплея, например, между траловыми досками. Оперативное переключение значений диапазонов регистрации эхосигналов, длительности зондирующих импульсов, коэффициентов усиления, зоны действия ВАРУ выполняется независимо для каждого тракта тралового гидролокатора. Для повышения помехоустойчивости и получения более качественных изображений обеспечивается возможность перестройки рабочих частот в пределах ± 5 кГц.

Помимо электронных модулей гидроакустических трактов, в подводном блоке размещены датчик температуры воды, гидростатический датчик глубины погружения блока и приемник сигналов датчиков улова. Кроме того, в подводном блоке имеется датчик углов крена и дифферента корпуса блока, данные которого используются для пространственной стабилизации ХН обоих гидролокационных трактов. Стабилизация обеспечивается при углах крена и дифферента до 30° . Данные от этого датчика отображаются также в графическом виде в специальном дисплейном окне, что позволяет при необходимости откорректировать режимы сканирования и углы наклона антенн обоих гидролокационных трактов. Конструкция подводного блока тралового гидролокатора рассчитана на глубину погружения до 1800 м.

В состав гидроакустической траловой системы FS20/25 фирмы Simrad (Норвегия) также входят два тракта гидролокаторов с электро-механическим сканированием акустических антенн. Один тракт обеспечивает сканирование устья трала в вертикальной плоскости, а другой – обзор пространства вокруг трала в горизонтальной плоскости или по конусной поверхности. В состав системы также может входить антенна тракта вертикальной локации.

Подводный блок может поставляться с рабочей частотой гидролокатора со сканированием в вертикальной плоскости 120, 330 или 675 кГц. Ширина ХН антенн этого гидролокатора составляет, соответственно, $5^\circ \times 40^\circ$, $1,9^\circ \times 20^\circ$ или $1,7^\circ \times 90^\circ$. Для тракта эхолокации по вертикали используется антенна с рабочей частотой 200 кГц и шириной ХН $10^\circ \times 20^\circ$. Для обзорного гидролокатора используется рабочая частота 90 кГц. Ширина ХН антенны этого гидролокатора в режиме горизонтального обзора состав-

ляет $7,5^\circ \times 20^\circ$, а при обзоре по конусной поверхности $7,5^\circ \times 7,5^\circ$. Во втором случае обеспечивается наклон акустических ХН в пределах от 15° вверх до 90° вниз. В этих же пределах обеспечивается стабилизация пространственного положения акустических ХН при углах крена и дифферента корпуса тралового гидролокатора до 15° . Ширина как вертикального, так и горизонтального секторов обзора, также как и направление их центров, могут устанавливаться в любых пределах с максимальным значением 360° . Скорость сканирования пространства, определяемая шагом сканирования, может регулироваться в широких пределах. Для кодирования интенсивности эхосигналов используются многоцветные палитры или палитра с градациями серого цвета. Информация каждого тракта гидролокатора отображается в отдельном дисплейном окне, размеры которого могут регулироваться в широких пределах.

На поле с изображением эхосигналов с помощью компьютерной мыши можно перемещать и фиксировать два крестообразных курсора. В специальной экранной панели при этом индицируются пеленг на каждый курсор, дистанция от подводного блока до курсора и дистанция между точками пространства, помеченными курсорами. Во избежание потерь эхосигналов от малоразмерных объектов при излучении коротких зондирующих импульсов используется отбор максимальных значений амплитуды принимаемого сигнала в группе соседних выборок. Помимо элементов гидроакустических трактов, в подводном блоке размещены: датчик температуры воды, гидростатический датчик глубины погружения блока и приемник сигналов датчиков улова. Все получаемые в процессе работы тралового гидролокатора данные могут записываться на жесткий диск для целей последующего воспроизведения и анализа.

Возможна также поставка тралового гидролокатора с пультом дистанционного управления. В процессорном блоке предусмотрен интерфейс для подключения приемника спутниковой радионавигационной системы GPS. Прибор питания и телеметрии предназначен для формирования напряжения питания подводного тралового блока, кодов управления режимами его работы и преобразования аналоговых сигналов, поступающих от тралового блока, в двоичные коды для передачи в процессорный блок. Связь подводного тралового блока с прибором питания и телеметрии должна осуществляться по трехжильному кабель-тросу.

В системе контроля и позиционирования рыболовного трала и рыбы в зоне его действия с гидроакустическими каналами передачи-приема информации ITI фирмы Simrad (Норвегия) может обрабатываться и отображаться информация до девяти функциональных групп или отдельных датчиков. Одним из главных преимуществ системы является способность измерять расстояние и направление до каждого подводного датчика.

В стандартном режиме представления информации на экране системы ITI отображаются в графическом виде три геометрические проекции трала и судна с учетом их взаимного пространственного положения. В верхней части экрана выводится строка со значениями курса и скорости судна, его географические координаты, дата и время. Вверху показывается схематический вид сверху на траловую систему и судно с измеренными горизонтальным расстоянием от верхней подборы трала до судна, дистанцией между траловыми досками, угловым положением трала относительно диаметральной плоскости судна и цветным отображением характера грунта. Слева в нижней части представляется вид на траловую систему и судно сбоку. На виде сбоку (со стороны правого борта) в цифровом виде указываются: глубина верхней подборы; наклонная дистанция от верхней подборы до судна; скорость и направление вертикального перемещения трала по вертикали (в вертикальной плоскости); температура воды на горизонте хода трала; прогнозируемое время прихода трала в позицию судна в данный момент времени. Состояние датчиков степени наполнения-улова отображается аналогично виду сверху. При наличии данных от судового эхолота на виде сбоку отображается контур грунта и в цифровом виде текущее значение глубины моря. Предусмотрена возможность отображения вида, представляющего положение устья трала относительно

но вертикальной плоскости, проходящей через диаметрально плоскость судна. Устье трала изображается в виде эллипса, а ХН судового эхолокатора в виде сечения конуса. В цифровом виде на этом изображении указывается вертикальное раскрытие трала, смещение центра трала относительно диаметральной плоскости судна, расстояние от верхней подборы трала до дна для донного трала или дистанция от нижней подборы трала до дна для пелагического трала. При наличии данных от судового эхолокатора вертикального зондирования отображается в цифровом виде ширина его ХН на горизонте хода трала. В виде сверху (тактический режим) отображается обстановка вокруг судна с траекториями движения судна и трала, с информацией о курсе судна, скорости его движения и географических координатах, направлении перемещения трала относительно судна, горизонте хода трала, расстоянии между тралом и судном и др. Этот режим отображения по внешнему виду близок к режиму кругового обзора в гидролокаторах фирмы Simrad. На экране изображается вид сверху на водную поверхность с символом судна в центре круга, ограничивающего зону наблюдения за окружающей обстановкой. Максимальный радиус этой зоны может быть установлен равным 4000 м. Внешняя окружность зоны наблюдения представляет собой шкалу пеленгов с градацией через 10° , при этом верхняя угловая метка соответствует направлению на север. В пределах зоны наблюдения может устанавливаться маркер цели (маленькая окружность) и треугольный маркер позиции. Маркер цели может вводиться от сопрягаемого с системой ИТ гидролокатора или же вручную оператором. В верхней части экрана индицируются в цифровом виде пеленг на цель, горизонтальная дистанция до нее и ее глубина. Для маркера позиции в нижней части экрана отображаются географические координаты соответствующей точки пространства. В левом нижнем углу экрана отображаются символы датчиков степени наполнения трала, аналогичные стандартному режиму, под которыми указываются в цифровом виде пеленг на трал, горизонтальная дистанция до него и его глубина. Справа от зоны наблюдения отображаются курс, скорость и географические координаты судна, а также скорость вертикального перемещения трала. В специальном окне индицируются расстояние между тралом и маркером цели и время прихода трала при текущей скорости судна на позицию помеченной цели (скопления).

Информация от каждой группы датчиков или отдельных датчиков передается на судно в кодированном виде по гидроакустической линии связи после излучения акустического импульса запроса с борта судна. Излучение импульса запроса и прием информации осуществляются с помощью обратимых преобразователей гидроакустической антенны, устанавливаемой на корпусе судна или выдвижном устройстве. Для запуска датчиков и передачи информации используется диапазон частот от 27 до 33 кГц. В состав гидроакустической антенны могут входить один, два или три преобразователя, каждый из которых состоит из двух половин. Измерение разности фаз сигналов, принимаемых этими половинами, позволяет рассчитывать направление на подводный датчик в горизонтальной плоскости. Ширина ХН преобразователей антенны в вертикальной плоскости составляет 40° . Ширина зоны горизонтального охвата для одиночного преобразователя составляет 40° , для антенны с двумя преобразователями — 70° , а для антенны с тремя преобразователями — 100° . Принятая на борту судна информация декодируется и обрабатывается в приемопередатчике и отображается в различных режимах на цветном дисплее пульта управления и индикации. Предусмотрен также режим отображения графиков изменения измеренных и запомненных (и сохраняемых) параметров трала во времени вместе с навигационной информацией.

В состав системы ИТ входят следующие подводные датчики:

- датчик глубины (обеспечивает измерение глубины своего погружения в диапазоне от 0 до 2000 м);
- датчик температуры (обеспечивает измерение температуры воды в месте его установки в диапазоне от -5°C до $+30^\circ\text{C}$);
- датчики улова (срабатывают при растяжении сети в месте их установки на трал);

– датчик измерения отстояния верхней подборы трала от дна (обеспечивает измерение эхолокационным способом расстояния до поверхности дна и нижней подборы трала);

– датчик, объединяющий функции датчика глубины и датчика температуры;

– датчики расхождения траловых досок (измеряют расстояние между траловыми досками).

В состав датчика определения отстояния трала от дна входит дополнительная гидроакустическая антенна с рабочей частотой 120 кГц и шириной ХН 20° 30°. Максимальное значение дистанции до дна, измеряемой этим датчиком, составляет 100 м, а расстояния до нижней подборы трала – 50 м.

Измерение дистанции между траловыми досками осуществляется путем посылки с одного датчика в сторону другого датчика – приемо-ответчика акустического импульса с частотой заполнения 200 кГц, который после приема ретранслируется обратно датчиком-ответчиком. Полученный результат передается первым датчиком в кодированном виде по акустическому каналу связи на судно. Максимальное значение измеряемой дистанции между траловыми досками составляет 300 м. Второй комплект может устанавливаться на боковых крыльях трала, обеспечивая измерение горизонтального раскрытия сетной части трала. Контроль степени наполнения мешка трала обеспечивается в системе ИТГ с помощью трех последовательно устанавливаемых на траловом мешке датчиков.

На основе датчика высоты над дном фирмой Simrad в дальнейшем был разработан более совершенный датчик наблюдения зоны устья трала, который обеспечивает передачу на борт судна, помимо значений расстояний до нижней подборы и дна, также и дискретных выборок принимаемых эхосигналов. За счет улучшения обработки принимаемых сигналов и использования двух законов ВАРУ (40logR и 20logR) максимальная дистанция фиксации донного эхосигнала этим датчиком была увеличена до 150 м. Предусмотрена возможность регистрации параметров трала на экране в виде отдельных графиков за определенные периоды времени: изменение глубины верхней подборы трала, глубины моря, дистанции от верхней подборы трала до дна, дистанции между траловыми досками, температуры воды на глубине хода трала, изменения температуры воды с глубиной и др.

При наличии в системе ИТГ эхолокационного датчика наблюдения зоны устья трала обеспечиваются еще два режима представления информации на экране дисплея: комбинированный и эхограмма. В комбинированном режиме представления информации на верхней половине экрана отображается позиция трала относительно судна на виде сверху. Это изображение полностью аналогично стандартному режиму. На нижней половине экрана отображается эхограмма сигналов, получаемых в результате работы эхолокационного датчика наблюдения в зоне устья трала. Верхняя линия эхограммы соответствует верхней подборе трала. Помимо отметок эхосигналов от рыб, нижней подборы трала и дна, нижняя подбора и кромка дна дополнительно отображаются в виде цветных линий. Эти линии соответствуют расстояниям до этих объектов, значения которых рассчитываются с помощью специальных алгоритмов. Ширина эхограммы определяется временем наблюдения, которое может устанавливаться равным 30, 60 или 120 мин. Для кодирования интенсивности эхосигналов используется семь цветовых градаций. В режиме эхограммы на экране дисплея отображается только эхограмма, подобная изображаемой в предыдущем режиме.



Рис. 10.52. Гидроакустическая система контроля параметров трала СКПТ

В качестве примера можно также привести отечественную разработку Акустического института (АКИНа) комбинированной траловой гидроакустической системы СКПТ контроля обстановки в зоне нахождения устья трала и перед тралом (рис. 10.52).

СКПТ служит для обеспечения контроля и оценки следующих характеристик:

- положения рыбы в устье трала;
- положения нижней подборы трала относительно поверхности дна;
- раскрытия трала;
- степени заполнения мешка трала рыбой;
- оценки объема и положения скопления рыбы вокруг трала.

Система включает в свой состав 2 гидролокатора, размещенных в одном корпусе:

- гидролокатор вертикального обзора (ГВО);
- гидролокатор горизонтального обзора (ГГО).

Основные параметры:

рабочая частота, кГц:	300 для ГВО и 100 для ГГО;
дальность действия, м:	100 (ГВО, по цели с $R_{\text{экв}} = 0,1$ м); 500 (ГГО, по цели с $R_{\text{экв}} = 2$ м);
ширина сектора обзора, град:	180 в вертикальной плоскости (ГВО) 360 в горизонтальной плоскости (ГГО);
ширина характеристики направленности, град: . . .	для ГВО 2 (вдоль направления сканирования) ×20 для ГГО 5 (вдоль направления сканирования) ×10 с возможностью программного изменения угла наклона в диапазоне $\pm 10^\circ$;
разрешающая способность по дистанции, см:	для ГВО 5; для ГГО 15
предельная глубина погружения, м	300
вес подводного модуля, кг	20 в воздухе, 5 в воде
потребляемая мощность, Вт	50
габариты, мм	250×350
длина оптоэлектрического кабеля связи, м	1000
интерфейс для передачи данных	Ethernet

Обработка и отображение производится на переносном компьютере (ноутбуке).

Таким образом, обеспечение более полного дистанционного контроля за рыбой после прохождения над ней траулера при пелагических тралениях и, соответственно, эффективности тралений может быть осуществлено с помощью гидроакустических систем определения положения трала с судна, сканирующих траловых гидролокаторов зондирования пространства перед тралом, судовых рыбопоисковых гидролокаторов одновременного обзора подводной обстановки в передней зоне и в кормовом секторе судна, телеметрических эхолотаторов контроля погружения скоплений, устанавливаемых на ваерах или на кабеле связи тралового зонда, прохождения рыбы в пределах трала и акустико-световых устройств управления смещением рыбы в сторону мешка трала, максимально оперативного ручного и даже дистанционного управления характеристиками траловой системы [Кудрявцев, 1969, 1970, 1972, 1974, 1976 а, 1976 б, 1977 а, 1977 б, 1978, 1979, 1983, 1988 а, 1988 б, 1988 в, 1990, 1991, 1992, 2007 а, 2007 б, 2011, 2012; Круковер, Кудрявцев, 1975; Аристов, Кудрявцев, 1980; Кудрявцев, Зубарев, 1983; Кудрявцев, Шубный, 1988].

Кроме рассмотренных современных систем рыбохозяйственной телеметрии обеспечения лова с широким использованием гидроакустической техники вертикальной и горизонтальной локации, большое внимание уделяется созданию и применению в реальных условиях промысла аппаратуры измерения и контроля непосредственно харак-

теристик траловых систем. Нередко это дает возможность в процессе траления с помощью соответствующих корректировок характеристик траловой системы обеспечить получение более приемлемых результатов лова или своевременно выбрать трал для внесения необходимых изменений в его оснастку на борту судна.

В качестве примера широкого диапазона серийно выпускаемых телеметрических систем дистанционного контроля параметров траловых орудий лова можно привести аппаратуру с гидроакустической линией передачи информации норвежской фирмы Сканмар. Фирмой Сканмар выпускается весьма разнообразная номенклатура траловой и бортовой аппаратуры для постоянного измерения и контроля характеристик трала непосредственно в процессе лова, отображения их изменений во время тралений в цифровой и графической форме, а также сохранения в электронной памяти для последующего дополнительного анализа и сравнения с предыдущими тралениями, в т. ч. полученными во время предыдущих рейсов в тех же районах.

В состав поставляемых ею приборов входят:

- измерители расстояния между траловыми досками. Они сигнализируют также о потере акустического контакта между досками (т. е. когда они перестают находиться одна напротив другой). В процессе траления они позволяют сразу видеть изменение расстояния между ними в результате изменения скорости траления вследствие влияния подводных течений, наполнения тралового мешка или изменения длины ваеров. Датчики расстояния устанавливаются в держатели, привариваемые непосредственно к доске параллельно ее поверхности для возможно более четкого ориентирования по вертикальным и горизонтальным осям досок;

- датчики углов крена и дифферента траловых досок. Они показывают стабильность положения доски в продольной и поперечной плоскостях, а также идут ли доски под заданным углом крена в процессе траления. При установке они (или их держатели) точно закрепляются относительно вертикальной и горизонтальной плоскости доски (параллельно ее башмаку) для повышения достоверности результатов измерения углов. Проверка и определенная калибровка (корректировка) выполняется с помощью дополнительного устройства (рис. 10.53);

- акустический доплеровский датчик скорости трала. При установке его на верхней подборе трала он измеряет скорость и направление потока воды в зоне устья трала, отличающиеся от скорости судна по GPS в случае наличия подводных течений и входа потока воды в трал под углом или попутно. Подводные течения, попутные, встречные или боковые, отклоняют поток воды в трал, если отсутствует коррекция курса траления, обеспечивающая вход потока воды в трал перпендикулярно плоскости устья;

- датчик симметрии трала. Он может устанавливаться на верхней подборе и на сетной части трала;

- эхолокационный датчик вертикальной локации, устанавливаемый на верхней подборе трала, подобный траловому зонду в системах с кабельной линией связи. Дополнительно такой же датчик может устанавливаться на сетной части для сравнения показаний при прохождении рыбы от устья к траловому мешку. Большой приток рыбы может нередко приводить к так называемому «эффекту ведра» в ближней зоне тралового мешка, что требует снижения скорости траления для избежания указанного эффекта, приводящего к растяжению ячей и уходу через них рыбы;

- датчики глубины нахождения траловых досок. Аналогично тому, как датчик

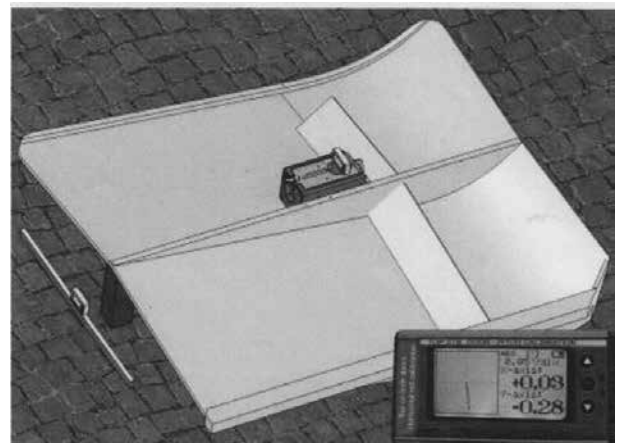


Рис. 10.53. Пояснение установки датчиков углов траловых досок

симметрии позволяет оценивать нарушение симметрии трала в горизонтальной плоскости, разница в показаниях датчиков глубины траловых досок свидетельствует об искажениях формы трала в вертикальной плоскости, т. е. когда одна из сторон трала идет на большей глубине, чем другая. Это может приводить к деформации сетной части и уходу, во всяком случае, части рыбы. Имеется также дополнительный датчик глубины, предназначенный для установки на верхней подборе трала;

– датчики натяжения, устанавливаемые на траловых досках, предназначены для измерения натяжения ваеров или же кабелей. Результаты измерения натяжения ваеров используются при управлении траловыми лебедками, так как, по мнению фирмы, они являются более точными, чем при измерениях на борту судна;

– датчики углов (дополнительные). При установке на верхней подборе или верхней пласти трала датчик углов позволяет определить стабильность хода трала. При его расположении на сетной части трала он непосредственно показывает деформацию сети, а также возможное запутывание;

– датчик улова и индикатор наполнения трала. Датчик улова срабатывает по натяжению стропа в месте его установки. Индикатор наполнения показывает степень наполнения тралового мешка посредством измерения углов его дифферента и крена. Измерения дифферента показывают, как траловый мешок постепенно заполняется до точки установки датчика. Измерения угла крена (перекручивания) показывают, как мешок перекручен (деформирован) в начале наполнения и как он постепенно расправляется по мере заполнения;

– датчик контакта с грунтом (рис. 10.54). Фирма считает, что их датчик позволяет иметь более стабильный контакт с грунтом. В нем также имеется функция измерения угла, позволяющая определить, насколько сильно грунтотроп прижимается к грунту и когда он контакт теряет.



Рис. 10.54. Датчик контакта нижней подборы трала или грунтотропа с грунтом и его установка на трале

Бортовые судовые блоки аппаратуры Сканмар могут состоять из одного или нескольких приемных блоков и мониторов (кроме приемных гидрофонов). В приемном блоке выполняется обработка принятых сигналов, фильтрация шумов и помех, а также подготовка информации для отображения на экранах мониторов. В последних системах предусмотрена возможность регистрации больших объемов данных, что позволяет анализировать записи предыдущих тралений.

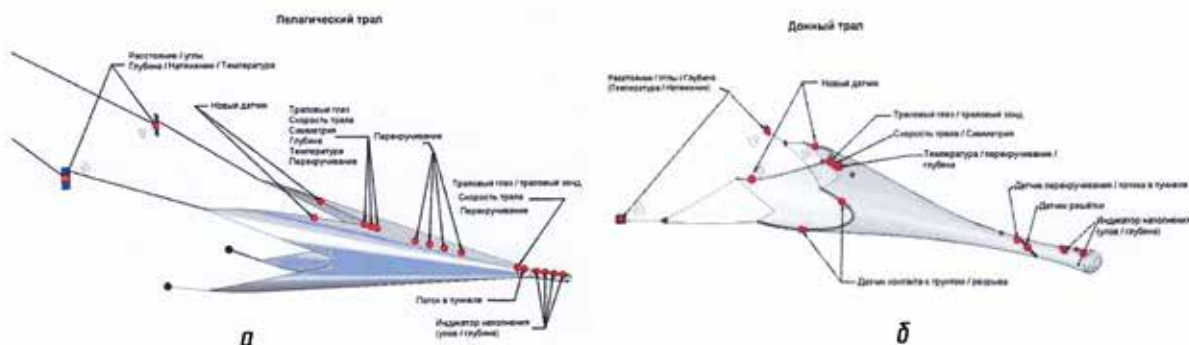


Рис. 10.55. Места установки полного комплекса телеметрических приборов Сканмар с гидроакустической линией передачи информации, измеряемые и контролируемые характеристики и параметры пелагического (а) и донного (б) трала, позволяющие оценить и максимально скорректировать его работу /SCANMAP



Рис. 10.56. Пример отображения результатов измерений и контроля характеристик и параметров траловой системы на экране бортового монитора системы Сканмар, в т. ч. показана посадка донного трала на дно: сначала траловая лебедка тормозится, когда доски находятся примерно в 10 м над грунтом (А). Погружение досок замедляется, а трал продолжает опускаться с прежней скоростью, когда доски коснутся грунта (В) скорость судна несколько увеличится, доски становятся вертикально, распор увеличивается. Через короткое время трал садится на грунт (С).

Возможна установка нескольких мониторов, в т. ч. в рулевой рубке и у тралмастера. На рис. 10.55 показаны места установки полного комплекса телеметрических приборов Сканмар, а также измеряемые и контролируемые характеристики и параметры пелагического (а) и донного трала (б), а на рис. 10.56 – пример отображения информации результатов измерений и контроля параметров траловой системы на экране монитора системы Сканмар.

При использовании телеметрических систем и устройств контроля параметров орудий лова и рыбы в зоне их действия с гидроакустической линией связи следует учитывать или, по меньшей мере, понимать возможные ограничения, обусловленные характером распространения акустических колебаний при передаче информации с орудия лова на судно (рис. 10.57 1, 2, 3). Если при положительной рефракции обычно не возникает серьезных проблем с приемом данных, то при отрицательной, а также при наличии слоя скачка (как можно видеть из рис. 10.57) [Тарасюк, Серавин, 1973, 1992] возможно появление своего рода «мертвых» зон.

Если градиент скорости звука положительный, то имеет место положительная рефракция (рис. 10.57 1), т. е. акустические лучи, выходящие из источника под разными углами, искривляются кверху. Водная среда оказывается разделенной на две принципиально различные зоны: зону тени (на рис. 10.58 заштрихована) и зону акустической освещенности. Нахождение приемников $П_1, П_2, П_3$ в зоне акустической освещенности или зоне тени зависит от расстояния до источников $И_1, И_2, И_3$ и от их положения по глубине. При отрицательном градиенте скорости звука имеет место отрицательная рефракция (рис. 10.57 2), т. е. лучи, выходящие из источника под разными углами, искривляются книзу. Условия распространения сигналов как и в предыдущем случае будут зависеть от взаимного расположения источников и приемников звука относительно друг друга и глубины их нахождения.

Горизонтальным положением источников и приемников (рис. 10.57 1 и 2) можно считать такое, когда отклонение линии, соединяющей источник (излучатель) с приемником, от горизонтальной линии составляет не более $10-20^\circ$. При тралениях большей частью имеет место наклонное расположение источников и приемников, т. к. последние всегда находятся у поверхности воды. Из рис. 10.57 можно видеть, что при одном

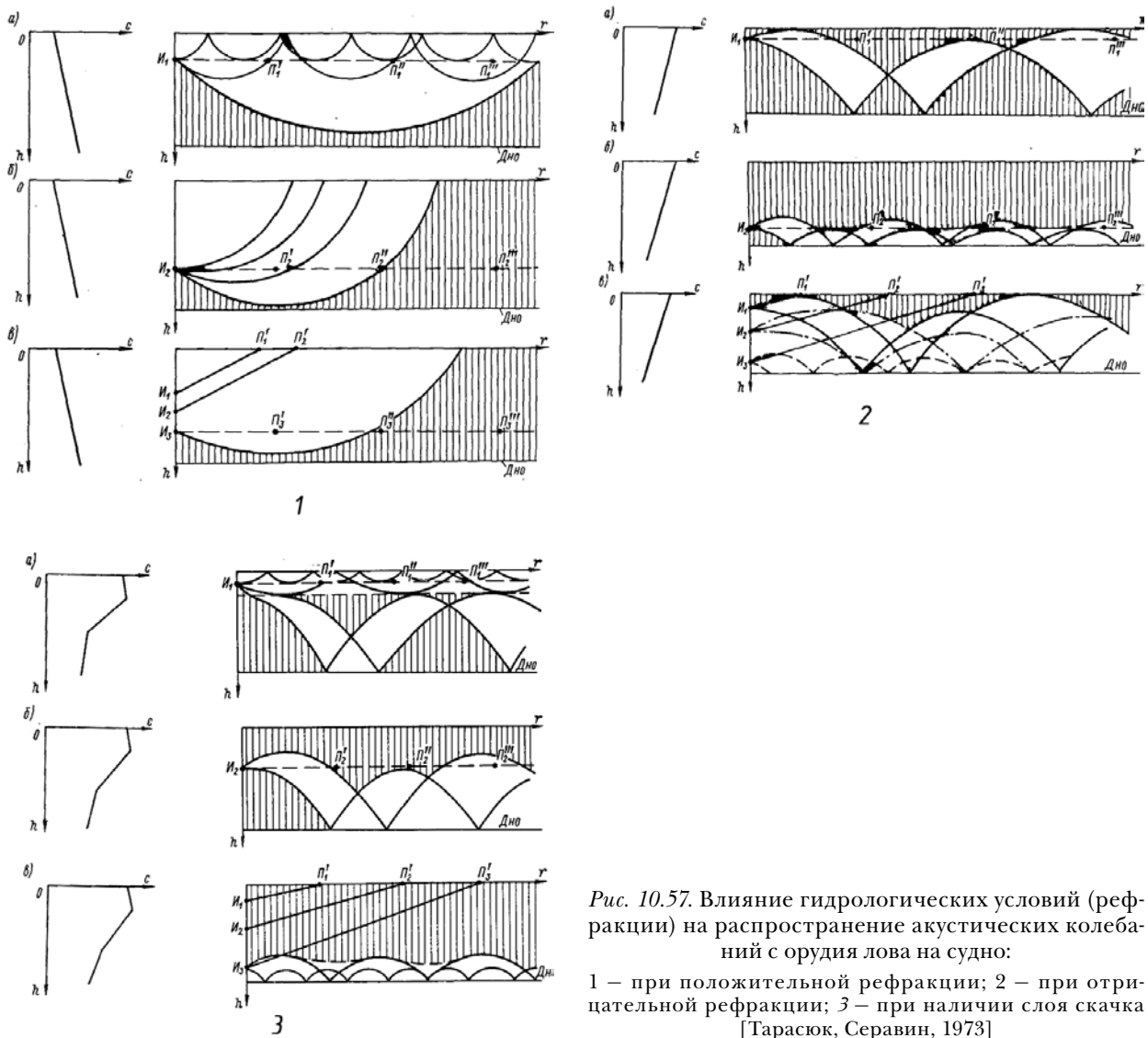


Рис. 10.57. Влияние гидрологических условий (рефракции) на распространение акустических колебаний с орудия лова на судно:

1 — при положительной рефракции; 2 — при отрицательной рефракции; 3 — при наличии слоя скачка [Тарасюк, Серавин, 1973]

и том же расстоянии от источника приемник может попадать и в зону тени, и в зону акустической освещенности. Кроме того, из них также видно, что в точку приема может приходиться не один, а несколько рефрагированных и отраженных от поверхности лучей, причем, по мере изменения положения источника звука их число будет изменяться.

Сложные ситуации могут возникать при наличии приповерхностных звуковых каналов, особенно при нахождении источника акустических колебаний ниже оси такого канала. В некоторых районах морей и океанов ось приповерхностного звукового канала может находиться на глубинах 40–100 м.

В современных комбинированных телеметрических приборах контроля характеристик траловых систем предусматривается датчик температуры, по показаниям которого при необходимости можно (зная глубину нахождения трала) построить лучевую картину распространения акустических колебаний с трала на судно (гл. 3) и проверить одну из возможных причин отсутствия или неустойчивого приема данных с трала.

Качественный прием данных с трала на судне при бескабельной линии связи может быть обеспечен с помощью ретрансляторов, устанавливаемых на одном из ваеров.

10.13. ДОПЛЕРОВСКИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ

В рыбохозяйственной деятельности они используются в навигационных целях для определения относительной и абсолютной скорости судна, а также направления и скорости подводных течений. Как было уже показано, расширяется их применение и в рыбохозяйственной телеметрической аппаратуре контроля подводной обстановки в зоне работы траловых орудий лова. Их работа основана на использовании доплеровского эффекта. Принцип действия указанных систем состоит в излучении и приеме импульсных акустических колебаний в четырех или трех направлениях под некоторыми углами относительно горизонтальной плоскости и постоянным углом наклона. В работе Зедел-Кир-Расина [2009] приведена схема геометрии характеристик направленности (ХН) типичной доплеровской гидроакустической системы с 4-мя ХН, излучающими акустические импульсы под углами 0, 90, 180 и 270° в горизонтальной плоскости и под углом 70° вниз, показана на рис. 10.59. При трех ХН излучение и прием акустических колебаний происходит под углами относительно горизонтальной плоскости через 120°.

Аппаратура излучает в воду акустические импульсы с известной рабочей частотой их заполнения. Звук, рассеянный обратно в направлении излучателя, будет иметь сдвиг частоты вследствие влияния эффекта Доплера (если рассеивающие объекты перемещаются относительно источника излучения). Разность частоты между излученными акустическими колебаниями и отраженными далее используется для определения скорости. Часто рассеивателем звука является зоопланктон, который достаточно пассивно перемещается, так что измеренные скорости можно вполне обоснованно связать с подводными течениями.

Однако при наличии одной ХН невозможно определить вектор скорости объекта. Необходимо иметь несколько ХН для определения трех составляющих вектора скорости. В типичной схеме доплеровской системы данные от различных ХН комбинируются для получения оценки вектора скорости относительно акустической системы. Например, для системы с четырьмя ХН, с направлениями излучения и приема как показано на рис. 10.58 [Зедел-Кир-Расин, 2009], ориентация характеристик относительно антенны, может быть определена как:

$$\begin{aligned} b_1 &= (0, \sin 20, -\cos 20), \\ b_2 &= (\sin 20, 0, -\cos 20), \\ b_3 &= (0, -\sin 20, -\cos 20), \\ b_4 &= (-\sin 20, 0, -\cos 20), \end{aligned}$$

где b_1, b_2, b_3 и b_4 относятся к ХН 1, 2, 3 и 4, соответственно. Каждая ХН обеспечивает измерение одной компоненты скорости относительно излучателя как:

$$v_{bi} = b_i V,$$

где V – скорость воды и $i = 1, 2, 3$ и 4 – номера ХН. Эти измерения комбинируются для определения вектора скорости воды относительно акустического излучателя как:

$$V_x = \{(v_{b2} - v_{b4}) / (2 \sin 20),$$

$$(v_{b1} - v_{b3}) / (2 \sin 20) (v_{b1} + v_{b2} + v_{b3} + v_{b4}) / (4 \cos 20)\}.$$

Во всех таких доплеровских системах выполняется определенное усреднение данных для уменьшения вариабельности определения. Это осуществляется посредством последова-

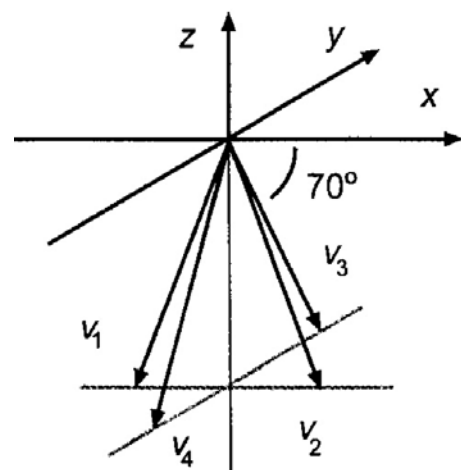


Рис. 10.58. Схема ориентации характеристик направленности типичной доплеровской гидроакустической аппаратуры активной импульсной локации

тельного излучения серий акустических импульсов и использования средних значений их измерений.

При отражении звука от слоев неоднородностей в водной среде они позволяют измерять относительную скорость судна, а при отражении от донного грунта — абсолютную скорость. Соответственно, возможные пределы измерения абсолютной скорости (как и относительной) определяются дальностью действия системы, т. е. зависят от частоты излучаемых колебаний и излучаемой мощности. В рыбохозяйственных исследованиях они также используются для определения распределения и перемещения рыбных концентраций, количественной оценки зоопланктона и др. [Zhou et al., 1974, 2003; Zedel L and Cyr-Racine F-Y., 2008, 2009].

10.14. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ДНА

Аппаратура акустического определения характеристик и параметров дна в целом ряде ситуаций является также существенным элементом дистанционного контроля и мониторинга гидробионтов. При этом следует учитывать, что полное понимание взаимодействия звука с морским дном является непростой задачей, т. к. имеется много разнообразия как в его физической структуре, так и в биологических сообществах, которые обитают у дна и вблизи него. Следует также учитывать, что морское дно не является статичным. Многочисленные динамические процессы постоянно имеют место в зоне поверхность дна — вода и в пределах объема составляющих дна. Временные масштабы таких процессов весьма различны, от геологических периодов до секунд. Эти процессы определяют степень рассеяния звука в толще водной среды, его проникновения в донные слои и обратного возврата в водную среду.

Представляющая интерес для рыбохозяйственной гидроакустики зона необходимой акустической классификации морского дна (АКД) может быть охарактеризована как простирающаяся примерно от 1 м ниже границы дна до одного или более метров над его поверхностью, т. е. включающая и биологические составляющие и структуры, непосредственно связанные с дном. Таким образом, результаты АКД относятся к очертаниям дна и его геологической структуре, а также к морским организмам, обитающим вблизи дна и на дне. Они могут быть полезными и при изучении взаимоотношений между пелагическими и донными обитателями [Рейд, 2000]. Таким образом, акустическая классификация дна является важным средством оценки биотических и абиотических характеристик морского дна, необходимых для оценки среды обитания морских организмов. Темпы деградации мест обитания в морских экосистемах в настоящее время становятся угрожающими, поэтому сохранение морского биологического разнообразия является крайне важной задачей. Деятельность человека прямо или косвенно теперь является основной причиной изменений в морском биоразнообразии, особенно в прибрежных районах. Поэтому важной задачей для сохранения имеющегося биоразнообразия, в первую очередь, является предотвращение изменений или деградации мест обитания.

Рыбаки в связи с настоятельной производственной необходимостью, пожалуй, были первыми или, во всяком случае, одними из первых, кто стал использовать показания своей рыбопоисковой аппаратуры для оценки характеристик и особенностей морских грунтов. В первую очередь, это было обусловлено стремлением избежать возможных повреждений и даже потерь их орудий рыболовства на так называемых «жестких» грунтах. Следует различать акустическое распознавание характера дна и акустическую классификацию дна. Первая задача — распознавание может решаться более простыми средствами и предназначено для использования непосредственно на рыболовных судах для решения чисто промысловых задач. Вторая — классификация служит для более широкого рыбохозяйственного применения.

Скорее опытным путем было установлено, что при прочих равных или близких условиях продолжительность «хвостов» «донного» эха соотносится с жесткостью или

твердостью донного грунта, а также что повторное эхо от дна определенным образом связано с характером лоцируемого грунта и меньше подвержено нежелательным вариациям при волнении моря. Получение вначале черно-белых и далее цветных эхограмм облегчило и расширило возможности такой визуальной оценки. Стало возможным определение связей потенциальных мест обитания промысловых биологических объектов, в частности, донных рыб, ракообразных (большой частью не обнаруживаемых аппаратурой активной гидролокации) с характеристиками дна моря [Кудрявцев, 2004; ИКЕС, 2007].

В 80-х гг. был разработан первый специальный процессор для распознавания дна [Burns et al., 1985 a, 1985 б; Chivers et al., 1990], подключаемый к обычной рыбопоисковой аппаратуре вертикальной локации. Один из входов процессора соединялся с выходом блока запуска генератора эхолокатора, на второй вход поступали принимаемые эхосигналы после усиления и ВАРУ. Динамический диапазон его составлял 30 дБ. Для получения информации о характере грунта в процессоре была предусмотрена стробирующая схема, запускаемая по эхосигналу от дна и вырабатывающая строб длительностью 35 м/с (определенный по результатам экспериментов). Более твердые структуры имеют и большую вероятность быть более неровными в морских условиях. Поэтому для работы при волнении предусматривался альтернативный режим работы, заключающийся в стробировании повторного эха. Огибающие эхосигналов усреднялись, по меньшей мере, по 10 циклам лоцирования и интегрировались. Интегрированию огибающих было отдано предпочтение перед интегрированием их квадрата для достижения более широкого диапазона измерения. Выход схемы интегрирования соединялся со стрелочным индикатором. В то время, как стробирование и интегрирование второго эхосигнала оказывается эффективным показателем общей твердости грунта (относящимся к обеспечению сохранности орудия лова), также имеют место ситуации, когда ценным является более чувствительный показатель «мягкости» верхних слоев морского дна (в аспекте идентификации характеристик поверхности дна, предпочитаемых различными видами объектов промысла).

Различными авторами было выделено порядка 80 параметров для полного описания физических структур морского дна и составляющих его материалов, которые могут характеризовать зону у границы вода-донные отложения и ниже ее. Биологические организмы и их влияние на физические свойства еще больше усложняют ситуацию. Для работы в плохую погоду (при волнении) предусматривался альтернативный режим работы, заключающийся в стробировании второго эха. Огибающие эхосигналов усреднялись, по меньшей мере, по 10 циклам лоцирования и интегрировались. Интегрированию огибающих эха было отдано предпочтение перед интегрированием квадрата для достижения более широкого диапазона измерения.

Положительные результаты практического применения данного процессора (в т. ч. по обеспечению возможности выбора более пригодных участков для тралений даже при твердых грунтах) способствовали дальнейшему развитию указанного направления. Этому в немалой степени способствовало бурное развитие в последние десятилетия компьютерных техники и технологий, что ускорило как совершенствование акустических классификаторов дна, так и непосредственно самого направления. В настоящее время достаточно широко используются в рыбном хозяйстве две акустические системы распознавания и классификации морского дна: ROXAnn фирмы Marine Microsystems Ltd. of Aberdeen, Scotland и QTC VIEW фирмы Quester Tangent of British Columbia, Canada. Обе системы выполнены в качестве дополнения к существующей и уже установленной на судне эхолокационной аппаратуре.

Система RoxAnn фирмы Marine Micro Systems [Абердин, Шотландия] была первой промышленной аппаратурой АКД [Chivers et al., 1990]. Она [Burns et al., 1989] базируется на анализе первого и повторного эхосигналов от дна. В ней используются, как уже указывалось, два показателя, E_1 и E_2 , получаемые посредством аналогового интегрирования «хвостов» первого эхосигнала от дна и всего второго донного эхосигнала. Они

служат основой для определения признаков акустического определения характера дна и отображения результатов оценки на двухмерном планшете.

Система QTC VIEW, разработанная Quester Tangent Corporation (Сидней ВС, Канада) [Collins et al., 1996], также подключается к эхолоту с одной характеристикой направленности. QTC VIEW использует цифровую технологию для выделения характеристик и особенностей лишь первого донного эха в пределах строба — «окна», окружающего этот эхосигнал, т. е. эхосигналы оцифровываются и затем анализируются с использованием комплекса алгоритмов, которые выделяют из каждого эха 166 характеристик [Collins and McConnaughey, 1998] и признаков. Некоторые из характеристик базируются на огибающей эхосигналов, другие — на спектральных особенностях. Амплитуда и форма акустического сигнала, отраженного от дна, определяется, в основном, неровностями донного грунта, разностью плотности между водой и донной поверхностью, а также реверберацией звука в поверхностных слоях дна. Применяется компонентный анализ (РСА) для группирования полученной информации до трех Q-значений, представляющих линейные комбинации характеристик, наиболее полезных для различения типов донного грунта. Точки, определенные триадами Q координат и представляющие отношения Q1, Q2 и Q3, отображаются в трехмерном пространстве для визуальной инспекции формируемых групп. Участки дна с подобными акустическими откликами образуют определенные группы-кластеры, эхосигналы классифицируются с использованием их положения в Q-пространстве относительно кластеров, создаваемых на основании данных калибровки. Распределение по классам базируется на мультивариантных расстояниях между Q-значениями классифицируемых показаний и кластерами, представляющими акустические свойства выбранных типов морских донных грунтов. Чтобы отнести классы дна, основанные на акустических различиях, к интересующим пользователя фактическим отличиям, необходимо иметь или получить пригодные образцы донного грунта, т. е. выполнить калибровку акустической системы, а именно, соотнести акустический класс дна с его физическими характеристиками.

Указанные системы АКД подтвердили целесообразность их применения при решении целого ряда конкретных рыбохозяйственных задач. Уже работы с первыми образцами системы RoxAnn [Burns et al., 1989] помогли определять некоторые зоны, благоприятные для обитания крабов. Экспериментальные работы, выполненные с системой QTC, подключенной к научному эхолоту EK500 норвежской фирмы Симрад с частотами 38 и 120 кГц, в восточной части Берингова моря [Collins et al., 1998 а, б], показали важность применения ее в программах донного мониторинга, в т. ч. обосновании охраняемых зон обитания ценных донных видов рыб, ракообразных.

На дополнительные возможности использования двухчастотной акустической донной классификации с системой QTC, подключенной к эхолоту Knudsen 320 М с частотами 38 и 200 кГц, указывается в работе [Galloway et al., 1998]. Ряд морских экспериментальных работ с положительными результатами [Preston et al., 2001] был проведен при подключении системы QTC к многолучевым сонарам, Simrad EM 3000, 1002 (75 кГц) и Reson SeaBat 8101 (240 кГц, 101 луч) в районе о-ва Ванкувер (Канада). Натурные испытания системы QTC показали явную корреляцию между типами дна со значительными популяциями устриц и полученными акустическими классами [Collins W.T. et al., 2004]. Система ROXAnn дала возможность определить влияние донных тралений на донную фауну при комплексных исследованиях в Баренцевом море [Humborstad et al., 2004].

В своей работе [Weber et al., 2013] приводят результаты применения многолучевой гидроакустической системы MS70 фирмы Симрад Консберг (Horten, Норвегия) на НИС Oscar Dyson при съемках по определению непригодных для донных тралений участков на банке Snakehead в зал. Аляска для повышения качества результатов донных траловых съемок при оценке состояния запасов морского окуня (*Sebastes spp.*), который нередко концентрируется вблизи таких участков. Для повышения точности акустической классификации донных субстратов ими использовалось различие в силе обратного дон-

ного акустического рассеяния S_b при нормальном (вертикальном и близком к нему) падении и акустической энергии на дно и наклонном озвучивании.

Несмотря на серьезные успехи в развитии комплексных систем АКД в последние два десятилетия, их применение для решения различных практических задач имеет скорее полуйсследовательский характер, требует от пользователя большого опыта и умения в расшифровке получаемой информации для достижения качественных результатов. В определенном отношении это имеет сходство с периодом внедрения гидроакустического метода количественной оценки биоресурсов. Более подробно современное состояние направления АКД изложено в монографии [Кудрявцев, 2013].

10.15. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ ГИДРОБИОНТОВ

Основным назначением указанных систем является обнаружение и определение положения рыб и других водных животных по издаваемым ими звукам и их акустической активности. Основным приемным блоком указанных средств системы являются системы гидрофонов. Хотя использование гидроакустики для поиска и обнаружения практически началось с пассивной акустики еще рыбаками тропических прибрежных районов [Протасов, 1965; Никольский, 1974], в промышленном рыболовстве она пока не нашла применения. Даже «вспышка» исследований по звукам морских животных после Второй мировой войны, позволивших накопить обширные материалы по звукам и звуковой активности гидробионтов [Протасов, 1965], и ряд положительных результатов экспериментальных исследований в реальных морских условиях (по использованию звуков креветок, тунцов и др. для их обнаружения) [Кудрявцев, 1979, 1970, 2005], в практике промыслового метода и средства пассивной гидролокации не применяются из-за ряда присущих указанным методам недостатков. В настоящее время они, в основном, широко используются при исследовательских работах по млекопитающим, хотя иногда применяются и при исследованиях звуковой активности рыб.

Можно сказать, что пассивная акустическая локация была первым, хотя и достаточно примитивным способом дистанционного обнаружения гидробионтов, использовавшимся задолго до появления всех других методов. Он применялся рыбаками Малайского архипелага для нахождения скоплений рыб по их звукам. Из литературы давно известно [Зубов, 1948; Westenberg, 1953; Gopinath, 1953] об оригинальном народном акустическом способе разведки рыб, которым пользуются многие рыбаки, живущие на побережьях Желтого и Китайского морей и Малайского архипелага. В бригаде таких рыбаков обычно имеется рыбак-слухач. Время от времени этот слухач с лодки погружается в воду так, чтобы уши его находились на глубине 30–40 см от поверхности. По звукам рыб такой слухач безошибочно определяет не только вид рыб, из которых состоит скопление, но и то, что делают рыбы – кормятся, движутся или готовятся к икрометанию. Особенно легко обнаруживались нерестящиеся рыбы, издающие в этот период наиболее громкие звуки. Так, китайские рыбаки, по данным Никольского [1963], обнаруживали нерестовые скопления большого желтого окуня *Pseudosciaenops poeyi* (Rich), прослушивая звуки скоплений этих рыб в море при помощи полой бамбуковой трубки, опускаемой в предполагаемых местах скоплений этих рыб. Однако, в общем, это были лишь частные случаи использования пассивной акустической локации.

Существенное развитие она получила после Второй мировой войны в связи с массовым использованием техники шумопеленгования. В тот период была обнаружена способность многих водных организмов (рыб, млекопитающих, ракообразных) издавать звуки. Они оказались столь разнообразными и интенсивными, что создавали помехи гидроакустической аппаратуре, маскировали шумы подводных лодок и даже приводили к взрывам акустических мин. Потребовались данные о спектральном составе звуков, их структуре, интенсивности, звуковом давлении, сезонных и суточных вариациях биошумовых полей, периодов времени их максимального проявления в различных рай-

онах Мирового океана в связи со скоплениями животных. Стало активно развиваться направление биогидроакустика [Протасов, 1965; Кудрявцев, 1970, 1979, 2005].

В 50–60-е гг. XX в. с использованием средств пассивной акустической локации было накоплено много материалов по звукам и звуковой активности рыб, ракообразных и водных млекопитающих. В связи с большим многообразием водных организмов, значительными изменениями их биоакустической активности в зависимости от целого ряда факторов проведенные исследования и эксперименты свидетельствовали о сложности решения задач поиска, обнаружения и определения видового состава скоплений промысловых объектов методами пассивной и активной локации. Кроме того, интенсивность звуков, издаваемых промысловыми рыбами и ракообразными, большей частью достаточно небольшая (низкая), чтобы превысить уровень шумов и помех, создаваемых движущимся судном, на котором установлена локационная аппаратура. Прослушивание и регистрация звуков рыб и ракообразных в морских условиях обычно возможны лишь в дрейфе судна в режиме «тишины», когда выключается большинство судовых механизмов или почти все, а аппаратура питается от аккумуляторных батарей, что, конечно, неприемлемо для промысловых судов.

Это привело к спаду исследований в области использования пассивной акустической локации в промышленном рыболовстве. Указанное, в основном, не относится к водным млекопитающим, которые могут издавать весьма интенсивные звуки, по уровню превышающие шумы судна и принимаемые гидроакустической аппаратурой активной локации при нахождении объектов на значительном расстоянии от приемной антенны (например, звуки некоторых китообразных принимаются уверенно на дистанциях до объекта в несколько километров). Большие помехи работе гидроакустической рыболокационной аппаратуры на судне очень часто создают акустические колебания высокой интенсивности в широком диапазоне частот, излучаемые дельфинами, в чем неоднократно убеждался и автор во время работы с рыбопоисковыми гидролокаторами в Атлантике у Африканского побережья.

Для внедрения в промысловое хозяйство метода пассивной локации и индикации (в качестве дополнительного средства поиска и обнаружения промысловых объектов) требуется совершенствование систем обработки принимаемых данных. В этом отношении можно отметить результаты исследований по применению метода нейронных сетей, к примеру, при обнаружении крабов [Алифанов и др., 2009]. В работе Шатравина и др. [2011] представляются результаты исследований по распознаванию акустических сигналов морских млекопитающих в режиме реального времени также посредством использования нейронных сетей. Эффективность использования указанного метода во многом зависит от обоснованного выбора опорных звуковых сигналов конкретных видов животных. Тем не менее, на практике пассивная акустическая локация пока в основном используется при изучении морских млекопитающих. Во многих исследованиях нередко используются лишь один или два гидрофона, не позволяющие локализовать звуки. Часто применяются буксируемые и стационарно устанавливаемые приемные акустические системы для изучения популяций или слежения за животными. В работе [Quick et al., 2008] проводится анализ возможностей четырех-гидрофонного распределенного приемного устройства при изучении поведения бутылконосых дельфинов в естественных условиях обитания. В работе [Rankin et al., 2007] приводятся результаты визуально-акустической съемки по обнаружению китов минке. Пассивная локация для акустической регистрации звуков пятнистых дельфинов, бутылконосых дельфинов и гринд в водах США с целью последующего анализа и определения возможности различия между видами [Wagon et al., 2007]. Ансманн и др. [2007] провели исследование вариаций в характеристиках свистовых звуков короткоклювых дельфинов (*Delphinus delphis*) в двух районах у Британских о-вов.

Верфи и др. [2007] выполнили 3,5-летний мониторинг пространственных и сезонных вариаций относительного обилия морских свиней в немецкой части Балтийского моря с помощью автоматических систем пассивной локации T-POD (Timing Porpoise

Detector), что позволило обосновать необходимость создания охраняемых зон. Левис и др. [2007] в 2003 г. проводили акустические съемки кашалотов с использованием методологии линейных трансект (галсов) в Ионическом море и Сицилийском проливе Средиземного моря. Сировиц и др. [2009] исследовали сезонную и пространственную звуковую активность антарктических блювалов и финвалов. Райман и др. [2009] в зал. Flea (Новая Зеландия) провели испытания возможностей автоматического пассивного акустического обнаружителя T-POD (Timing Porpoise Detector) при обнаружении дельфинов Hector (*Cephalorhynchus hectori*). Бюшан и др. [2010] провели пассивный акустический мониторинг звуковой активности блювалов в южной части побережья Чили. Как указывается в работе канадских и английских ученых [Schulz et al., 2011], необычное стечение обстоятельств позволило им зарегистрировать вокальные характеристики фотоидентифицированных отдельных особей в пределах одной социальной группы в течение 41 сут. Беликов и др. [2001] использовали систему пассивной акустической локации для изучения возможности отнесения сигналов беломорских белух к той или иной особи, чтобы получить представление о том, как они используют звук для социальных взаимодействий и эхолокации.

Достаточно подробно устройство, работа и методики применения устройств пассивной гидроакустической локации рассмотрены в монографии [Кудрявцев, 2013].

10.16. БИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Указанные системы связаны с применением акустических меток и в связи со специфичностью их устройств, методов и методик их использования могут быть отнесены к отдельной группе средств рыбохозяйственной гидроакустики. В настоящее время они все более широко применяются в самых различных исследовательских работах по изучению распределения, поведения и жизнедеятельности гидробионтов. Гидроакустические метки позволяют контролировать поведение меченого объекта на пространственной и временной шкалах после момента выпуска и применяются как в пресной, так и морской водной среде.

Водная биотелеметрия применяется в самых различных рыбохозяйственных исследованиях, в т. ч. при изучении распределения объектов, закономерностей перемещения особей на биотопах, реакций на естественные и искусственные раздражители, взаимосвязи со средой и поведения, миграций и ориентационных способностей рыб, их физиологии, поведения в местах обитания. Биотелеметрическое обнаружение рыбных скоплений основано на том, что оснащенные электронными метками рыбы, группируясь в определенные периоды жизнедеятельности с другими особями своего вида, являются индикаторами местонахождения скоплений этих рыб в определенных зонах их общего района обитания. Это может использоваться при уточнении зон нереста рыб, а также в промысловых целях. Еще в 70-е гг. подводная биотелеметрия использовалась при решении рыбохозяйственных задач. Так, акустические метки были успешно применены для обнаружения зимовальных скоплений сазана в оз. Мендота (США, штат Висконсин) с целью их эффективного облова [Саранчов, 1988]. Используются большей частью излучающие метки и метки приемоответчики. В практике подводной биотелеметрии в настоящее время используют три метода оснащения рыб передатчиками: наружное крепление к туловищу или плавнику; введение передатчика через пищевод в желудок; хирургическая имплантация метки в брюшную полость.

В работе [Ehrenberg and Steig, 2009] проведен сравнительный анализ характеристик двух методов формирования сигналов акустических меток, их приема и обработки: бинарно-фазового кодирования и кодирования периода повторения излучений, в т. ч. при одинаковых длительностях импульсов и уровне источника, SL. Французские ученые [Acolas et al., 2004] применяли акустические метки с датчиками давления (глубины) для детальной оценки и изучения миграции вверх по течению и репродуктивного поведения сельди (*Allis*) в реке Aulne (Британия, Франция). Кроме способов слежения

за помеченными рыбами с плавучего средства все более широкое распространение получают более крупномасштабные методы, использующие большое количество акустических меток и приемных устройств. Так, в работе [Arai N. et al., 2005] рассматриваются результаты слежения с использованием акустических меток за гигантскими сомами (*Pangasianodon gigas*), эндемиками бассейна р. Меконг (Таиланд). Ежли и Беккоа [2004] использовали акустическую систему автоматического слежения для оценки присутствия и отсутствия индивидуальных особей окуня в пределах морского заповедника (*Pargus auratus*) в северной части прибрежной зоны Новой Зеландии с использованием системы из семи ненаправленных гидрофонов VR2 фирмы Vemco. Акустические ультразвуковые метки использовались при исследованиях поведения и контроля присутствия находящегося под угрозой исчезновения европейского осетра в южной части атлантического побережья Франции в 1999 г. [Lepage et al., 2005]. Длительность работы метки была 225 сут. Бернардез и др. [2005] использовали акустические метки при исследованиях крабов. 12 молодых (с длиной карапакса между 84 и 135,5 мм) и 12 взрослых (с длиной карапакса между 112 и 173 мм) крабов были снабжены излучающими метками. Первые имели массу 2,5 г в воде и размеры 28 × 9,5 мм, длительность работы батарей 60 дней и рабочую частоту 69 или 76,8 кГц. При идеальных океанографических условиях излучатели могли обнаруживаться с расстояний вплоть до 500 м. Излучатели, использовавшиеся для мечения взрослых крабов, имели массу 8 г в воде и их размеры были 67 × 18 мм, длительность работы батарей порядка 7 мес. и частоту излучения 75 кГц. Они могли обнаруживаться с расстояний вплоть до 3000 м (при идеальных условиях). Карр и др. [2005] с помощью акустических меток изучали миграции атлантического лосося, а [Picciu-lin et al., 2005] – при слежениях за омарами.

Миниатюрные акустические метки были применены при слежении за небольшими рыбами в озере (окунь и плотва) [Russel et al., 2005]. Метки фирмы Vemco V8Sc имели следующие размеры – 20 мм длина, 9 мм диаметр и масса в воздухе 2,3 г. Для приема сигналов меток использовалась система слежения высокой разрешающей способности «VRAP» фирмы Vemco (Канада), состоящая из трех акустических буев с блоками запоминания данных, установленных на противоположных краях озера. Акустические метки использовались в Норвегии для оценки распределения лососей, ускользнувших из садков рыбоводных ферм [Skilbrei et al., 2010]. Хонда и др. [2010] в летние австралийские периоды 2002–2003 и 2006–2007 гг. применяли гидроакустические метки для изучения распределения молодежи южных синеперых тунцов (*Thunnus maccoyii*) в зоне континентального шельфа юго-западного побережья Австралии. Метка хирургическим путем имплантировалась в брюшную полость рыбы, после чего она сразу же выпускалась. Длина меченых рыб находилась в пределах от 41 до 92 см. В общем 20–70 приемников устанавливались вдоль одной до трех поперечных трасс прибрежной зоны и в трех определенных топографических подъемах недалеко от берега. От 59 до 84 таких рыб было помечено и выпущено в каждом году. После нескольких месяцев приемники выбирались и запомненные данные считывались. Расстояние между приемниками в трассах составляло примерно 1,5 км.

Донеу и др. [2010] использовали акустическую телеметрию для изучения влияния окружающих условий на нерестующие агрегации кальмара *chukka*. Были проведены четыре серии экспериментов с акустическими метками, имеющими индивидуальные коды излучаемых сигналов. Устанавливались три характеристики поведения:

- а) прибытие в место нереста на рассвете и уход в сумерки;
- б) постоянное присутствие в течение нескольких суток;

в) присутствие, прерываемое частыми, но короткими периодами отсутствия. Всего на 45 кальмарах (на 25 самцах и 20 самках) были установлены излучатели V9P-6L-S256 (длиной 38 мм и диаметром 9 мм) и они были выпущены в зоне приемников. Акустические метки с датчиками давления (глубины) использовались в 2004–2006 гг., обеспечивая дополнительно получение информации о глубине нахождения кальмаров.

Акустическая телеметрия использовалась для изучения стратегий поведения атлантической трески во время миграций пост-смолтов атлантического лосося в пределах норвежского фьорда Egesfjord [Hedger et al., 2011]. Всего было снабжено акустическими метками 38 экз. трески, 11 в 2008 г. со средней длиной 661 мм (с диапазоном 450–1090 мм) и массой 3340 г (с диапазоном 1070–14620 г), и 27 в 2009 г. со средней длиной 574 мм (с диапазоном 308–750 мм) и массой 1990 г (с диапазоном 290–4470 г). Хонда и др. [2012] использовали комбинированные методы акустической телеметрии и микрохимического анализа соотношений стронций-кальций в отолитах форели для оценки влияния окружающих условий в японских реках юго-западной части о. Хоккайдо посредством наблюдения характеристик их миграций. Для слежения за помеченными рыбами устанавливалось 6 станций с акустическими приемными системами Vemco VR2, устанавливаемыми вдоль реки на буях. В марте 2011 г. [Nichol and Somerton, 2011] закончился следующий этап мечения крабов опилио для продолжающегося изучения их сезонных миграций в восточной части Берингова моря. Метки обеспечивали регистрацию глубины через односторонние интервалы и температуры через тридцатиминутные интервалы. В апреле 2010 г. на 120 самцах на борту НИС были установлены электронные метки с памятью и крабов выпустили. Дополнительные 157 были помечены на борту промыслового судна и выпущены в марте 2011 г. К времени выхода статьи было поймано промысловиками и возвращено 27 помеченных крабов более чем через 9 мес. после их выпуска.

[Witteveen et al., 2008] использовали гидроакустические и радиометки при исследованиях особенностей питания китов-горбачей (*Megaptera novaeangliae*). Акустические излучающие метки были установлены на 4-х горбачах вблизи о. Кодиак, Аляска. Каждая метка включала акустический излучающий передатчик с датчиками глубины и времени (ATDT) (V22P фирмы Vemco) и УКВ-радиопередатчик (Modus 125, Telonics, Mesa, AZ), а также присоску для соединения с китом. Метки имели массу примерно 360 г, диапазон измерения глубины 0–204 м с разрешающей способностью 1,2 м и диапазон рабочих акустических частот 34–48 кГц. Они выстреливались на свободно плавающих китов с 8,2-метрового исследовательского судна с помощью арбалета. Большая часть работ проводилась в районе площадью примерно 144 км², где постоянно находилась большая группа горбачей (30–50 животных). Дальность приема составляла до 1 км. В периоды времени, когда указанная дистанция была выше или при потере акустических сигналов, помеченный кит прослушивался через прием радиосигналов УКВ- радиопередатчика. Современное состояние работ в рыбном хозяйстве по биотелеметрическим гидроакустическим системам, их устройство, характеристики и возможности, методы использования подробно рассмотрены в монографии [Кудрявцев, 2013].

10.17. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОВЕДЕНИЕМ ГИДРОБИОНТОВ

Большой объем исследований по звукам рыб и других водных животных, их интенсивности, частотным диапазонам, а также звуковой активности, выполненных в 50–70-е гг. прошлого века, а также и в последующие годы, когда был выявлен еще ряд рыб, воспринимающих даже очень высокочастотные акустические колебания, способствовал развитию работ по созданию гидроакустических средств управления поведением гидробионтов. Их разработки проводились в двух направлениях: создание устройств информационного воздействия и энергетического [Трусканов, 1974; Воловова, 1978; Воловова, Шабалин, 1982; Поленюк, 2005; Кузнецов Ю.А., Кузнецов М.Ю., 2007]. Было выпущено некоторое количество устройств гидроакустического управления поведением рыб, которые применялись при кошельковом лове для отпугивания рыб от «ворот» кошелькового невода. Были также получены некоторые положительные результаты их применения при решении рыбохозяйственных задач, в частности, высокочастотных

акустических полей для предотвращения попадания рыбы в турбины гидроэлектростанций. Более детально эти вопросы освещены в монографии [Кудрявцев, 2013].

Поиск и исследование эффективных и экономичных путей и способов влияния на поведение и перемещение рыб и других биологических объектов без непосредственного физического воздействия на них можно отнести к одной из важных проблем современного рыбного хозяйства.

Лов рыбы является технологическим процессом, эффективность которого во многом зависит от качества управления объектом лова. Жизнь гидробионтов протекает в физических полях. Эти физические поля не только являются неотъемлемой частью окружающей гидробионтов среды, но и в силу их информационного характера обычно служат также носителями сигналов ориентации. В связи с этим в ходе эволюции рыб и других водных животных выработались характерные поведенческие реакции на эти поля, что важно при разработке методов и устройств управления их поведением.

Рыбы относятся к низшим позвоночным животным, однако их высшую нервную деятельность нельзя считать примитивной. Для них характерны не только инстинкты (безусловно, рефлекторные реакции), но и сложное поведение, основанное на условных рефлексах. Рыбам свойственно индивидуальное и стайное обучение. В стае рыбы могут обучаться, перенимая «опыт» других рыб. Обучение рыб в стае тесно связано с подражанием, которое представляет собой один из важных элементов, без которых невозможно понять многие особенности поведения рыбы. Результатом подражания является изменение поведения всех или части рыб, если некоторые из них обнаружили опасность или нашли выход из опасной ситуации. Подражание играет существенную роль почти при всех способах лова и для большинства видов рыб (причем, не только стайных), т. к. на последнем этапе лова рыба обычно сконцентрирована, а опасность ситуации способствует повышению значения подражания. Для рыб различных экологических групп характерны некоторые особенности поведения, следующие из их образа жизни, морфологии, механизмов ориентации и т. д. Поведение зависит также от условий внешней среды и обстановочных, ключевых и пусковых раздражителей.

Под управлением любым живым объектом, в т. ч. и водным, понимается воздействие на его поведение путем сообщения ему управляющей информации или уменьшения вредного влияния не управляющей информации. Кроме того, целью управления является создание условий, обеспечивающих необходимое поведение и распределение живых гидробионтов из возможного выбора показателей поведения и распределения. Управление поведением водных животных можно рассматривать как информационный процесс, хотя возможен не только информационный процесс, но и энергетический. Соответственно, возможно управление, основанное на принципе энергетического воздействия, когда биологические эффекты пропорциональны интенсивности раздражителя, и управление при информационном воздействии, при котором биологические эффекты, обусловленные этим воздействием, зависят в основном не от величины энергии, а от количества и качества информации, воспринимаемой объектом. В современных условиях постоянно усиливающегося негативного воздействия человеческой деятельности на окружающую среду обитания живых гидробионтов необходимость использования управления их поведением становится все более важной. Кроме рыболовства, это относится к защите гидробионтов от попадания в различного рода гидротехнические сооружения (использование в рыбозащитных системах), направлению мигрирующих водных животных в рыбопропускные устройства, предотвращению попадания в так называемые заморные зоны, ставшие неблагоприятными для воспроизводства, сокращению попадания и нередкой гибели морских млекопитающих в сетных орудиях лова в погоне за рыбой, морских птиц при тролловом лове, отпугиванию морских млекопитающих от рыб, попавших на крючки при ярусном промысле, особенно в процессе выборки ярусов и др. Проводятся исследования по применению акустического управления поведением рыб при пастбищном рыбоводстве.

Возможны следующие способы управления объектом лова: с использованием задерживающих и направляющих функций физических полей: по принципу наименьшего воздействия на объект лова, путем уменьшения влияния на рыбу вредных посторонних воздействий, путем дезориентации рыбы. Эффективность воздействия физических полей на водные биологические объекты во многом обусловлена их способностью выполнять управляющие функции.

Дистанционному управлению поведением гидробионтов (водных животных), как правило, предшествуют и нередко сопровождают дистанционный мониторинг и контроль, что связывает указанные направления, а также способствует достижению наибольшего эффекта благодаря комбинированному применению этих методов.

В отличие от техники дистанционного мониторинга средства дистанционного управления могут быть отнесены к системам ближнего действия, за исключением, пожалуй, акустических.

Методы управления поведением водных животных с помощью световых, электрических полей достаточно отработаны и широко используются на практике, поэтому в данной работе о них даются лишь общие представления. Того же, в общем, все-таки еще нельзя сказать относительно практического использования акустических полей, хотя они имеют несомненный потенциал.

В отношении использования акустических полей в рыбном хозяйстве пока, пожалуй, практически больше внимания уделяется снижению их отрицательного воздействия на поведение рыб, влияющего на результаты при гидроакустических съемках. В этом отношении значительные усилия предпринимаются для снижения шумов научно-исследовательских рыболовных судов.

РАЗДЕЛ 3.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

Гидроакустическая аппаратура в настоящее время используется практически во всех направлениях рыбохозяйственной деятельности. Первой ее задачей в большинстве случаев является поиск и обнаружение гидробионтов, а также нередко и оценка характеристик дна. Указанная задача в основном выполняется гидроакустическими эхолокационными средствами. В некоторых ситуациях для этого также используется и гидроакустическая техника пассивной локации.

ГЛАВА 11.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ РЫБОЭХОЛОКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ПОИСКЕ РЫБЫ

Возможности и результаты гидроакустического поиска и обнаружения, а также расшифровки и оценки скоплений промысловых объектов в сильной степени зависят от характера распределения гидробионтов. Значительную помощь в проведении поисковых работ с помощью рыбоэхолокационной аппаратуры оказывает знание биологии и поведения рыб, обусловленного биологическим состоянием, кормовой базой, гидрологическими и метеорологическими условиями и изменяющегося в зависимости от времени года и суток даже в одном и том же районе промысла. В связи с этим даже от скоплений рыбы одного и того же вида в разное время года и суток можно получить при постоянных тактико-технических параметрах рыбоэхолокаторов эхограммы различного характера.

В то же время имеются некоторые закономерные зависимости между характером эхограмм, показаний индикаторных устройств рыбоэхолокаторов и биологическими особенностями рыб или косяков рыб. Так, эхосигналы от косяка мелкой рыбы будут более интенсивными, чем от косяка более крупных рыб, так как мелкая рыба образует более плотные косяки, чем крупная; беспузырные рыбы отражают меньшее количество падающей на них акустической энергии, чем пузырные, при одинаковых размерах, поэтому, например, при лоцировании смешанных скоплений ставриды и скумбрии отметки эхосигналов от стаи ставриды могут иметь более высокую интенсивность, чем отметки эхосигналов от стаи скумбрии. Характер показаний и эхограмм зависит также от тактико-технических характеристик аппаратуры.

В связи с тем, что пелагические рыбы в определенные периоды могут находиться у дна, а донные и придонные рыбы подниматься в более верхние слои воды, при поиске в большинстве случаев необходимо вести эхолокационное зондирование одновременно в горизонтальном и вертикальном направлениях. Это позволяет получать более правильную оценку подводной обстановки и наличия промысловых объектов в обследуемом районе.

Наиболее широкое распространение имеют гидроакустические средства поиска активной эхолокации. Они являются обязательным рабочим инструментом практически всех промысловых и научно-исследовательских рыболовных судов. Возможности поиска и обнаружения, а также расшифровки и оценки промысловых скоплений объектов в сильной степени зависят от характера распределения гидробионтов. Поэтому, прежде чем рассматривать тактику гидроакустического поиска, полезно остановиться сначала на общих формах распределения рыб и других водных организмов.

11.1. ФОРМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ И ИХ РЕГИСТРАЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

Распределение морских животных можно систематизировать в пределах видовой группировки, по акватории моря и глубине.

Наблюдения за морскими массовыми организмами с помощью гидроакустических приборов, а также с самолетов и подводных аппаратов показывают, что особи одного вида могут группироваться по-разному. Структура видовой группировки в значительной степени определяется поведением объектов, их биологическим состоянием. Это положение в равной степени относится к различным промысловым рыбам и к нерыбным объектам (креветки, планктон, кальмары, медузы).

Каждый вид может иметь следующие формы распределения: разреженное, стайное, в скоплениях. Под разреженным понимают такое распределение, при котором отдельные особи держатся друг от друга обособленно, не связаны между собой поведением. Разреженное распределение наблюдается у многих массовых рыб сразу же после нереста, когда рыба обессилена и находится в пассивном состоянии. Разреженно промысловые объекты могут держаться и в период питания, если кормовые организмы распределены на большой площади.

Наиболее характерно разреженное распределение для крупных морских животных, а именно трески, пикши, морского окуня, меч-рыбы, китов, тунцов, акул. Подводные наблюдения показывают, что в одиночку обычно держатся такие придонные рыбы, как зубатка, скат, бычки. Значительно реже такое распределение бывает у следующих видов рыб: сельди, хамсы, кильки и других массовых небольших и мелких пелагических рыб.

При стайном или косячном распределении промысловые объекты держатся в виде определенных компактных групп. По мнению Месяцева [1937], косяк рыбы является элементарной формой стада, которое состоит из небольшого количества рыб одного вида и одинакового размера и постоянно по своему составу. Никольский [1974] под понятием «стая» подразумевал группировку взаимно ориентирующихся друг на друга рыб близкого биологического состояния и возраста, объединенных единством поведения. Стайный образ жизни характерен для пелагических рыб, питающихся планктоном. Стайное распределение типично для различных видов сельди, сардины, кильки и других планктоноядных рыб и отмечается на протяжении длительного периода их жизни. У придонных рыб стайное распределение наблюдается редко, хотя некоторые примеры можно привести по результатам гидроакустических наблюдений.

В стаи рыбы собираются во время миграций, а также в период интенсивного откорма. В период нагула размеры стаи в значительной степени зависят от характера распределения и концентрации кормовых организмов. В период миграций величина стай зависит от темпа движения рыб. Как отмечал в свое время Месяцев, при движении стаи рыб принимают обтекаемую форму. Причем во время быстрых миграций размеры стай невелики. Они становятся значительно крупнее в местах отдыха рыб на путях миграций. Значительных размеров достигают стаи во время нерестовых миграций, особенно при подходе к нерестилищам.

Форма и размер стаи могут сильно изменяться под влиянием различных причин [Радаков, 1972]. Наблюдения показывают, что даже за короткий отрезок времени стая может сильно изменить свою форму; нередко происходит дробление крупных стай на более мелкие и т. д. Как показывают многочисленные гидроакустические наблюдения, заметные изменения претерпевает вид стай во время суточных вертикальных миграций. При вечернем подъеме с глубины стаи, как правило, сильно вытягиваются по вертикали. Подобный вид стаи и косяки могут иметь и при опускании от поверхности к дну (рис. 11.1, 11.2).

При кратковременных остановках конфигурация стай может вновь изменить ся: вертикальные размеры сокращаются за счет увеличения горизонтальных. По мере подъема в верхние слои крупные стаи распадаются на более мелкие. На форму стаи влияет даже такой, казалось бы, малосущественный фактор, как рельеф дна.

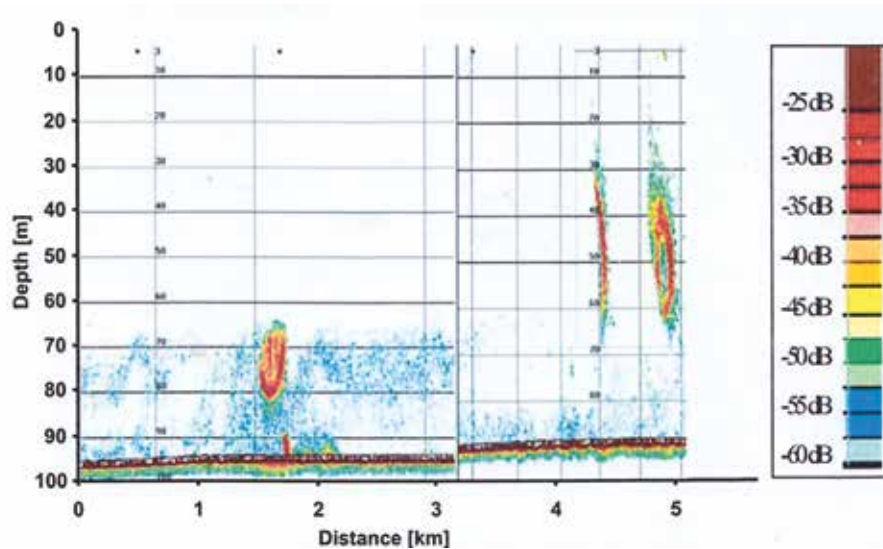


Рис. 11.1. Пример быстрого опускания косяков ставриды в направлении дна (место – $45^{\circ}22' N 02^{\circ}04' W$, частота 38 кГц, время 13.00, скорость хода судна 10,5 уз., средняя длина рыб 26 см – из отчета проекта SIFAMI)

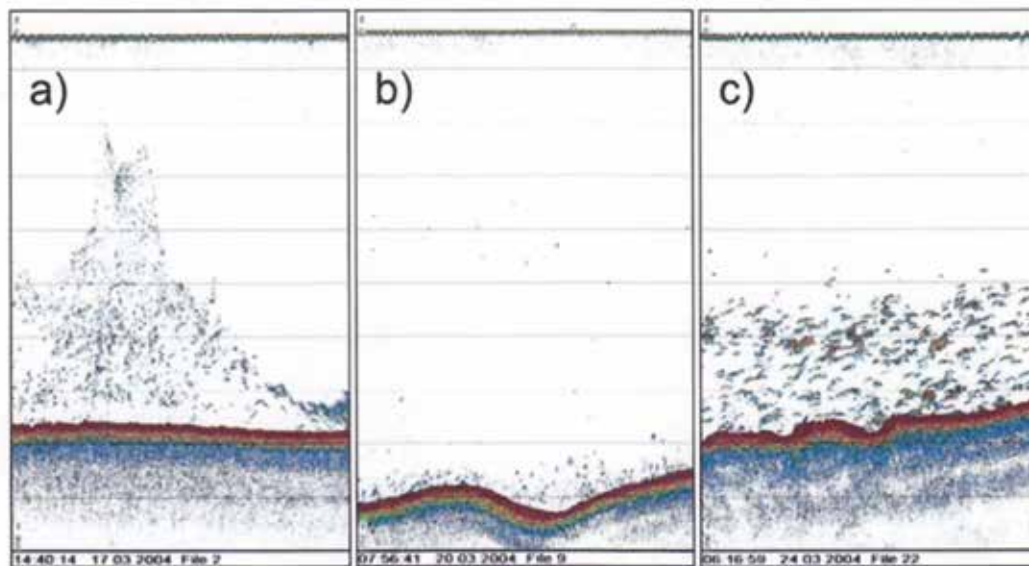


Рис. 11.2. Эхограммы регистрации различных видов рыб (район Лофотенских о-вов, Норвегия): *a* – рассредоточенный косяк сайки над грунтом при глубине дна 180 м; *b* – разреженное скопление норвежского rouit (глубина 225 м; *c* – скопление трески над дном (глубина 180 м)

Наблюдения Г.С. Болстера в Английском канале показали, что стаи сельди имеют четко очерченную форму в тех случаях, когда они расположены над ровным дном. Если стая находится над впадиной или выступом дна, то края ее более расплывчаты. Численность рыб, образующих стаю, может также колебаться в больших пределах. Стаи тресковых рыб обычно состоят из нескольких десятков или сотен особей, тогда как стаи сельди могут насчитывать многие тысячи экземпляров.

Скопление представляет собой объединение стай или разреженных рыб, образующееся в результате разных причин. Нередко стаи настолько близко соприкасаются друг с другом, что это приводит к частичному или полному их перемешиванию. В результате такого смешения стай нарушается единство поведения рыб в скоплении. В этом отношении скопление рыб представляет собой как бы промежуточное звено между разреженным и стайным распределением. Месяцев [1937] считал, что скопление представ-

ляет собой сборище рыб разных размеров и даже разных видов. Он отмечал, что «скопление является временным и изменчивым по составу образованием и состоит из многочисленных косяков разных рыб и размеров».

Как показывают эхолокационные наблюдения, смешивание стай на краях скопления бывает выражено значительно слабее, чем в средней части концентрации. Именно поэтому в зависимости от того, какое распределение рыб преобладает при формировании скопления, на краях его эхолокатор регистрирует стаи или разреженную рыбу. Но бывают случаи, когда смешивания видов не происходит. Наблюдения показали, что баренцевоморская треска в период ее питания мойвой держится на периферии косяков мойвы, не смешиваясь с ней.

Образование скоплений строго приурочено к определенным физико-географическим условиям. Скопление может быть вызвано резкими изменениями условий среды на путях миграций, например, температурными градиентами, завихрениями течений, сосредоточением пищевых организмов в отдельных районах и другими причинами. Скопления наблюдаются в определенных участках моря во время нагула, нереста и зимовки рыб. Форма и размер скоплений бывают самые разнообразные. Это зависит от численности рыб и условий обитания в каждом конкретном районе моря. В одних случаях скопление может быть большим и регистрироваться гидроакустическими приборами в виде узкой ленты на протяжении десятков миль. В других случаях площадь скопления бывает весьма ограниченной, но при этом оно имеет большую вертикальную протяженность.

Распределение по акватории моря. Распределение промысловых объектов в морских районах зависит от гидрологического режима водоема, наличия кормовых ресурсов, физиологического состояния, запасов объектов в водоеме и т. д. В одни периоды рыбы распределены на акватории в тысячи миль, а в другое время тот же вид концентрируется на очень небольшом участке моря. Учитывая указанные особенности, можно выделить два типа распределения по площади: рассредоточенное и локальное.

Под рассредоточенным распределением промысловых объектов понимается такое, при котором они держатся на большой акватории моря. Этот тип распределения особенно часто наблюдается в период нагула рыбы, а также во время нереста при наличии больших нерестовых площадей. Разумеется, необходимым условием распределения организмов на значительной площади является большая их численность.

Локальное распределение имеет место тогда, когда в силу тех или иных причин рыба вынуждена концентрироваться на ограниченных участках моря, являющихся наиболее благоприятными для ее обитания.

При рассредоточенном и локальном распределениях возможны три формы внутривидовых группировок морских организмов: разреженная, стайная или в скоплении (рис. 11.3). В результате имеют место следующие варианты распределений: разреженное распределение, рассредоточенное на большой площади; локальное разреженное; рассредоточенное стайное; локальное стайное; рассредоточенные скопления; локальные скопления.

Разреженное распределение на большой площади характерно для таких придонных рыб, как треска, пикша, морской окунь в период их нагула. Площади, занимаемые в таких случаях треской и окунем, например, в Баренцевом море, а также у Ньюфаундленда и в других местах, составляют тысячи квадратных миль. Иногда так распределяются пелагические рыбы, например, скумбрия, ставрида, сельди и др. Так, в Балтийском море бывают периоды, когда при благоприятном распределении кормовых организмов и соответствующем гидрологическом режиме сельдь держится рассеянно на больших площадях моря.

При разреженном распределении рыбы и другие морские организмы регистрируются гидроакустическими приборами в виде трасс эха от большого количества отдельных особей, На рис. 11.3 показана типичная запись разреженного распределения байкальского омуля на экране дисплея. О разреженности скопления свидетельствует и доста-

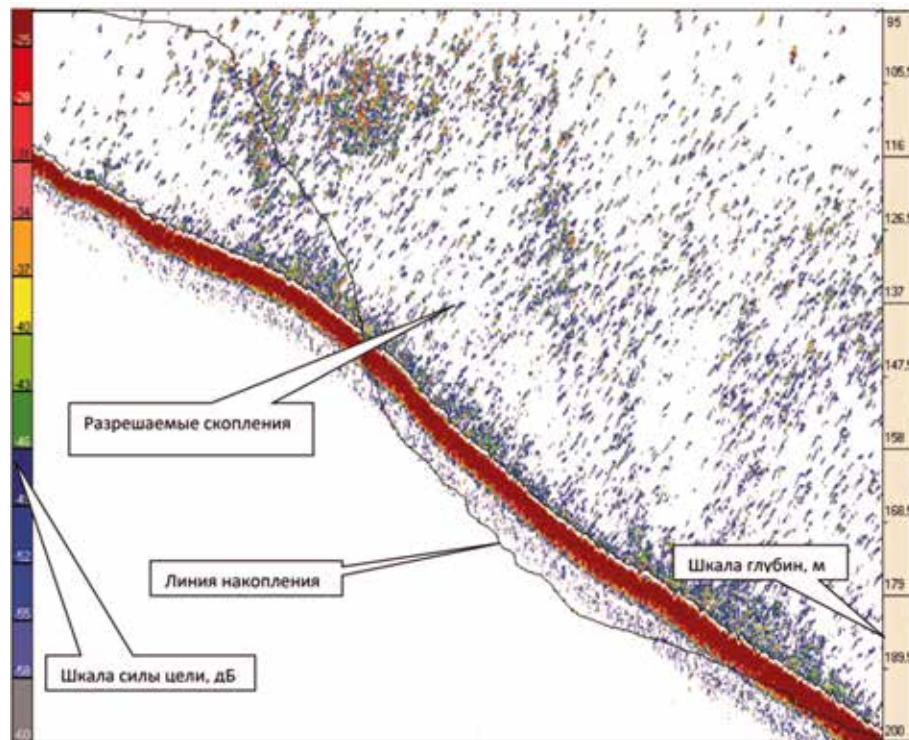


Рис. 11.3. Рассредоточенное скопление байкальского омуля [Кудрявцев, Дегтев, Соколов, 2005]



Рис. 11.4. Формы распределения гидробионтов

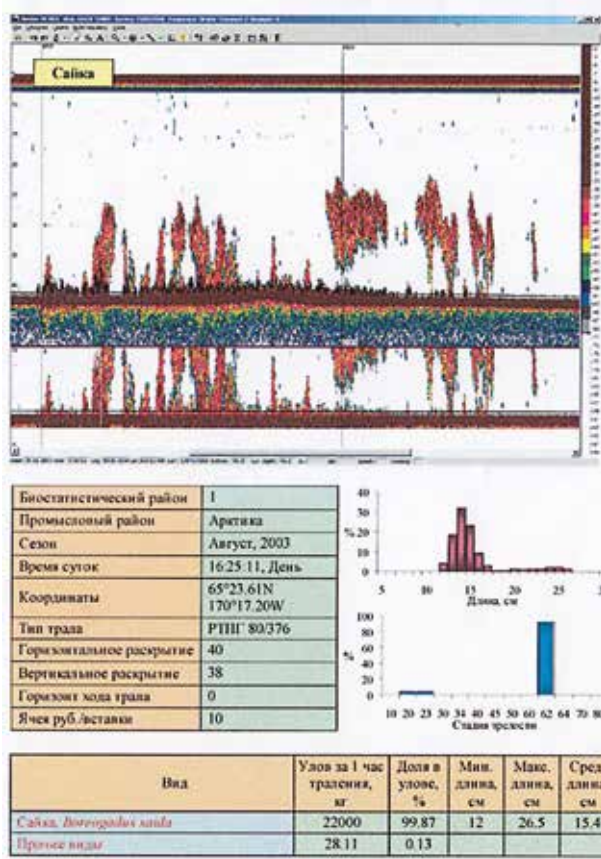
точно плавный характер линии накопления эхоинтегратора. Как видно из рисунка, отдельные рыбы в основном отмечаются достаточно отчетливо и раздельно по толще воды до самого дна.

Разреженное распределение крупных рыб (треска, окунь и др.) может представлять интерес для тралового промысла. Существенные уловы при таком распределении мелкой рыбы можно получить только

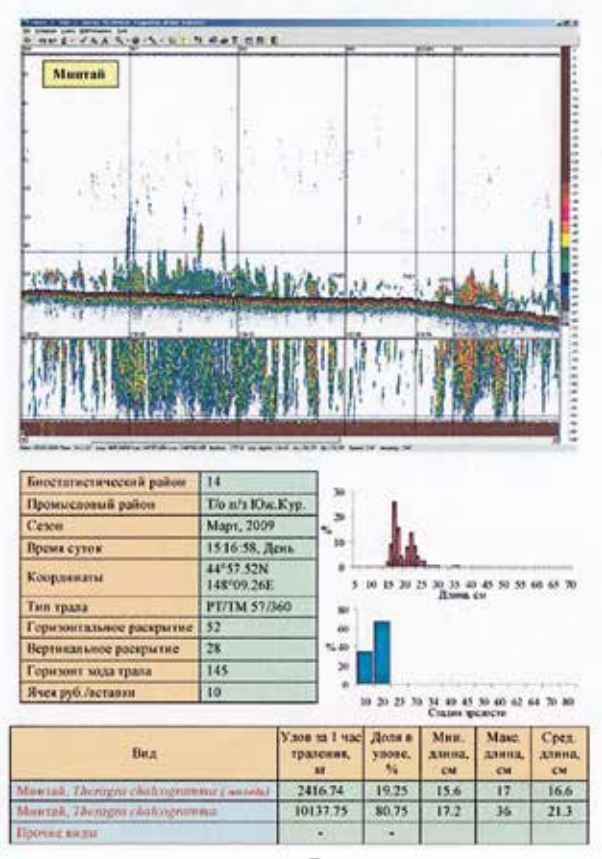
ко дрефтерными сетями или ставными ловушками, устанавливаемыми по течению. Локальное разреженное распределение морских организмов наблюдается довольно редко. Такое распределение бывает только при неблагоприятных условиях обитания и малой численности рыб. Примером локального разреженного распределения рыб может служить распределение трески в Балтийском море в годы, когда из-за неблагоприятного кислородного режима во многих впадинах рыба удерживалась на отдельных небольших участках моря. Такое распределение характерно только для очень крупных животных (киты, акулы и др.).

Стайное рассредоточенное распределение наиболее типично для пелагических морских организмов в период их нагула. В этот период рыба концентрируется в мелкие стаи, распределенные на большой площади (рис. 11.5). Так регистрируется шпрот, сельдь и многие другие рыбы. Аналогичный вид имеют акустические отображения на дисплеях эхосигналов от стай мелких рачков антарктического криля. На рис. 11.5 представлены подобные распределения сайки и минтая [Кузнецов, 2013].

Рыбы одного вида, но разного возраста могут в одном и том же районе и в одно и то же время характеризоваться разным характером распределения. На рис. 11.6 показано рассредоточенное стайное и разреженное распределение сеголеток и 2–3-годовиков минтая.



а



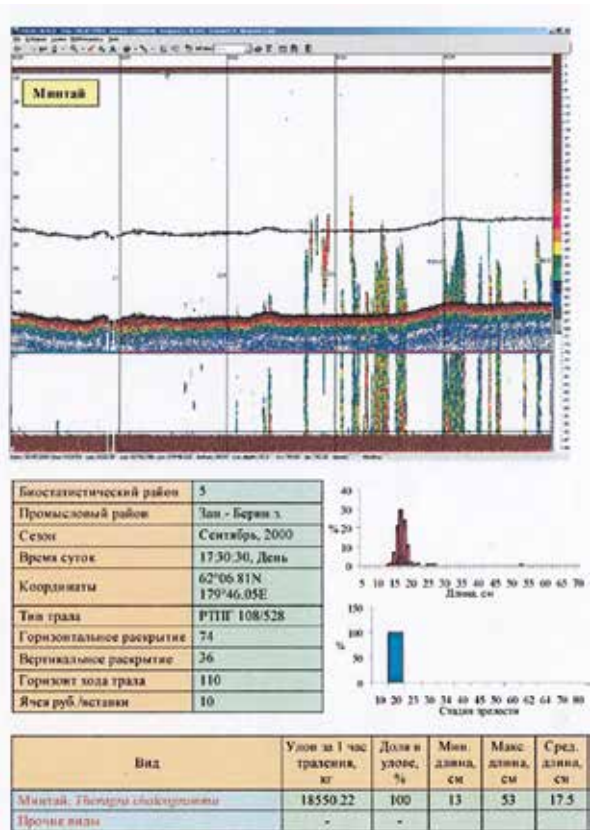
б

Рис. 11.5. Эхограммы стайного рассредоточенного распределения сайки – а (Берингово море, август 2003 г., глубина 43 м); минтая – б (Охотское море, март 2009 г., глубина 55 м), в – (Берингово море, сентябрь 2000 г., глубина 100 м) [Кузнецов, 2013]

Облавливать стайную рыбу тралом сложнее, чем разреженную и в скоплениях. Значительный опыт требуется при облове ходовых стай на путях их миграций, когда рыба, плотно группируясь, чутко реагирует на приближение трала.

Стайное локальное распределение обычно наблюдается на путях движения пелагических рыб, в местах резкого перепада глубин (на свалах), в районах стыка теплых и холодных вод, вблизи областей цветения планктона. В таких местах стаи задерживаются и накапливаются. Такая ситуация бывает во время кормовых, нерестовых и зимовальных миграций. На рис. 11.7 представлен пример локального распределения кластера мойвы в Беринговом море.

Стайное локальное распределение рыб представляет значительный интерес



в

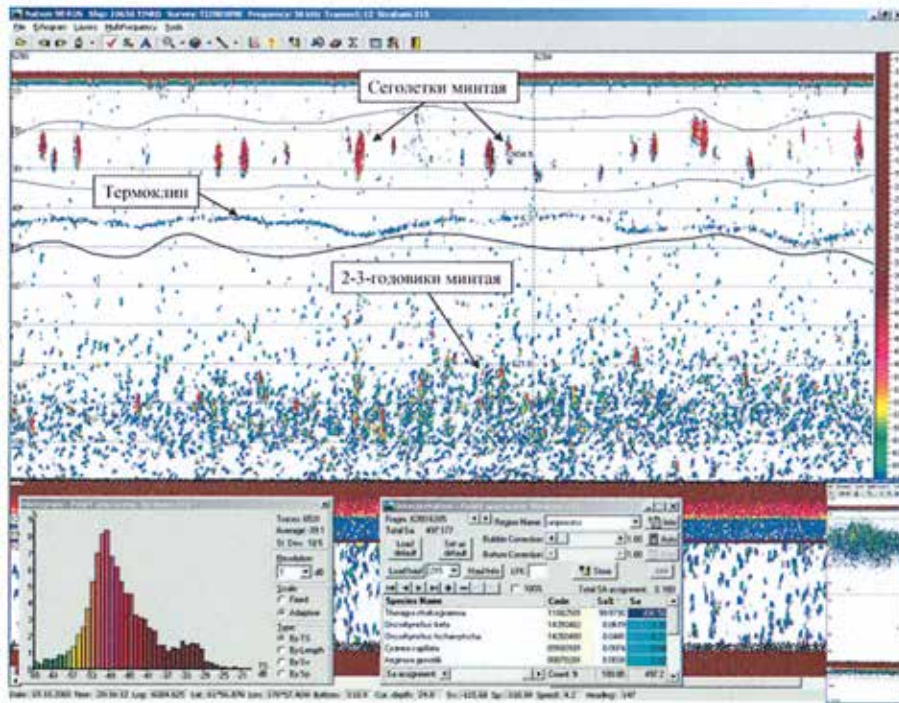


Рис. 11.6. Рассредоточенное стайное распределение сеголеток и 2–3- годовиков минтая (Берингово море, 2003 г., октябрь, широта $61^{\circ}56'$, долгота $176^{\circ}57'$ [Кузнецов, 2013]

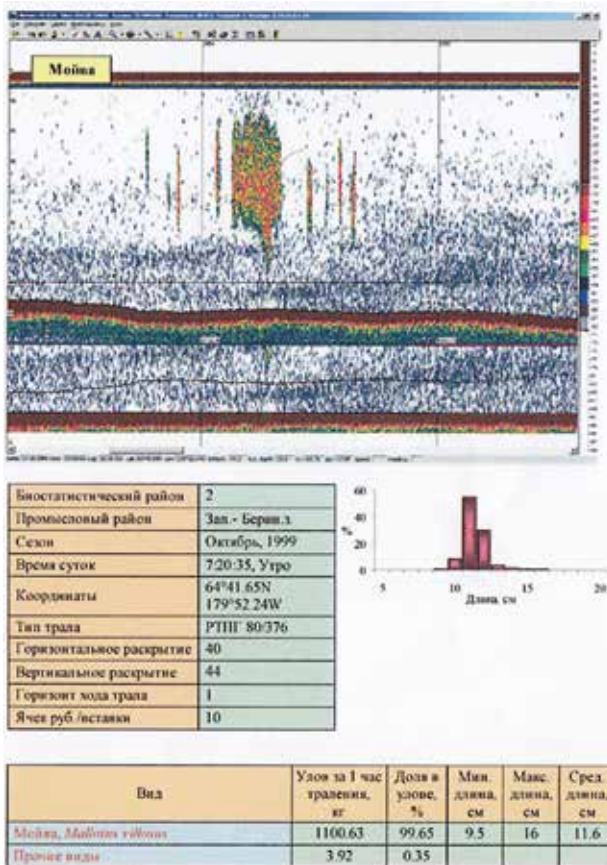


Рис. 11.7. Эхограмма локального скопления мойны (Берингово море, октябрь 1999 г., глубина 45м) [Кузнецов, Убарчук, 2002 (презентация)]

для промысла. Нередко отдельные стаи достигают больших размеров и состоят из десятков и сотен тысяч рыб. Крупные стаи обычно называют косяками. Каждый такой косяк является промысловым объектом для кошелькового или тралового лова. Стаи различных сельдей (североморских, дальневосточных, атлантических) при движении к нерестилищам могут иметь поперечный размер более 100 м, а уловы достигать 50–100 т. Отображения эха от таких стай иногда напоминают вид комет.

Рассредоточенные скопления наблюдаются довольно часто как у пелагических, так и у придонных рыб. Отображения эхосигналов от рассредоточенных скоплений обычно имеют вид длинных полос на определенной глубине (рис. 11.8). Протяженность полос может достигать десятков и более миль. Такое распределение, например, наблюдается у сельди и мерланга в Северном море, у морского окуня в районе Ньюфаундленда, у шпрота в Балтийском море. Рассредоточенные скопления, как правило, не отличаются большой плотностью. Уловы на таких скоплениях устойчивы, но не достигают боль-

ших значений. Рассредоточенные скопления большой мощности в настоящее время почти не встречаются.

Примеры рассредоточенных скоплений сеголеток и взрослого минтая с данными по размерному распределению, стадиям зрелости, характеристикам трала и уловам приведены на рис. 11.8.

Рассредоточенное распределение наиболее характерно для планктона и других мелких морских организмов; оно наблюдается как в прибрежных водах, так и в открытом море во все времена года и регистрируется в виде одного или нескольких слоев. Протяженность скоплений может достигать нескольких сотен миль. Толщина слоев колеблется от нескольких метров до ста и более. Такие скопления принято называть звукорассеивающими слоями (ЗРС).

Звукорассеивающие слои исследовались во многих морях. Их подразделяют на мелководные и глубоководные. Глубоководные рассеивающие слои имеют место обычно над глубинами более 500 м. Даже в таком бедном жизнью море как Саргассово наблюдаются рассеивающие слои, состоящие из скоплений планктона, креветок, кальмаров, различных глубоководных рыбок, которые регистрируются акустическими приборами в виде сплошных полос толщиной до 100 м.

Локальные скопления представляют собой концентрации морских организмов, которые образуются на ограниченных участках моря в местах их остановок во время кормовых, нерестовых и зимовальных миграций. В отличие от стайного локального распределения такие концентрации возникают только при массовых миграциях. Особенно мощные скопления образуются на нерестилищах и на путях к ним.

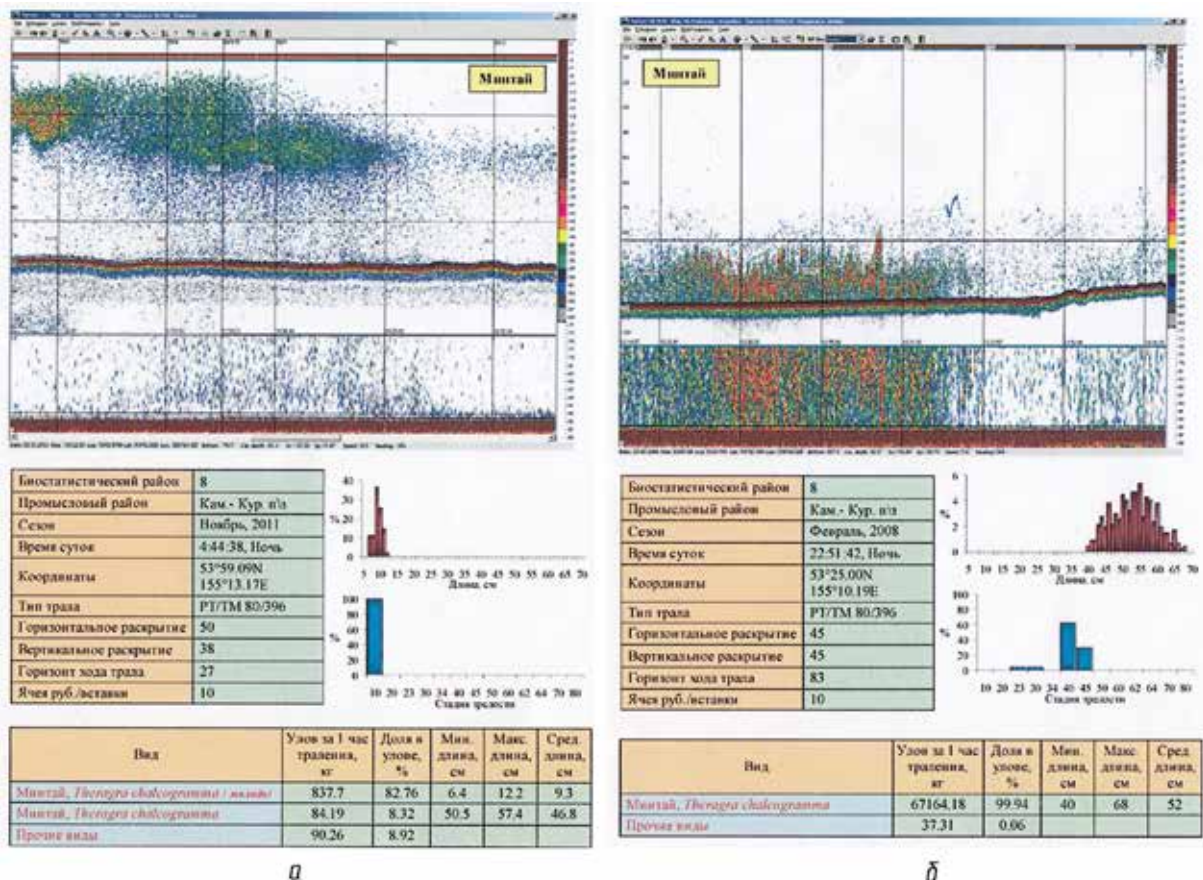


Рис. 11.8. Эхограмма и характеристики облова рассредоточенного скопления сеголеток минтая: а – (Охотское море, ноябрь 2011 г., ночь, глубина 80 м [Кузнецов, 2013] и взрослого минтая с характеристиками размерного распределения, зрелости, улова и др.; б – (Охотское море, февраль 2008 г., ночь, глубина 110 м [Кузнецов, 2013])

Участки, благоприятные для образования концентраций морских организмов, характеризуются стыками течений, определенными гидрологическими и гидрохимическими параметрами. Например, скопления антарктического криля образуются в местах круговоротов и завихрений водных масс при определенном содержании кислорода, кремния и фосфора. Многие рыбы накапливаются в местах подъема дна, температурных градиентов. Наиболее продолжительные остановки рыба делает вблизи нерестилищ на склонах банок и в прибрежных мелководьях. В местах остановок, а также на самих нерестилищах образуются локальные скопления, состоящие из большого количества стай. Локальные скопления образует дальневосточная сельдь на местах ее нереста. Скопления хамсы возникают на границе вод Керченского пролива и Черного моря. Таких примеров, когда рыба концентрируется на небольших участках моря, можно привести много. Локальные скопления имеют место почти во всех водоемах, где есть массовые промысловые рыбы. Способность рыб создавать плотные устойчивые концентрации очень важна для рыболовства. В местах таких скоплений работа промыслового флота особенно эффективна.

Распределение морских организмов по глубине. Наряду с горизонтальными перемещениями морские организмы совершают вертикальные перераспределения в толще океана [Зуссер, 1971]. В зависимости от гидрологических условий, освещенности, от перемешивания водных масс, распределения кормовых организмов промысловые объекты изменяют глубину своего обитания. Глубина распределения на протяжении жизненного цикла может меняться в больших пределах: в одно время объекты держатся во всей толще воды, а в другое время зона их распределения ограничена определенным диапазоном глубин. Замечено также, что крупные особи рыб чаще распределяются на больших глубинах, чем мелкие.

Большое влияние на вертикальные перемещения морских животных оказывают температурные условия моря. Неравномерное распределение температуры по глубине и особенно наличие резких температурных градиентов могут сильно ограничивать зону вертикального распределения объектов, способствовать их концентрации на определенных горизонтах. По этой причине гидроакустические приборы часто регистрируют концентрации в виде одного или нескольких слоев на определенных горизонтах.

Благодаря гидроакустической технике удалось собрать обширный материал по вертикальному распределению морских организмов в разных водоемах. Установлены особенности вертикальных распределений пелагических и придонных рыб в разное время. В частности, гидроакустические приборы позволили выявить значительные вертикальные миграции трески, пикши, морского окуня, т. е. рыб, которых обычно относили к группе придонных. Выяснилось, что эти рыбы наряду с пребыванием у грунта много

времени находятся в промежуточных слоях воды. Даже донные рыбы в некоторых ситуациях могут достаточно далеко отрываться от грунта. Так, в конце 80-х гг. В.В. Кузнецов в районе Камчатки получил эхограммы распределения камбалы довольно далеко от дна (рис. 11.9). Это было подтверждено соответствующими траловыми уловами.

Характерной особенностью суточных вертикальных миграций является быстрый переход одних форм распределения рыб в другие. Стайное распределение переходит в разреженное, разреженное — в скопление и т. д. Например, днем треска может находиться у дна в виде скопления, а ночью, поднявшись в верхние слои воды,

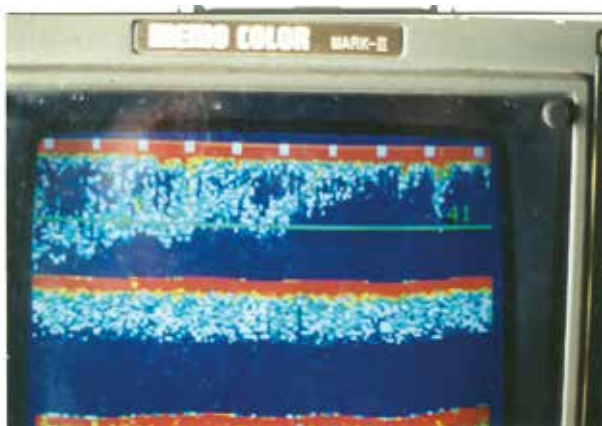


Рис. 11.9. Эхограмма регистрации скопления камбалы в толще воды над дном [Кузнецов, Кузнецова, 1999]

она имеет разреженное распределение. Сельдь в период нагула может держаться дном также в виде скопления, но при вечернем подъеме она группируется в стаи, а затем рассеивается у поверхности. Ночью рыба распределяется в верхних слоях воды довольно равномерно по площади. На рассвете, когда рыбы начинают видеть друг друга, они собираются в стаи. Утреннее опускание на глубину совершается также стайно.

Подобный пример характера суточных вертикальных миграций и поведения концентраций сардины в трех прибрежных районах Португалии, полученных по результатам акустических эхолокационных наблюдений, и их отличия от обычно описываемых для клупеидовых рыб приведены в работе [Zwolinski et al., 2007] (рис. 11.10).

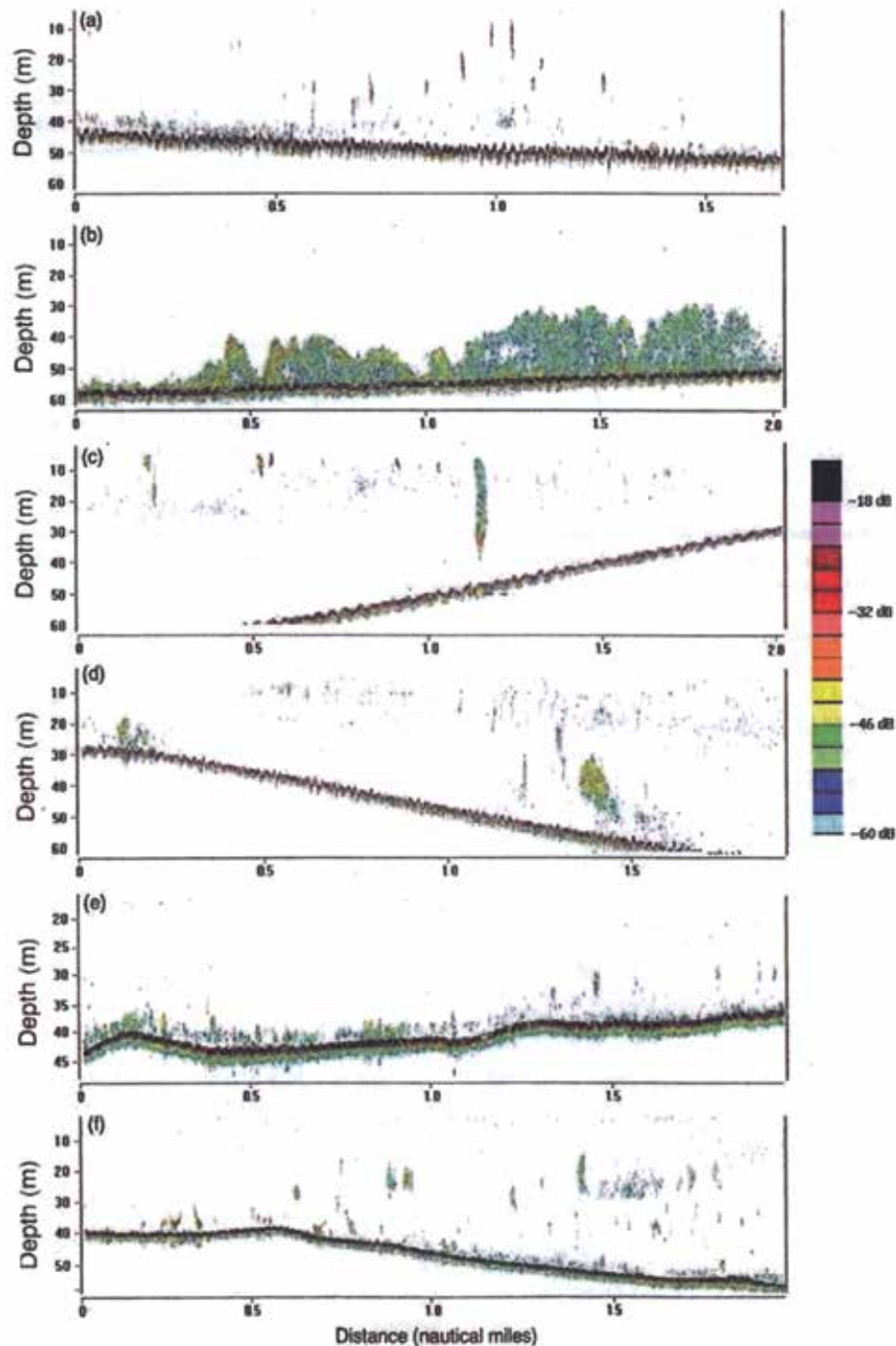


Рис. 11.10. Эхограммы концентраций сардины в различное время суток:

a, b – северный район 07.50 (день), b – 22.40 (ночь); c, d – западный район – 20.35 и 20.51 – изменение формы скоплений в сумерках; e, f – косяки рыбы у дна перед рассветом 06.00 и после рассвета 08.30

В преднерестовый период сельдь и некоторые другие рыбы ведут себя несколько иначе: при вертикальных миграциях они остаются в скоплениях и их перемещения происходят медленно. Вообще, как показывают эхолокационные наблюдения на разных водоемах, наибольшее разнообразие форм распределения рыб имеет место в период нагула, а наименьшее — во время нереста.

При наличии смешанных концентраций рыб вследствие различного характера вертикальных миграций каждого вида и отдельных популяций их распределение во время вертикальных перемещений происходит по-разному. Например, в работе [Юданов, 1992] отмечалась сложная картина вертикальных миграций североморской сельди в отдельные периоды. Так, иногда вечером одновременно с медленным перемещением скопления сельди в толщу воды наблюдался стайный ее подъем к поверхности. Аналогичное явление наблюдалось и во время утреннего опускания сельди. Такие смешанные вертикальные миграции сельди происходили в результате того, что в одном районе собирались различные популяции сельди с разным физиологическим состоянием.

Как известно, суточные вертикальные миграции рыб и других морских объектов связаны со сменой темного и светлого времени суток. Например, распределение большинства пелагических планктоноядных рыб в толще воды в значительной степени зависит от освещенности [Зуссер, 1971]. Рыба, опустившаяся с восходом солнца на глубину, в пасмурную погоду вновь поднимается в верхние слои. Даже ночью рыба держится неодинаково: при свете луны она рассеивается в большей степени, чем в темные ночи.

Рассеивающие слои непромысловых объектов также имеют резко выраженные суточные вертикальные миграции. Днем они могут распределяться на глубинах до 500 м, а к вечеру перемещаются в верхние слои воды. Причем характерно, что во время вертикальных миграций нередко наблюдается разделение одной концентрации на несколько слоев. Это указывает на различный видовой и размерный состав таких скоплений. Иногда несколько слоев наблюдаются даже днем. При отсутствии надлежащего опыта гидроакустические показания таких слоев могут быть легко приняты за рыбные.

Изменение освещенности особенно заметно влияет на характер миграции таких рыб, как треска, морской окунь. Морской окунь у о. Ньюфаундленд при ярком солнце прижимается к грунту, а при пасмурной погоде отрывается от дна. Иногда такие перемещения наблюдаются днем в течение нескольких часов и даже в ходе одного траления. Наблюдения за вертикальным распределением баренцевоморской трески и пикши указывают на большие суточные колебания уловов рыбы весной и осенью. Летом и зимой, т. е. когда стоит полярный день или полярная ночь, вертикальных миграций трески и пикши почти не наблюдается, поэтому колебания суточных уловов невелики.

Из изложенного следует, что распределение промысловых объектов существенно влияет на результаты их промысла разными орудиями лова. Однако все виды распределения могут давать промысловые уловы. Следовательно, при всех распределениях промысловых объектов должно обеспечиваться их обнаружение гидроакустическими приборами.

Из-за различного распределения рыбы в водоемах существуют различные требования к рыбопоисковым приборам в отношении поиска рыбы и разрешающей способности. Так, при поиске придонных концентраций рыбы необходима возможно более высокая разрешающая способность, т. е. должны использоваться узкая характеристика направленности акустической антенны и короткие длительности излучаемых импульсов. Наоборот, при поиске пелагических скоплений, особенно когда рыба держится разреженно, для более уверенного обнаружения рыбных показаний на фоне регистрируемых помех целесообразно применять широкие характеристики направленности.

11.2. ПОИСК РЫБЫ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЛОЦИРОВАНИИ

Гидроакустическая аппаратура вертикального действия является основным средством обнаружения при поиске придонных концентраций рыбы и других объектов лова, а также на больших глубинах. Обязательным является их использование

и при (локации) поиске рыбы в толще водной среды. В значительной мере это обусловлено определенной автоматичностью работы таких приборов, т. е. их использование не требует постоянного непосредственного участия оператора-пользователя в процессе поиска и присутствия его у индикаторов и блока управления аппаратуры (как часто приходится при поиске рыбы с помощью гидролокаторов). Однако в случае нахождения плотных скоплений рыбы – косяков в толще воды, особенно при достаточно большом удалении их от грунта и поверхности моря, эффективность поиска при вертикальной локации значительно ниже, чем при горизонтальной. Тем не менее, благодаря возможности накопления и сохранения на экране дисплея акустической информации в течение достаточно длительных промежутков времени аппаратура вертикальной локации остается обязательным рабочим средством как при промысловой работе судна, так и при проведении гидроакустических съемок. В этом случае она используется также для контроля и уточнения средних глубин распределения обнаруживаемых скоплений, их вертикальной и горизонтальной протяженности и т. д.

11.2.1. Особенности регистрации эхосигналов рыболокаторов вертикального действия

При оценке и анализе эхограмм при вертикальной локации должны учитываться значительная разница в вертикальном и горизонтальном масштабах регистрации, большое влияние на горизонтальный масштаб отображения эхосигналов скорости перемещения изображения на экране дисплея и скорости хода судна.

При обычной эксплуатационной скорости судна вертикальный масштаб регистрации во много раз (в 20 раз и более) больше горизонтального, что приводит к искажениям относительных размеров и форм зарегистрированных скоплений рыбы. В связи с этим реальные очертания скоплений сильно отличаются от получаемых изображений их на экране дисплея, часто описываемых пользователями как «кометы», «перья» и др. Эти характеристики изображений, часто используемые для идентификации и классификации показаний, не всегда можно сравнивать, если они получены на различных судах с помощью различных типов эхолокаторов и не оговариваются условия работы. Значительные различия в масштабах регистрации часто вызывают сомнения в оценке реального наклона дна и особенно у неопытных операторов.

При вертикальном лоцировании на устройствах воспроизведения фиксируются эхосигналы не только от отдельных рыб и их скоплений, но и от других объектов и предметов в воде: морского дна, скал, губки, планктона; температурных градиентов и т. д. Эхосигналы, отраженные от нерыбных объектов, могут затруднять расшифровку показаний приборов. Однако иногда они дают полезную для промысла информацию. При поиске донных и придонных скоплений часто важны данные о глубине места и рельефе дна в районе работы судна.

При вертикальной локации верхняя кромка отметок эхосигналов от грунта и верхняя граница изображения эхосигналов от скопления на экране дисплея являются результатами регистрации отраженных сигналов от ближайших к антенне точек дна и рыбы. При неровном дне и особенно широкой характеристике направленности аппаратуры самая близкая точка дна может быть не под судном, а в стороне от него – в зоне крайних лучей ультразвукового пучка, это и обуславливает несоответствие между истинным рельефом дна и отображением эхосигналов от него на эхограмме. При попадании значительных выступов грунта в зону крайних лучей акустического пучка могут появляться слабые отраженные сигналы, отображения которых на экране дисплея аппаратуры очень напоминают изображения эхосигналов от рыбы.

В основном же дополнительные эхосигналы от неровностей дна фиксируются на фоне основных эхосигналов от грунта и ниже их, увеличивается продолжительность донных эхосигналов, что в ряде случаев облегчает оценку характера грунта [Кудрявцев,

1978; Haines, 1969]. Кроме информации о глубине места и рельефе грунта при вертикальной локации получают другие сведения о морском дне (степень ровности грунта и его характере — мягкий или твердый). Эхосигналы от мягкого дна являются более слабыми и на эхограмме имеют вид менее ярких отметок, чем эхосигналы от твердого, скалистого дна. Ширина трассы также зависит от глубины, чувствительности аппаратуры (коэффициента усиления), излучаемой мощности (если она может изменяться), рабочей частоты и других параметров (если они могут изменяться в процессе эксплуатации), поэтому требуются определенный опыт и тренировка в оценке характера грунта по получаемым эхограммам.

Трасса отметок эхосигналов от ровной плоской поверхности дна обычно является более узкой, чем от наклонной или неровной поверхности. Расширение трассы при наклонной или неровной поверхности обусловлено приемом эхосигналов от боковых лучей характеристики направленности и будет большим при работе с широкими характеристиками направленности антенны. В случае песчаного дна верхняя кромка отметок эха регистрируется четко, ширина отметок и трассы небольшая. Еще более четкая и яркая верхняя кромка изображения наблюдается в районах с каменистым плиточным дном. При этом на экране электронного индикатора с амплитудными отметками эхосигнал воспроизводится в виде большого по амплитуде всплеска, широкого и ровного в верхней части и быстро сужающегося книзу. При лоцировании илистых грунтов эхотрассы от них будут более широкими вследствие большего проникновения звука в их толщу. Подобное явление наблюдается и в местах скопления губки, водорослей. В случае неровного дна или илистого грунта амплитуда всплеска на экране индикатора убывает медленно [Логинов, Шишло, 1971].

В связи с тем, что каменистый, песчаный, илистый, плоский или неровный грунты по-разному отражают, рассеивают или поглощают падающую на них акустическую энергию, можно по получаемым эхограммам и показаниям индикации с амплитудными отметками определять характер грунта и его состав, что особенно важно при ведении придонного промысла рыбы и других объектов лова.

Некоторые типы мощных низкочастотных эхолокаторов вертикального действия позволяют получать также отображения слоев донных осадков, что иногда используется для нахождения слоев илистого грунта (к примеру, мест обитания креветки). В данном случае целесообразно использование отдельных регуляторов усиления для регистрации эхосигналов от рыбы и донных эхосигналов.

При работе в мелководных районах обычно регистрируется несколько отражений от дна. При повторном отображении донных отметок изменения трассы эха фиксируются в удвоенном масштабе, поэтому мелкие неровности на эхограмме выглядят крупнее, чем на основном отображении контура грунта. Повторные изображения помогают и при оценке характера дна по разности в интенсивности регистраций основного и последующих отражений.

При наклонном дне зарегистрированная глубина места под килем судна будет меньше фактической. Если установленный диапазон отображения дисплея меньше действительной глубины (может быть при поиске рыбы в случае нахождения ее на небольших отстояниях от поверхности воды или неправильной установке диапазона регистрации), на экране дисплея могут фиксироваться отметки эхосигналов от дна при втором или последующих циклах развертки времени. Это связано с тем, что следующая развертка времени начинается прежде, чем будут приняты эхосигналы от грунта, поэтому они фиксируются во время следующей развертки времени.

Такие изображения «теней» дна часто приводили к неправильным выводам об обнаружении ранее неизвестных мелководных банок или больших концентраций рыбы (при дальнейших исследованиях эти выводы не подтверждались). Подобные «ложные» изображения донных эхосигналов часто появляются и при приеме повторных отражений от грунта. Проверка таких донных эхосигналов может быть проведена, например, переключением дисплея на другой близкий диапазон воспроизведения.

Регистрация аппаратурой при вертикальной локации слоя температурного скачка в ряде случаев может служить источником и полезной для промысла информации. Это связано с тем, что есть пелагические рыбы, которые обитают над слоем скачка, некоторые наиболее часто встречаются в слое скачка, и есть рыбы, обитающие главным образом ниже слоя скачка (на больших глубинах). Таким образом, информация о глубине залегания слоя скачка и его протяженности может использоваться для выбора глубины установки ярусов (например, для лова тунцовых и других рыб) или дрефтерного порядка, определения оптимальной глубины разноглубинного траления, а также принятия решения о целесообразности облова обнаруженного косяка кошельковым неводом с определенной высотой стенки. Так, если слой скачка находится на небольшой глубине, то есть уверенность, что при кошельковании рыба не сможет уйти под невод на большую глубину в более холодную воду. Для многих рыб характерны суточные миграции в направлении как к поверхности, так и к дну, которые ограничиваются наличием слоя резкого температурного скачка, играющего роль естественного барьера. Данные о глубине залегания слоев скачка помогают обнаруживать рыб, скапливающихся в слоях скачка, и особенно в слоях, упирающихся в дно у побережья.

11.2.2. Формирование трасс эхосигналов от отдельных рыб

Вид трасс отметок эхосигналов от отдельных рыб на экранах дисплеев различается в зависимости от типа гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры, т. е. от тактико-технических параметров аппаратуры и условий ее работы (длительности и мощности излучаемых импульсов, рабочей частоты прибора, характеристики направленности приемо-излучающей антенны, расстояния от антенны до объекта, размеров и отражательной способности рыбы, коэффициента усиления приемного тракта, относительной скорости перемещения судна и объекта, масштаба воспроизведения и скорости перемещения изображения по экрану дисплея). При одинаковых или близких параметрах приборов эхотрассы как при вертикальной, так и горизонтальной траверзной локации могут быть практически одинаковы или подобны. Разреженные концентрации для рыбопоисковой техники нередко представляют скопления одиночных рыб.

Если судно неподвижно или находится в дрейфе, эхосигналы от отдельных рыб будут регистрироваться в зависимости от их перемещения в виде непрерывных или продолжительных трасс (рис. 11.11 *a*) [Cushing, 1973; Кудрявцев, 1979]. Длина каждой отметки определяется длительностью излучаемого импульса и вертикальным масштабом отображения. При небольшой скорости судна эти трассы укорачиваются и приобретают серповидную форму (рис. 11.11 *б*), а на высокой скорости сужаются: воспроизводятся в виде обратной буквы V и могут фиксироваться иногда в виде точек и черточек, особенно при узких характеристиках направленности антенны и большой скорости судна, что необходимо учитывать при работе с эхолотами, особенно высокочастотными. Это связано с уменьшением количества эхосигналов, принимаемых от каждого объекта, когда сокращается время его нахождения в зоне действия аппаратуры. Ширина зоны действия аппаратуры (в т. ч. и ширина характеристики направленности антенны) также влияет на вид трасс отметок эхосигналов от отдельных рыб. Чем шире характеристика, тем большую длину будут иметь трассы эхосигналов при прочих равных условиях. Вследствие изменения озвучиваемой зоны при излучении импульса акустических колебаний изменяется и характер отображения отметок эхосигналов от од-

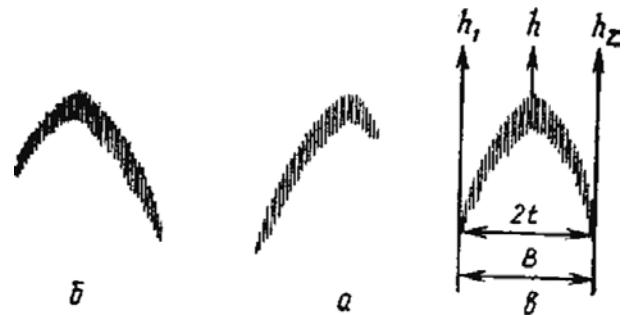


Рис. 11.11. Трассы отметок эхосигналов от движущихся и малоподвижных рыб:

a — уход рыбы из зоны действия эхолотатора; *б* — то же в более глубокие слои воды; *в* — трасса отметок эхосигналов от малоподвижной рыбы

ной и той же рыбы при нахождении ее на различном расстоянии от антенны эхолокатора. На рис. 11.11 *a* видно, что регистрация прерывается у верхней кромки кометообразной трассы или вблизи нее. Такая форма регистраций с большой вероятностью свидетельствует о реакции рыбы на шум судна: рыба быстро покинула зону действия рыболокатора. Изображение, показанное на рис. 11.11 *б*, указывает на движение рыбы в более глубокие слои воды.

Изогнутые трассы или трассы, имеющие вид обратной буквы V, появляющиеся на эхограммах рыбопоисковой аппаратуры при вертикальной локации в случае относительно небольшой скорости судна, а при широких характеристиках направленности даже и в случае хода судна на высоких

скоростях, являются типичными отображениями эха от одиночных рыб, а иногда небольших рыбных стай. Вид таких трасс обусловлен различным расстоянием до рыбы на краях полярной характеристики дальности аппаратуры и в ее центре.

При вертикальной локации снизу вверх с буксируемых акустических антенн или лоцировании в направлении, перпендикулярном направлению движения судна, форма эхотрасс от отдельных рыб и небольших стай и косяков может быть непосредственно подобна латинской букве V. На рис. 11.12 представлена соответствующая эхограмма, полученная на НИС «Geo Sarg» в августе 1994 г. при лоцировании сельди в приповерхностной мелководной зоне (при глубинах до 25 м) Баренцового моря [Misund et al., 1996]. Обнаружение рыбы выполнялось с помощью секторно-сканирующего гидролокатора SA950 в режиме траверсной горизонтальной локации с антенной, развернутой на 90° правого борта, и при ее наклоне -5° (95 кГц, ВАРУ 20 лог).

В случае волнения моря при бортовой и килевой качках из-за вертикальных перемещений судна иногда трудно обнаружить плавное изменение хода таких трасс отметок. Изображения трасс эхосигналов от одиночных рыб в некоторых случаях могут иметь, например, очертания, напоминающие букву M; это свидетельствует о том, что рыба движется внутри характеристики антенны, вероятно, в направлении, совпадающем с курсом судна, изменяя свое положение по глубине. Подобный характер могут иметь трассы эхосигналов и при горизонтальной локации в режиме траверсного обзора. На

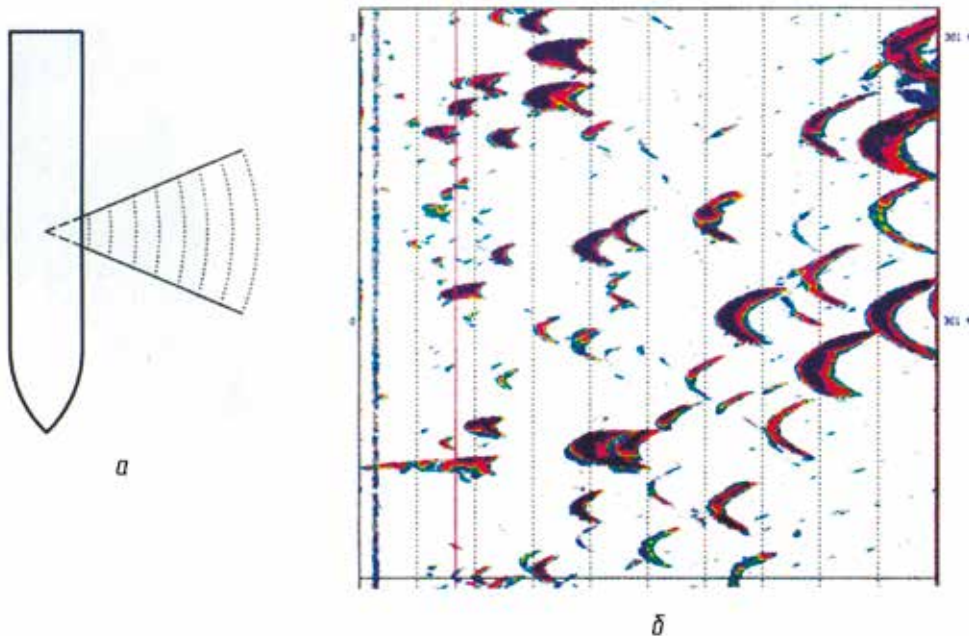


Рис. 11.12. Схема горизонтальной локации в направлении, перпендикулярном диаметральной плоскости судна:

a и *б* – формы эхотрасс от отдельных рыб, стай и небольших косяков при такой эхолокации рыбопоисковым гидролокатором SA950 на дистанции до 300 м

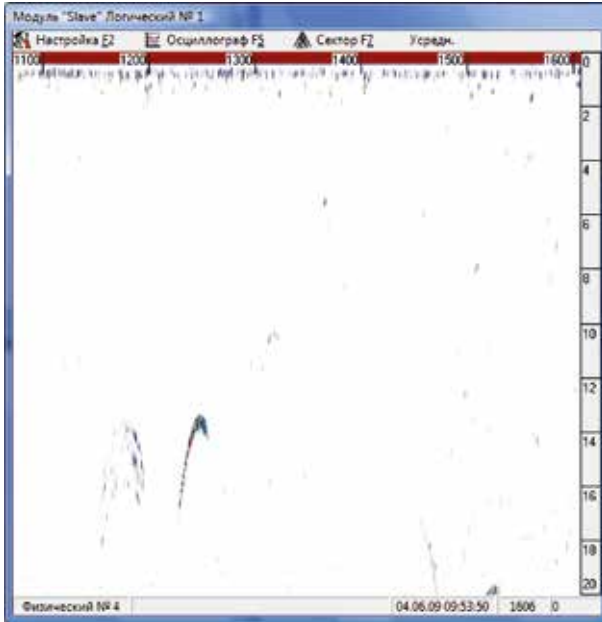


Рис. 11.13. Уход одиночной рыбы из зоны акустического обзора примерно с расстояния от борта около 14 м (мелководная зона Новомичуринского водохранилища, 2012 г.)

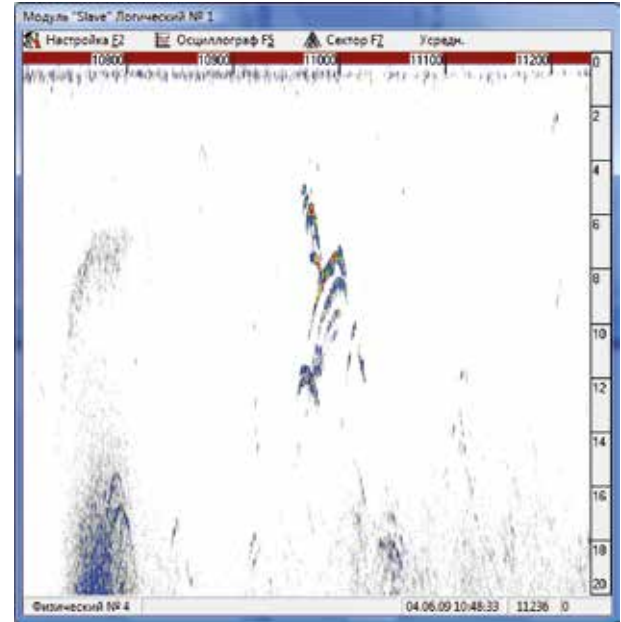


Рис. 11.14. Эхограмма отображения трасс эха от двух стай рыб (в средней части экрана: вверху состоящая из отдельно разрешаемых более мелких рыб и двигающаяся в сторону от борта судна с расстояний примерно 5 м, ниже – из несколько более крупных (Новомичуринское водохранилище, 2012 г.)

рис. 11.13 показана соответствующая эхограмма аппаратуры одновременного секторного обзора при секторе озвучивания в горизонтальной плоскости 60° с эхотрассой одиночной рыбы. В момент обнаружения рыба находилась в правой части сектора обзора. При движении судна она продолжала оставаться в плоскости озвучивания, а затем вышла из зоны акустического наблюдения.

На эхограмме рис. 11.14 показаны трассы эхосигналы от стай отдельно разрешаемых рыб гидроакустической аппаратурой «Панкор», работающей на частоте 455 кГц.

При использовании высокочастотных рыболокаторов с одной узкой характеристикой направленности подобных отображений большей частью не наблюдается, поэтому для контроля и облегчения идентификации и оценки показаний целесообразно включать и низкочастотные приборы или тракты (рис. 11.15). Если при широкой характеристике направленности можно отчетливо видеть трассы эха в виде «галочек» (во всяком случае, начиная с глубины 5,5 м от поверхности воды), то при узкой их уже не наблюдается. Кроме того, существенно уменьшилось

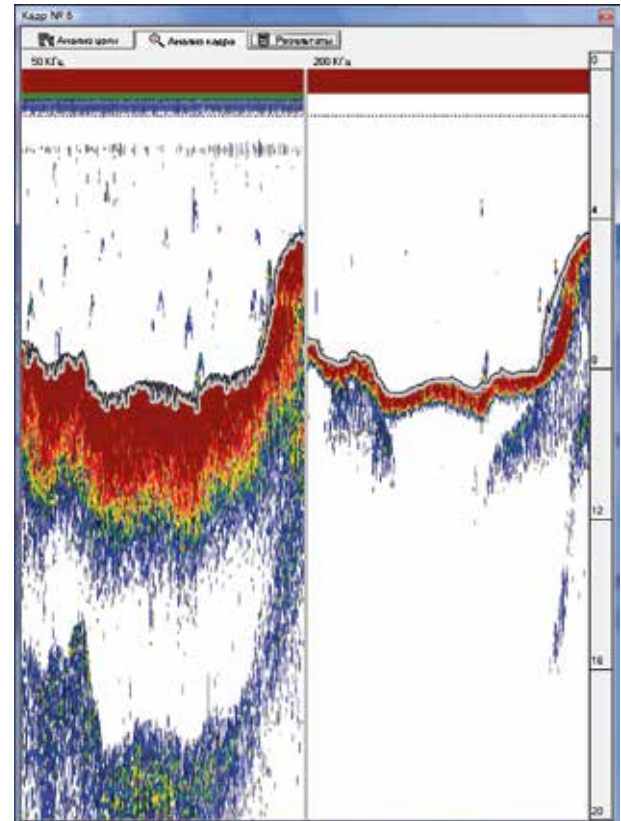


Рис. 11.15. Одновременная регистрация отдельных рыб на малых глубинах в режиме вертикальной локации на двух частотах 50 (левая половина) и 200 кГц (правая половина экрана дисплея) с шириной характеристики направленности 45° и 14° , соответственно (на уровне 3 дБ)

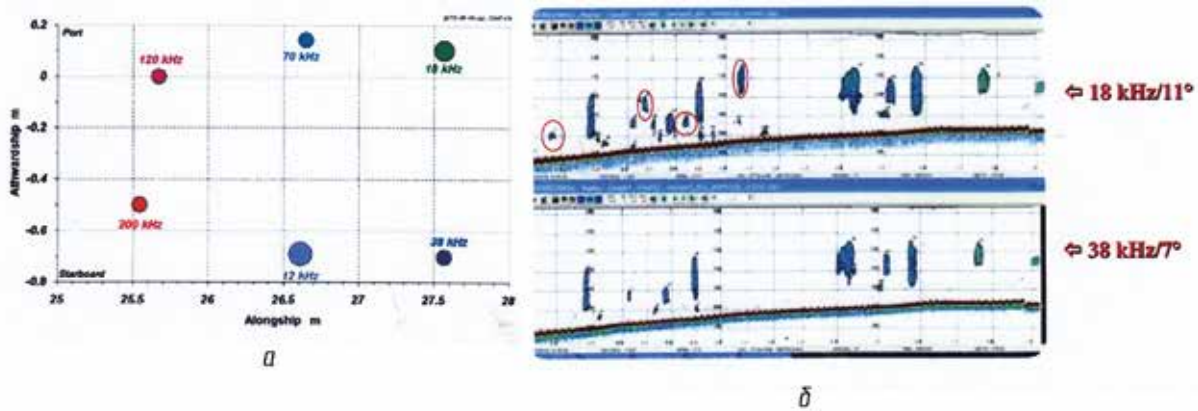


Рис. 11.16. Расположение акустических антенн – *a* и *б* – эхограмма, полученная на НИС «Таласса» (Франция) при одновременной вертикальной эхолокации рыбопоисковой аппаратурой с разной шириной характеристики направленности. Кружками на верхней эхограмме отмечены стаи и косяки, пропущенные при использовании характеристики направленности шириной 7° .

и количество отметок в трассе и самих трасс. Подобная ситуация может быть и при эхолокации стай и небольших косяков (рис. 11.16). Из рис. 11.16 *б* можно видеть, что даже при небольшом расстоянии между антеннами (примерно 70 см) при узкой характеристике направленности на эхограмме зафиксировано меньшее количество стай и мелких косяков рыб. Фактическое расположение гидроакустических антенн для указанной ситуации показано на рис. 11.16 *a*.

Хотя трассы отметок эхосигналов от небольших стай рыбы при вертикальном зондировании с движущегося судна также могут иметь серповидную форму или вид обратной буквы V, характер их несколько изменяется из-за увеличения длительности отметок в средней части, обусловленной «внутрикосячной» реверберацией и влиянием периферийных лучей характеристики направленности антенны. В зависимости от размеров косяка по ходу движения судна верхняя кромка изображения может иметь в средней части плоский участок, пропорциональный протяженности косяка. При лоцировании протяженных скоплений серповидных трасс уже практически не наблюдается. В литературе [Shibata, 1975] приведены выражения для расчета угла обнаружения θ рыбы данной силы цели рыболокатором на основании данных, снимаемых с трассы отображенных эхосигналов от одиночной цели (рис. 11.11 *в*). На рис. 11.11 – в h_1 и h_2 – глубины начала и окончания изображения трассы рыбы, h – минимальная глубина трассы отметок эхосигналов, B – дистанция между h_1 и h_2 , $2t$ – время, необходимое для отображения дистанции B .

$$h_1 + h_2 = [(v_c - v_p \sin \alpha)t] / \sin \theta; \quad h_1 - h_2 = v_c t \cos \alpha / \cos \theta;$$

$$2\theta = \cos^{-1}[h + 0,5(h_1 - h_2)] / h_1 + \cos^{-1}[h - 0,5(h_1 - h_2)] / h_2;$$

$$\theta = \cos^{-1} h / h_1 \text{ при } h_1 = h_2; \quad B = 2nhtg\theta / v_c \pm v_p,$$

где v_c – скорость судна; v_p – скорость движения рыбы; α – угол между акустической осью характеристики и направлением движения рыбы; n – скорость перемещения изображения по экрану дисплея.

11.2.3. Возможности различения обнаруженных объектов на эхограммах рыболокаторов

При наличии трасс эхосигналов, имеющих вид обратной буквы V, в ряде случаев на эхограмме можно различить трассы эхосигналов от одиночных рыб, даже если трассы от них частично пересекаются. Пусть два точечных объекта А и В (рис. 11.17 *a*₁) находятся на некоторой глубине h и судно с эхолокатором, имеющим эффективный угол ха-

рактеристики направленности θ , движется в направлении, показанном стрелкой, со скоростью v_c эхосигналы к антенне начинают приходить с момента прихода правого края характеристики к объекту, находящемуся в точке А, и будут отображаться на экране дисплея, как показано на рис. 11.17 a_2 , в виде дуги, т. к. расстояния от антенны до объекта в точке А по мере движения судна будут вначале уменьшаться (до момента попадания объекта на акустическую ось), а затем вновь увеличиваться. Поступление эхосигналов от объекта в точке А прекращается, когда в эту точку придет левый край характеристики. Если в этот момент правый край ее будет находиться в точке В, то начинается поступление эхосигналов от объекта в точке В и формируется новое серповидное отображение трассы. При расположении объектов на глубине h (рис. 11.17 a_1) и расстоянии между ними, равном ширине характеристики направленности на этой глубине в единицах длины, эхосигналы от двух объектов легко различаются ($AB = 2h \operatorname{tg} \theta_{\text{эфф}}/2$ из рис. 11.17 a_1, a_2).

Рассмотрим теперь случай, когда второй точечный объект находится в точке С, а именно, на расстоянии $AB/2$ от первого. Тогда трасса отметок эхосигналов будет иметь вид, показанный на рис. 11.17 a_3 . Отображения трасс эхосигналов от двух объектов достаточно четко различаются, и по расстоянию между вершинами дугообразных трасс можно легко определить расстояние между объектами (при известных скоростях судна и перемещения изображения по экрану). При сближении объектов, находящихся в точках А и В, вершины дугообразных трасс отметок эхосигналов будут сближаться, а при удалении расходятся. Как видно из рис. 11.17 a_1 и a_2 , при расстоянии между объектами $AB' = h \operatorname{tg}(\theta_{\text{эфф}}/2)$ точка пересечения двух дуг соответствует половине высоты дуги. Если принять за критерий различимости таких изображений 30%-ное различие между высотой дуги и высотой, соответствующей точке их пересечения (что вполне допустимо), то величина разрешающей способности по углу δ_{hy} для точечных объектов будет равна

$$\delta_{hy} = 2/3 h \operatorname{tg}(\theta_{\text{эфф}}/2).$$

На практике необходимо учитывать характеристики аппаратуры, которые в совокупности приводят к расплыванию отдельных отметок и, следовательно, краев отображений.

Применительно к отображениям (фиксациям) отдельных рыб в реальных условиях можно записать:

$$\delta_{(hy)p} = 2/3 h \operatorname{tg}(\theta_{\text{эфф}}/2) + d_t v_c / v_{p2},$$

где d_t — диаметр пятна точечной отметки; v_{p2} — скорость перемещения изображения по экрану дисплея.

Величина разрешающей способности рыболокаторов $\delta_{(hy)c}$ в случае регистрации разреженных скоплений и небольших косяков (т. е. косяков, протяженность которых меньше или равна ширине характеристики направленности антенны на глубине h

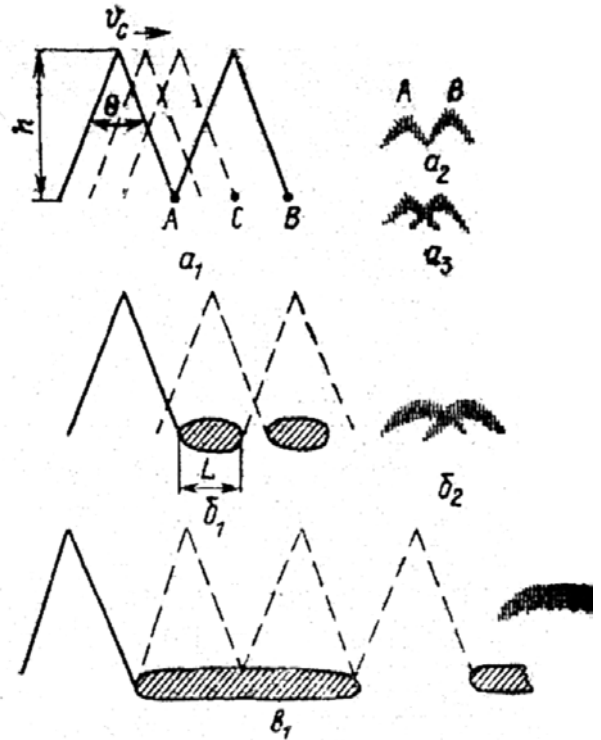


Рис. 11.17. К оценке разрешающей способности эхолотатора вертикального действия по углу

в единицах длины) увеличивается на протяженность объекта L по ходу движения судна (рис. 11.17 b_1, b_2). Одновременно ухудшается различаемость уровней пересекающихся дугообразных отображений из-за ухудшения разрешающей способности по глубине (удлинение отметок эха на экране дисплея от косяка А и косяка В). Поэтому можно записать:

$$\delta_{(hy)c} = h \operatorname{tg} \theta_{\text{эфф}} / 2 + d_r v_c / v_{p2} + L.$$

При регистрации протяженных скоплений и плотных косяков (рис. 11.17 a_1, a_2), протяженность которых превышает ширину характеристики направленности антенны на глубине h в единицах длины, различаемость уровней пересекающихся трасс отметок эха ухудшается в еще большей степени, чем при регистрации разреженных скоплений и небольших косяков, так как в этом случае глубина нахождения верхней границы скопления практически не бывает постоянной, что обуславливает появление волнообразных изображений отметок эха и следовательно ошибки в оценке количества скоплений и косяков. При этом также увеличивается продолжительность каждой отметки и можно записать [Юданов, 1967]:

$$\delta_{(hy)c} = 2h \operatorname{tg} \theta_{\text{эфф}} / 2 + d_r v_c / v_{p2} + L.$$

Разрешающая способность δ_{hy} в большой степени зависит от скоростей судна v_c и перемещения изображения v_{p2} . При небольшой v_{p2} отметки эхосигналов отображаются близко одна к другой и более сильные отметки несколько перекрывают более слабые. Это увеличивает расплывчатость краев изображений и обуславливает возрастание d_r . То же происходит при увеличении скорости судна. Качка судна приводит к ухудшению разрешающей способности вследствие нарушения плавности трасс отметок эхосигналов из-за вертикальных перемещений судна и колебаний характеристики направленности антенны. При низкой разрешающей способности эха от одиночных рыб могут отображаться на экране дисплея слитно даже тогда, когда находятся на значительных расстояниях одна от другой, а концентрации малой плотности отмечаются как монолитные скопления.

Улучшение δ_{hy} может быть достигнуто применением более узких характеристик направленности, а также установкой соответствующей скорости перемещения изображения по экрану дисплея.

11.2.4. Особенности отображений эхосигналов от концентраций промысловых объектов

При увеличении концентрации рыбы в скоплениях, когда рыболокатор перестает «разрешать» одиночные объекты, характер отображения совокупностей эхосигналов на экране дисплея существенно изменяется — появляются комбинированные трассы отраженных сигналов, например, в виде слоев различной плотности, отдельных сплошных полос и др. В этом случае эхограммы практически уже не обеспечивают получения достаточной информации о плотности концентраций рыбы. Особенностью трасс рыбных эхосигналов типа «слой» является наличие изображений трасс одиночных рыб у его верхней и нижней границ. Иногда эта особенность может использоваться для различения отображений эхосигналов от промысловых рыб, а также эхосигналов от небольших водных организмов (например, мальков рыб и планктона).

При наличии в районе поиска достаточно плотных скоплений рыб — косяков характер показаний также имеет ряд особенностей. Для трасс эхосигналов от плотных пелагических косяков характерно наличие «хвостов» внутрикосячной реверберации, т. к. акустические колебания претерпевают многочисленные отражения и рассеяние от рыб в косяке, являясь источником дополнительной энергии, возвращающейся к антенне и в приемный тракт рыболокатора после прихода основной части энергии, отраженной от косяка. В связи с этим высота (толщина) трассы эхосигналов от косяка не может служить непосредственным показателем для оценки его истинной вертикальной протяженности.

Глубина нахождения верхней кромки косяка, определяемая по показаниям шкалы дисплея, также может отличаться от фактической в том случае, если косяк находится в стороне от плоскости, проходящей через акустическую антенну рыболокатора, т. к. на дисплее будут фиксироваться эхосигналы от боковых лучей характеристики направленности. Получаемая при этом погрешность при широкой характеристике направленности будет больше, чем при узкой, и регистрируемая глубина всегда будет больше фактической (рис. 11.18). Получаемое превышение определяется шириной зоны действия рыболокатора в диапазоне глубин нахождения скопления и положением скопления в пределах этой зоны.

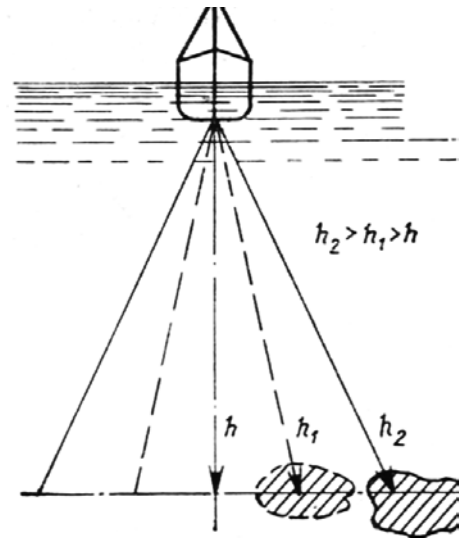


Рис. 11.18. Завышение показаний глубины h нахождения рыбы при озвучивании ее боковыми лучами характеристики направленности антенны

При локации плотных косяков рыбы в районах с небольшими глубинами может наблюдаться повторное отображение эхосигналов от них ниже первой трассы отметок эхосигналов от дна. Это обусловлено многократным отражением акустических колебаний, которые в данном случае проходят следующий путь: акустическая антенна — рыба — грунт — поверхность воды — рыба — акустическая антенна (рис. 11.19 а, б). На эхограммах, показанных на рис. 11.19 в, г и соответствующих диаграммам на рис. 11.19 а, б, повторные изображения эхосигналов от косяков будут находиться от первой трассы донных эхосигналов на расстояниях, пропорциональных глубине нахождения рыбы.

В отдельных случаях при нахождении очень плотных косяков у поверхности воды или дна (при малой глубине места) и высокой чувствительности эхолота может

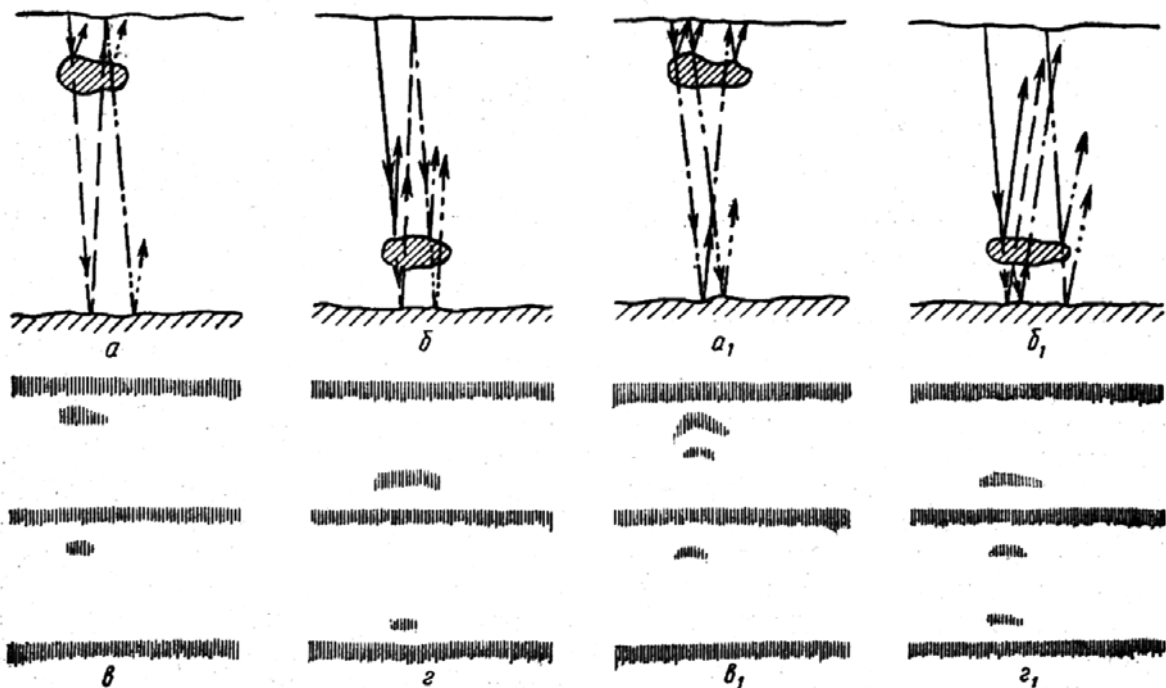


Рис. 11.19. Схема формирования повторных отображений эхосигналов от плотных косяков рыб

иметь место повторное отображение эхосигналов от косяка (однако значительно более слабое) вследствие прохождения звука по пути a_1 (антенна – косяк рыбы, от которого в данном случае будет очень интенсивный эхосигнал, – поверхность воды – вновь косяк рыбы – приемная антенна) или b_1 (антенна – косяк рыбы – грунт – косяк рыбы – повторно грунт – приемная антенна) (см. рис. 11.19 *a, б*). На эхограмме, показанной на рис. 11.19 *в₁*, соответствующей диаграмме на рис. 11.19 *б₁*, повторное отображение эхосигналов от косяка будет находиться на некотором расстоянии от нулевой линии, пропорциональном удвоенной глубине нахождения косяка, а на эхограмме, приведенной на рис. 11.19 *г₁* и соответствующей диаграмме на рис. 11.19 *б₁* – на расстоянии от первой трассы донных эхосигналов, пропорциональном дистанции косяка от дна. В последних случаях одновременно будут присутствовать и дополнительные эхосигналы, приведенные на рис. 11.19 *в, г*. На рис. 11.20 представлены реальные эхограммы повторных отображений эхосигналов от плотных косяков рыб.

Многие виды рыб формируют косяки в светлое время суток и более разреженные концентрации и слои в темное время суток; когда в получаемых от них отображениях эхосигналов можно фиксировать и трассы отметок от отдельных рыб (иногда это помогает в оценке обнаруживаемых объектов).

Мелкие водные организмы, образующие так называемые звукорассеивающие слои, часто служат источниками появления слоеобразных изображений на экранах дисплеев, которые при отсутствии достаточного опыта могут легко быть приняты за отметки эхосигналов от рыб.

Звукорассеивающие слои, как и рыбные скопления, характеризуются резко выраженными суточными вертикальными миграциями (к вечеру перемещаются в более верхние горизонты). Как правило, звукорассеивающие слои опускаются быстрее, чем поднимаются. В начале миграции слой поднимается медленно, потом быстрее, затем темп подъема снова замедляется, причем характерно, что во время вертикальных миграций часто наблюдается разделение одной концентрации на несколько слоев. Иногда наличие нескольких слоев отмечается и днем. Характерными отличиями изображений эхосигналов от таких слоев, является их «мелкозернистость» и протяженность по району поиска, меньшая изменчивость при замедлении хода судна или его остановке, практическое отсутствие трасс – отметок эхосигналов от одиночных объектов в пределах слоя. В некоторых случаях отображения в виде рассеянного слоя создаются эхосигналами от глубоководных креветок, которые обычно поднимаются от дна в темное время суток. Иногда эхосигналы от креветок фиксируются и в виде компактных трасс отметок эха. Более качественные эхограммы концентраций гид-

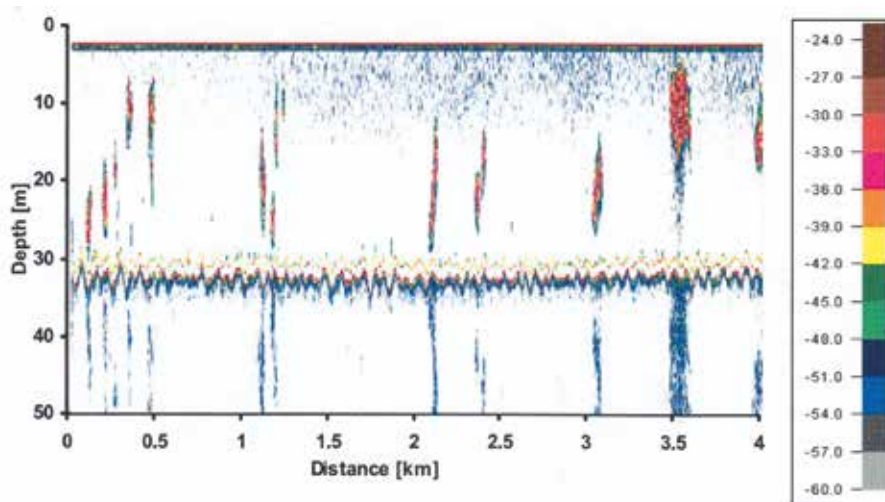


Рис. 11.20. Реальная эхограмма повторных отображений косяков сардины, зарегистрированных в зоне Галисии (Испания),— (40° 24' N 08° 52' W, рабочая частота 38 кГц, время 20.20, скорость судна 10 уз.)

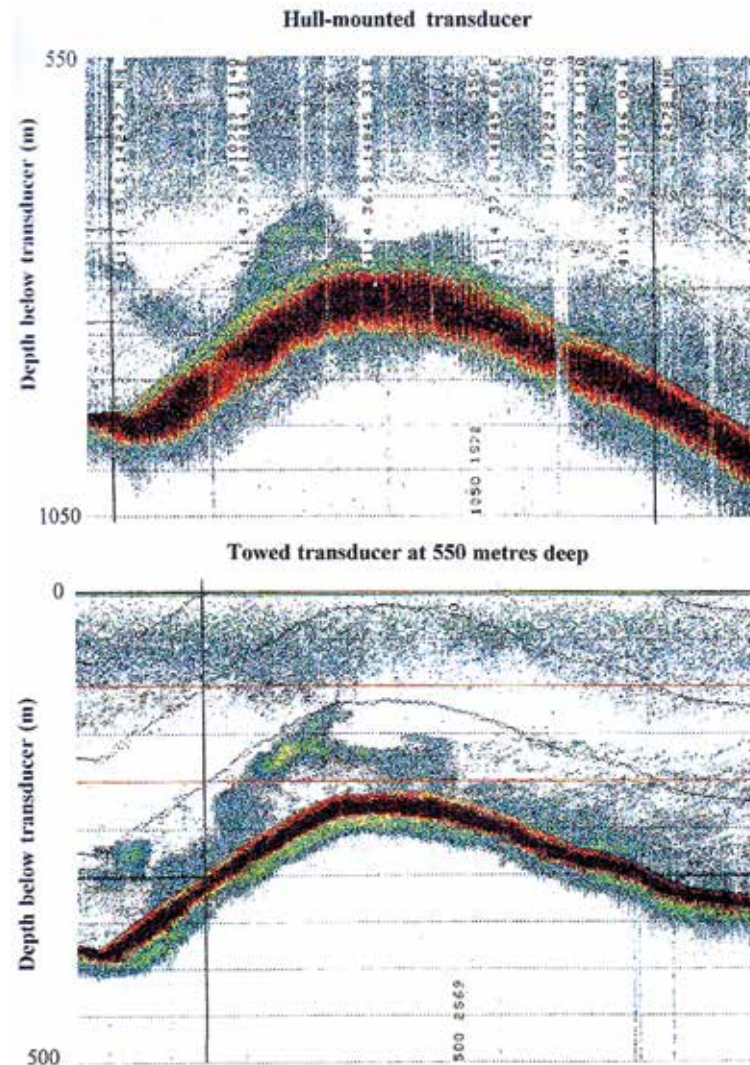


Рис. 11.21. Характер эхограмм при вертикальной локации с помощью бортовой гидроакустической аппаратуры – а и буксируемой – б [Kloser, 1996]

робионтов могут быть получены при применении буксируемых гидроакустических систем (рис. 11.21).

Бортовая гидроакустическая эхолокационная аппаратура позволяет обнаруживать рыб на значительных глубинах, что важно при глубоководном промысле. При испытаниях рыбопоискового эхолокатора «Спрут» в северной Атлантике нами были получены записи эха от отдельных рыб (макроруса, подтвержденного траловыми уловами локацией искусственной цели – сферы) на глубинах до 920 м [Кудрявцев, 1979, 2013]. Как указывается в работе, несмотря на небольшие величины запасов глубоководных и батипелагических рыб в районах подводных гор, они сохраняют свое значение в качестве дополнительных ресурсов промышленного рыболовства. О возможностях гидроакустического обнаружения рыбы на больших глубинах также свидетельствуют реальные эхограммы, полученные при промысле в 70-е гг. с использованием как ранее выпускаемых рыбопоисковых приборов, так и современных средств гидроакустического поиска.

Во время поиска и облова рыбы в 70-х гг. прошлого века на Средне-Атлантическом хребте (САХ) гидроакустической рыбопоисковой аппаратурой вертикального действия «Кальмар» (с рабочей частотой 20 кГц) обеспечивалось обнаружение разреженных концентраций макроруса на глубинах порядка 1000 м (рис. 11.22).

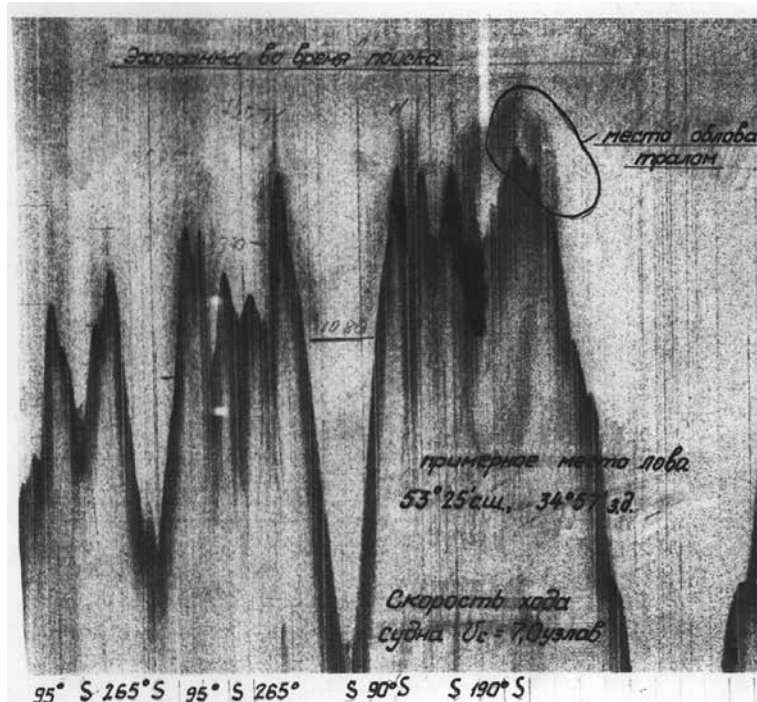


Рис. 11.22. Эхограмма (со смещением начала регистрации) скопления макроруса в районе подводных гор САХа на глубинах более 800 м, полученная 3 апреля 1974 г. на БМРТ «Кивач» с последующим обловом тралом, — улов был 6 т

В работе O. Driscoll and Macaulay [2003] приводятся результаты использования уже современной бортовой рыбопоисковой аппаратуры ES60 при поиске рыбы на больших глубинах (клыкача и макроруса) в море Ross [Антарктика] во время ярусного лова на судне Janas. ES60 имеет рабочую частоту 38 кГц, мощность излучаемых импульсов до 4000 Вт, длительность импульсов излучения до 4 мс, ширину полосы пропускания приемного тракта 766 Гц, ширину характеристики направленности акустической антенны 7° , коэффициент затухания был принят равным $9,97 \text{ дБ/м}^1$.

На рис. 11.23 представлена часть эхограммы, полученной 23 января 2003 г., с регистрацией трасс эхосигналов от отдельных рыб на глубинах от 800 до свыше 1200 м.

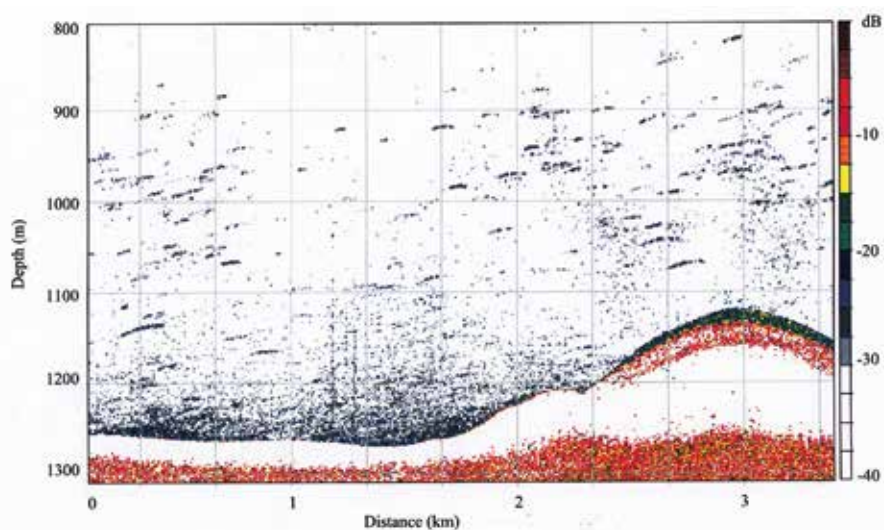


Рис. 11.23. Отображение эхотрасс отдельных рыб в море Росса (23 января 2003 г.) в процессе постановки яруса. Справа показана шкала интенсивностей эхосигналов в дБ при ВАРУ 40log. Улов яруса составил 328 макрорусов и 28 клыкачей

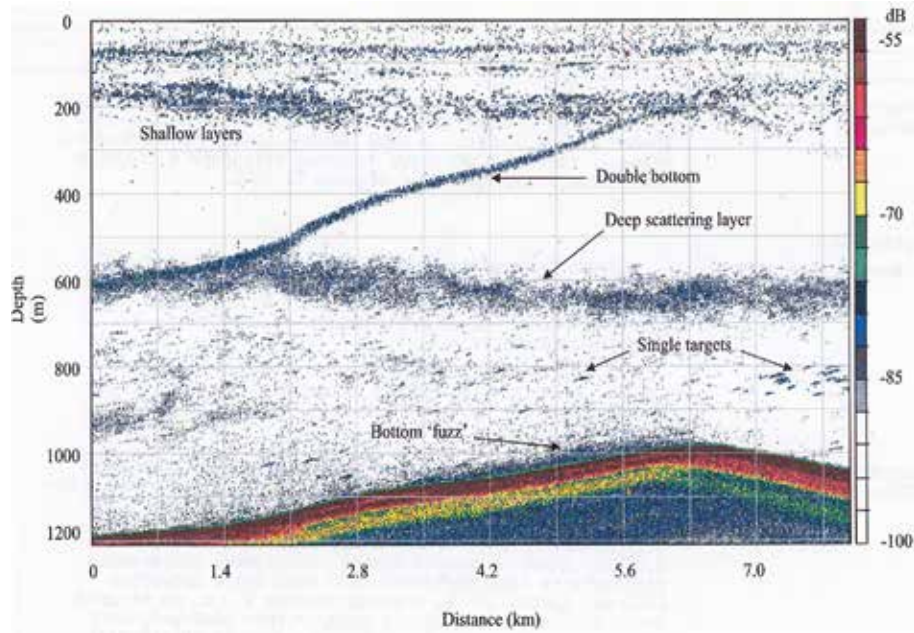


Рис. 11.24. Эхограмма регистрации трасс эха от разреженной концентрации макроруса, мелководных и глубоководных рассеивающих слоев эхолотом ES60 (38 кГц) в море Росса при постановке яруса (28 января 2003 г.) с трассой второго отражения от дна и мешающими отражениями от неровностей дна (улов яруса составил 723 макроруса) [O' Driscoll and Macaulay, 2003]

Авторы отмечают отрицательное влияние акустических «мертвых зон», создаваемых боковыми лучами характеристики направленности акустической антенны аппаратуры, которая может достигать по высоте до 50 м при уклонах дна 20° . Проблема «мертвой» зоны еще более ухудшается вследствие влияния эхосигналов от боковых лепестков антенны (о формировании таких «мертвых зон» — [Кудрявцев, 1979, 2013]. Мешающее влияние также оказывали повторные трассы эхосигналов от дна (рис. 11.24). На рис. 11.24 можно видеть трассу малой интенсивности второго эха от грунта, а также маскирующие эха над трассой эхосигналов от грунта под судном. Отображение второго эха от дна устраняется переключением на другой диапазон дисплея.

Более качественному и наглядному отображению эхосигналов в таких ситуациях способствует увеличение масштаба изображения на экране дисплея по вертикали (рис. 11.25). На рис. 11.25 показана

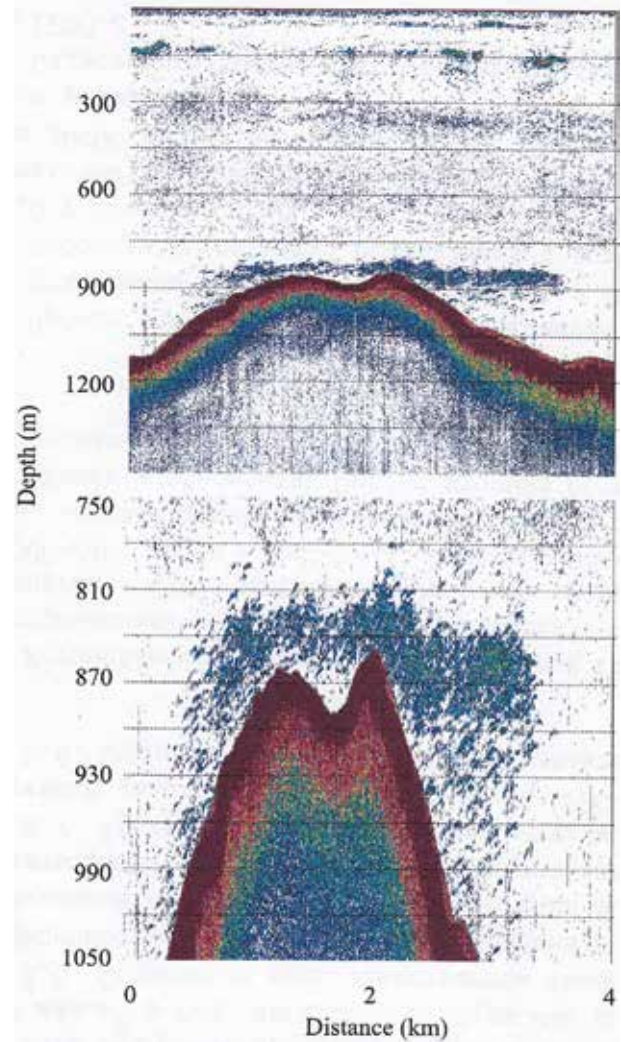


Рис. 11.25. Эхограмма придонного скопления при различных масштабах отображения. Цветная шкала интенсивностей соответствует приведенной на рис. 11.24

эхограмма одного и того же придонного скопления рыбы на глубоководной банке при разных масштабах отображения.

Как указывалось, имеется много форм распределения скоплений рыбы и их кластеров. Рядом исследователей предложены различные их классификации по морфологиче-

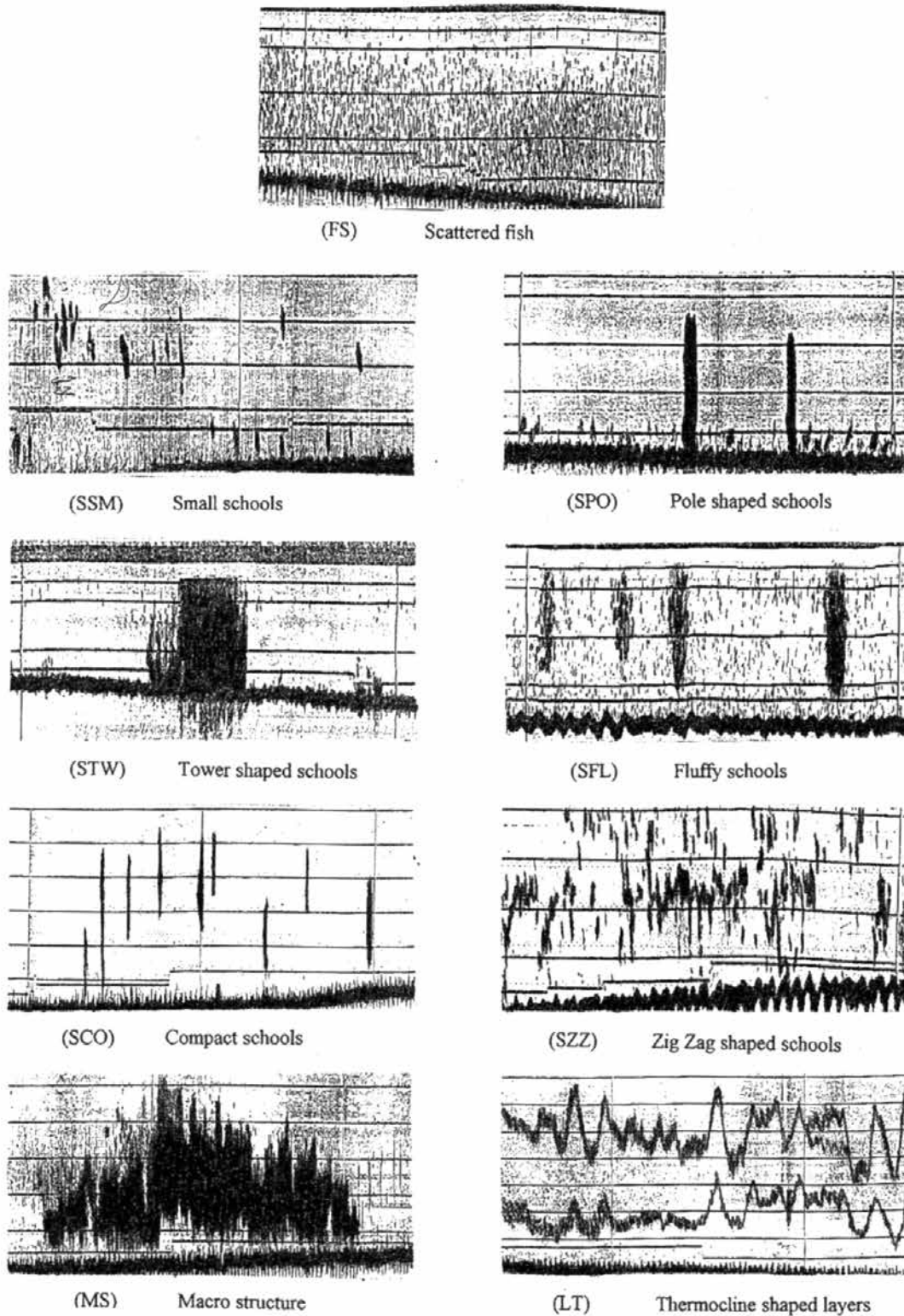


Рис. 11.26. Типы внешних форм совокупностей эхосигналов от рыбных скоплений, выделенные при их анализе в каждом ESDU

ским характеристикам. В качестве примеров можно привести предложенные в работах [Petingas and Levenez, Ó Driscoll R.L., Macaulay, 1996].

[Petingas and Levenez, 1996] выполнен анализ серии гидроакустических съемок, проведенных с 1983 г. в зоне от Дакара до Rose Cape (между 14°45' N и 12°20' N) во время холодных сезонов. Эти съемки проводились с одного и того же исследовательского судна, с использованием одной и той же гидроакустической аппаратуры. Проекты съемок были одними и теми же. По результатам анализа совокупностей эхотрасс в каждом ESDU, одномильном элементарном диапазоне, общепринятом для получения одной выборки, они выделили девять типов морфологических характеристик совокупностей эха и один нулевой (рис. 11.26):

- нулевой – в ESDU вообще отсутствуют эхосигналы от рыб;
- разреженные концентрации рыб (FS): имеется лишь совокупность отдельных рыбных эх – не формируются какие-либо агрегатированные структуры;
- косяки: они были разделены на три типа – SSM, SPO, STW, SFL, SCO и SZZ;
- SSM – небольшие косяки, определенные как имеющие вертикальную протяженность менее 5 м и компактный внешний вид на эхограмме;
- SPO – косяки с большой вертикальной протяженностью, с компактными эхотрассами, внешне практически контактирующие с дном;
- STW – косяки с совокупностями эхосигналов от них, внешне похожие на башни и контактирующие с трассой эха от дна;
- SFL – пелагические косяки с овальной формой совокупностей эхосигналов и меняющейся внутренней структурой отображения эха;

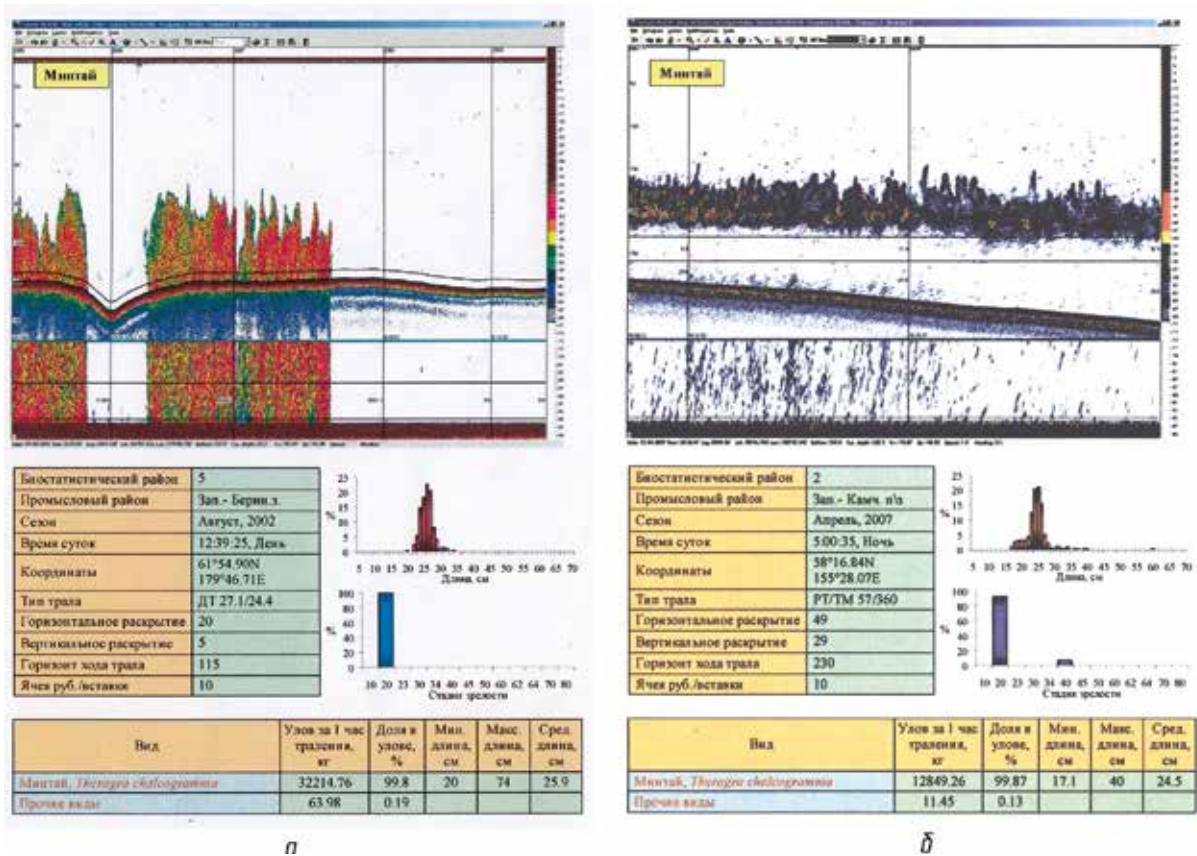


Рис. 11.27. Примеры эхограмм с разными распределениями:

а – эхограмма скоплений минтая с размерами 20–30 см с формами распределения (Берингово море, август 2002 г., день), подобными STW («башни»), с информацией по размерному составу и другими данными; б – концентрация достаточно плотного (по приведенным полученным уловам) слоя минтая большой вертикальной протяженности (примерно 50 м), находящегося примерно на одной глубине (порядка 180 м) (Охотское море, апрель 2007 г., ночь – начало утра, размеры 20–30 см). Вид подтверждается приведенными уловами

- SCO – пелагические косяки с переменными очертаниями совокупностей эхосигналов, но с четкими границами и компактной внутренней структурой эхотрасс;
- SZZ – пелагические косяки с зигзагообразными очертаниями совокупностей эха, компактной внутренней структурой, нерегулярными внешними очертаниями. Могут быть как в виде отдельных косяков, так и определенных слоев;
- MS – макроструктуры – очень большие агрегации с протяженностью от 1 до 2 миль. Данный тип не присутствовал при всех съемках и был редким;
- LT-слои – тонкие слои достаточно плотных совокупностей эхосигналов, варьирующие по глубине нахождения в небольших масштабах. Измерения вертикального профиля показали, что такая структура слоев связана с термоклином.

Можно привести некоторые подобные формы распределения и для других видов рыб в других районах (рис. 11.27).

В работе [O'Driscoll R.L. and Macaulay, 1996] подтверждена классификация форм очертаний совокупностей рыбных эхосигналов от отдельных, ранее предложенная [Misund et al., 1995], – овальные, прямоугольные, в виде поршней, параболические и аморфные. Они подтвердили эту классификацию в процессе исследований структуры косяков трех пелагических видов рыб: *barracouta* (*Thyrsites atum* с типичной длиной 60–80 см и массой между 2–5 кг), *jack mackerel* (*Trachurus murphy*) длиной 40–50 см и массой 1–2 кг) и slender tuna *Allothinnus fallaii* длиной до 90 см и массой до 15 кг). Экспериментальные работы проводились в 1994 г. в районе Otago Peninsula (Новая Зеландия) с использованием гидролокатора бокового обзора Klein 595 (США) с двумя гидроакустическими антеннами правого и левого борта с рабочими частотами 130 кГц, размещенными в буксируемом устройстве, с шириной характеристик направленности 40° в вертикальной плоскости (наклоненной на 10°) и 1° в вертикальной (на уровне 3 дБ). При обработке была проведена соответствующая коррекция размеров косяков.

В то же время следует отметить, что вопрос акустической классификации форм распределения рыбных скоплений заслуживает дополнительных экспериментальных исследований в реальных конкретных условиях их существования, возможно по видам

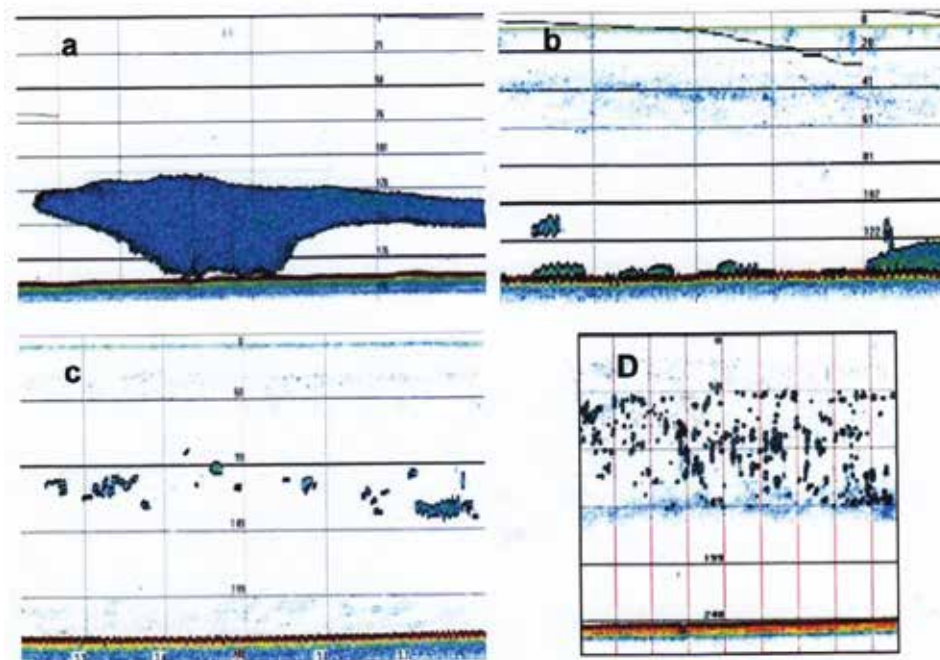


Рис. 11.28. Акустические отображения (эхограммы) концентраций мойвы северной Атлантики рыбопоисковой аппаратурой с рабочей частотой 38 кГц:

a – большое скопление, *b* – отдельные крупные косяки вблизи дна, *c* – небольшие косяки в толще водной среды, *d* – разреженные стаи рыб в пелагиали (из проекта SIFAMI, 2010)

рыб или по группам близких видов. В качестве примера можно привести серию дополнительных эхограмм форм распределения мойвы (рис. 11.28).

Несмотря на весьма значительное разнообразие характеристик распределений гидробионтов, имеются некоторые закономерные зависимости между характером эхограмм, показаний индикаторных устройств рыбоэхолокаторов и биологическими особенностями рыб или косяков рыб. Во всяком случае, это может быть отнесено к промысловым рыбам одного или близких видов.

Пожалуй, первыми это было давно замечено опытными промысловиками, достаточно регулярно работающими в определенных районах лова. Ими проводился сбор эхограмм самопишущих регистраторов рыбопоисковой аппаратуры. Сбор и накопление характерных эхограмм, получаемых при локации объектов лова и источников ложных и маскирующих отражений, в различное время года и суток с учетом биологического состояния объектов, их поведения, метеорологических, гидрологических и других факторов является важным элементом обеспечения более эффективного применения гидроакустической аппаратуры на рыбопромысловых и научно-исследовательских судах. Кроме того, должны периодически контролироваться как технические, так и тактические характеристики рыболокаторов (дальность действия, глубина обнаружения и др.). В этом случае можно обеспечить сравнимость результатов, в т. ч. при работе этого же судна в данном районе, например, в другой период.

11.3. ПОИСК РЫБЫ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ И НАКЛОННОМ ЛОЦИРОВАНИИ

Наиболее эффективными средствами поиска рыбы в общем являются рыбопоисковые гидролокаторы. Даже гидролокаторы с однолепестковыми характеристиками направленности имели возможность лоцирования всей подводной обстановки в зоне судна, в т. ч. и в вертикальном непосредственно под судном. Современная аппаратура с электронным сканированием характеристик направленности гидроакустических антенн позволяет выполнять указанный обзор уже за один цикл локации. Особенно целесообразно применение гидролокаторов при оперативном поиске косячных пелагических скоплений рыбы.

Ограниченность использования гидролокаторов на многих промысловых судах при траловом лове придонных и донных скоплений в основном обусловлена сложностью выделения полезных эхосигналов от рыб из большого числа отражений от скал, кораллов, пиков, неровностей дна и др. Эффективность обнаружения придонной рыбы обычными гидролокаторами с широкими характеристиками направленности, конечно, сильно ограничена и в значительной степени зависит от характера и степени неровностей дна, вида объектов и т. д. Если промысловые объекты образуют достаточно плотные скопления у дна, например, ставрида, скумбрия, сардинелла, сардина в Центральной Атлантике держатся в виде косяков большой протяженности по высоте, и дно достаточно ровное, то их обнаружение существенно облегчается.

При работе в районе с достаточно ровным дном, особенно при малых наклонах характеристики направленности и прямолинейном (или близком к прямолинейному) характере распространения звука эхосигналы от косяков рыбы, находящихся в толще воды, могут поступать значительно позже эхосигналов от грунта и превышать по интенсивности донную реверберацию. Возможности различения эхосигналов от скоплений рыбы в толще воды и у дна тогда улучшаются, и при правильной установке регуляторов усиления и соответствующей регулировке ВАРУ может быть получена большая дальность обнаружения скоплений. В случае неровного дна возможности выделения эхосигналов от рыбы снижаются и сокращаются дальности обнаружения скоплений.

Использование слухового индикатора при поиске придонных скоплений может давать даже больший эффект, чем при обнаружении косяков рыбы в толще воды [Сапин, 1970] эхосигнал от косяка рыбы, находящегося в толще воды, имеет чистый тон и достаточно резкие границы. Эхосигналы от придонных косяков рыб звучат приглушенно

и имеют менее четкие границы, подъем грунта воспринимается с приглушенным рокотом. Для эффективного использования слухового индикатора оператору требуется большой опыт, чтобы по характеру звучания эхосигналов определять наличие рыбы у дна. Как правило, в этом случае оператор сравнивает каждый поступающий эхосигнал с рядом предыдущих, чтобы выделить из них тот, при котором донная реверберация прослушивается отчетливее и дольше (такое выделение полезных эхосигналов возможно лишь при достаточно ровном дне и в тихую погоду, особенно если в станции отсутствует стабилизация акустической антенны или ее характеристик направленности).

Необходимые навыки использования гидролокатора при поиске придонных и донных скоплений рыбы могут быть приобретены оператором и в процессе самостоятельной работы с аппаратурой в районе промысла (на переходах, в процессе тралений, выхода судна в точку отдачи трала и т. д.). Целесообразная последовательность в самостоятельном обучении приведена в работе [Кудрявцев, Сапин, 1977].

При поиске скоплений донных и пелагических рыб, особенно на малых судах и в районах с небольшими глубинами, более эффективно использование гидролокаторов, имеющих узкие характеристики направленности с подавленными боковыми лепестками и системы стабилизации акустической антенны, так как узкие характеристики можно использовать без стабилизации только тогда, когда волнения моря нет или оно мало.

Серьезное влияние на дальность действия гидролокаторов могут оказывать подводные течения, изменяющие температурные режимы в районе промысла. При волнении моря характеристику направленности антенны прибора несколько отклоняют вниз для снижения уровня поверхностной реверберации.

Основной недостаток прежних рыбопоисковых гидролокаторов при оперативном поиске и обнаружении заключался в отсутствии накопления принимаемых рыбных эхосигналов. Поэтому операторам промысловых судов приходилось постоянно наблюдать за показаниями индикаторов аппаратуры и воспринимать эхосигналы на слух. Соответственно, в качестве операторов на промысловых судах кошелькового лова и судах промысловой разведки часто были штатные гидроакустики. В первой половине 60-х гг. при исследовательских работах по лову на свет сардинеллы у африканского побережья автору приходилось выполнять гидроэхолокационный поиск косяков для последующего наведения судна на рыбу перед наступлением темноты.

Развитие микроэлектроники и внедрение электронных запоминающих устройств позволило улучшить тактические возможности рыбопоисковых гидролокаторов с одной характеристикой направленности благодаря обеспечению отображения и сохранения на экране дисплея эхосигналов со всего выбранного оператором сектора обзора. На рис. 11.29 приведен пример отображения эхосигналов с сектора обзора в гидролокаторе «Лещ-Б» с однолепестковой характеристикой направленности и запоминанием эхолокационной информации.

В современных гидролокаторах одновременного объемного обзора имеются режимы отображения эхосигналов с выбранных слоев при приеме эха с траверзных направлений правого и левого бортов и с их накоплением на экране дисплея, а также панорамного отображения с передней зоны судна в пределах 120° [Кудрявцев, 1979; патент; Кобяков и др., 1987]. Режим панорамной регистрации был применен в гидролокаторах ФСС фирмы Фуруно, «Угорь, Таймень» [Кудрявцев, 1979; Кобяков и др., 1987], а также имеется в современном рыбопоисковом гидролокаторе FSV30 фирмы Фуруно [Кудрявцев, 2013].

При горизонтальном лоцировании обычно принимаются эхосигналы как от основного, так и от бокового излучения, особенно в случае работы с аппаратурой на небольших глубинах. При неровных грунтах это приводит к воспроизведению на экранах дисплеев станций большого количества различных эхосигналов, что часто затрудняет оценку показаний. В то же время могут быть выделены три основных вида донных эхосигналов, часто маскирующих полезные эхосигналы от рыбы (эхосигналы от пиков, гряд

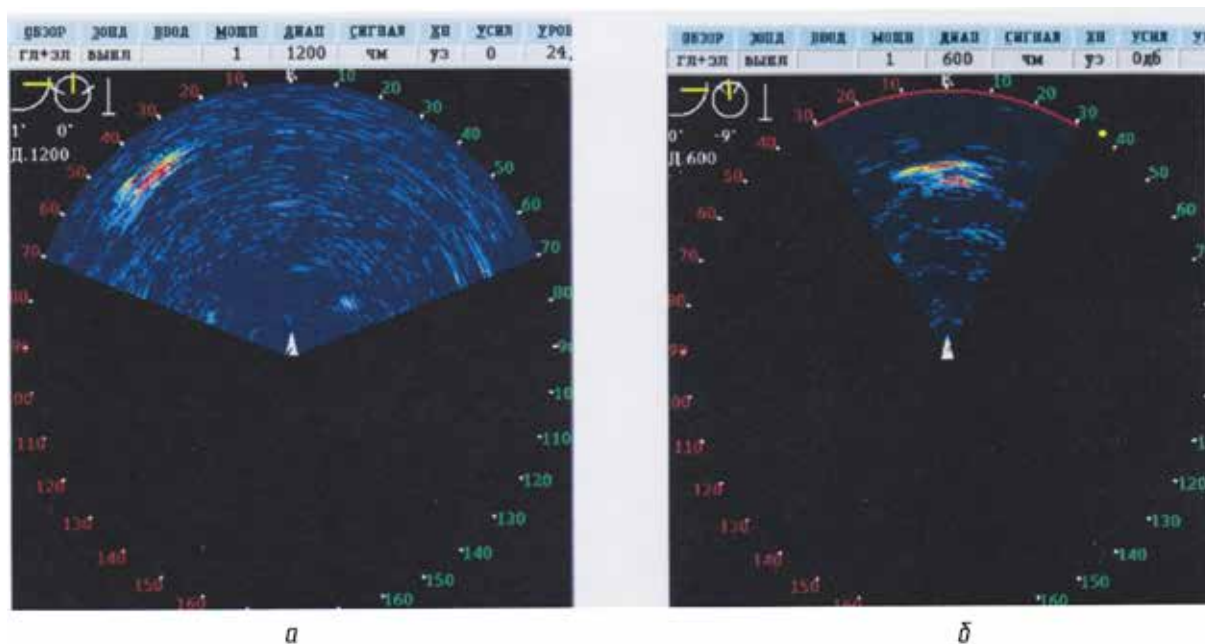


Рис. 11.29. Отображение эха от косяка хамсы в Черном море в режиме поиска:
 а – диапазон 0–1200 м и на галсе сближения; б – диапазон 0–600 м [Заярный, Зыбин, Кудрявцев, 2006]

и других возвышенностей на морском дне; эхосигналы, обусловленные боковым излучением и приемом; эхосигналы, связанные с рефракцией основного лепестка характеристики направленности антенны гидролокатора).

Эхосигналы от дна, принимаемые боковыми лепестками, часто присутствуют на выходных устройствах аппаратуры при поиске на малых глубинах. Они, как правило, нежелательны, так как затрудняют распознавание эхосигналов от рыбы, особенно в случае использования аппаратуры при облове обнаруженного скопления. В то же время по линии этих отметок может оцениваться глубина места в любой момент времени, т. к. их положение относительно нулевой линии большей частью не меняется. Эхосигналы, связанные с рефракцией (отрицательной) акустических лучей основного лепестка, чаще всего присутствуют и имеют большую величину при работе аппаратуры летом и меньшую осенью. При ровном дне они воспроизводятся в виде обычных реверберационных эхосигналов, а при неровном – в виде сильных эхосигналов. Эхосигналы от береговой черты при работе с аппаратурой в прибрежных водах, а также от пиков, возвышенностей и гряд на дне могут при определенных условиях сильно затруднять расшифровку и идентификацию показаний (правильной оценке эхосигналов в этом случае способствует одновременное использование различных типов индикаторов).

Из изложенного следует, что возможности рыбопоисковых гидролокаторов могут использоваться в полной мере лишь при наличии у операторов достаточно четкого представления об основных тактико-технических характеристиках аппаратуры и понимании ими принципов и особенностей отображения получаемой информации, характера влияния гидрологических, метеорологических и других факторов на работу приборов.

11.3.1. Влияние гидрологических характеристик среды на работу рыбопоисковых гидролокаторов

На эффективность поиска и обнаружения рыбы рыбопоисковой аппаратурой при горизонтальной локации нередко влияют гидрологические условия, определяющие характер распространения акустических колебаний в водной среде и нередко снижающие эффективность работы аппаратуры при обнаружении рыбных скоплений и под-

держании эхоконтактов с ними. Из-за рефракции акустических лучей на индикаторах аппаратуры могут воспроизводиться «лишние», «непонятные» отраженные сигналы или внезапно «пропадать» эхосигналы от рыбных скоплений. При наличии приповерхностных и подводных звуковых каналов фактические дистанции обнаружения объектов могут существенно превышать энергетическую дальность действия гидролокатора.

На свойства воды как звукопроводящей среды в основном влияют ее температура и частично соленость. Температура глубинных вод океана не превышает нескольких градусов и мало зависит от географического положения района, а температура поверхностных слоев существенно зависит от широты. В тропиках в течение года она близка к 25–27 °С, в высоких широтах даже летом редко поднимается до 8–9 °С. В тихую ясную погоду верхние нагреваемые солнцем слои воды медленно передают тепло нижним, и уже вблизи поверхности возникают слабые температурные градиенты. При наличии ветра верхний слой воды часто перемешивается и температура по всей его глубине выравнивается. В этом слое скорость звука c может либо слабо убывать с глубиной, либо оставаться постоянной. Во время шторма происходит активное перемешивание вод до больших глубин, толщина изотермического слоя увеличивается (может достигать 50–100 м в тропических и 500–600 м в полярных водах), а температура приповерхностных вод снижается. Ниже перемешанного слоя лежит область более высоких температурных градиентов (слой скачка), где градиент температур может достигать 0,2 °С/м. Температура воды, находящейся всего лишь на 30–50 м ниже слоя изотермии, может быть на 10–15 °С ниже температуры перемешанного слоя. Здесь и соленость может резко уменьшаться – на 1–1,5‰ (более высокая солёность верхнего слоя обусловлена испарением воды с поверхности). Слой скачка наиболее резко выделяется в теплых морях, где разница между температурами поверхностных и глубинных вод велика; в умеренных и высоких широтах слой скачка по тем же причинам летом выражен более четко, чем зимой (когда он может исчезнуть). Более того, в осенне-зимние месяцы в полярных водах температура приповерхностного слоя может быть ниже температуры слоя, находящегося на глубине 100–200 м.

Большое влияние на термическую структуру вод оказывает проникновение в район инородных водных масс, например, арктических вод через Берингов пролив в Тихий океан или теплых средиземноморских вод через Гибралтарский пролив в Атлантический океан. Жизнь многих промысловых рыб определяется системами течений, на стыках которых образуются зоны повышенной продуктивности, где обитают объекты промысла. Выход на поверхность глубинных вод, богатых питательными солями, способствует бурному развитию планктона, служащего пищей для рыб, и наблюдается в зонах разветвления течений (дивергенций), т. к. течения относят поверхностные слои воды. Кормовые миграции большинства океанических рыб связаны с течениями. Пришельфовые районы, особенно с крутыми склонами, способствуют подъему в зону шельфа глубинных вод, интенсивному вертикальному перемешиванию водных масс и возникновению районов высокой биологической продуктивности. Это, однако, приводит к значительным изменениям основных характеристик воды, влияющих на условия распространения звука, и может серьезно усложнять работу операторов гидролокаторов.

Нужно также иметь в виду, что в большинстве районов океана зависимость температуры воды от глубины в верхних слоях воды подвержена временной изменчивости с самой различной периодичностью в связи с попеременным их прогревом и охлаждением. Можно отметить сезонную, а в ряде районов месячную и суточную изменчивость температуры воды, что обуславливает так называемый послеполуденный эффект ухудшения работы аппаратуры горизонтального действия.

Температура воды оказывает наиболее сильное влияние на скорость звука, поэтому в верхних слоях, в которых, как правило, и располагаются источники и приемники акустических сигналов рыбопоисковых гидролокаторов, где температурные градиенты значительны, а влияние гидростатического давления довольно слабое, вертикальное распределение скорости звука аналогично вертикальному распределению

температуры с небольшим отклонением за счет солености. Ночью вода поверхностного слоя охлаждается и ее температура может быть даже несколько ниже температуры нижележащих слоев; у поверхности при этом появляется область с небольшим положительным градиентом. На глубине слоя скачка отрицательные градиенты c могут достигать $(3-5)10^{-3}$ 1/м, а общий перепад c в слое скачка — 30–40 м/с. Минимум c в умеренных широтах находится значительно ближе к поверхности, чем в тропических (не глубже 250–500 м).

Зимой в высоких широтах температурные градиенты очень малы. Градиент скорости звука во всей толще воды оказывается положительным, и c возрастает от поверхности до дна (рис. 11.30 а). В теплое время года верхние слои воды прогреваются и отрицательные температурные градиенты вблизи поверхности иногда оказываются достаточно большими, для того чтобы образовался неглубокий подводный звуковой канал ПЗК (рис. 11.30 б).

В среде с изменяющейся скоростью звука акустическая энергия распространяется не по прямым, а по искривленным лучам вследствие рефракции звука из-за преломления акустических лучей при переходе из одного слоя воды в другой, отличающийся скоростью распространения акустических волн.

На рис. 11.31 показаны реальные лучевые картины, полученные с помощью ЭВМ при различном изменении c с глубиной. В первом случае (рис. 11.31 а) источник расположен на глубине около 30 м, углы выхода лучей из источника составляют $0-9^\circ$ (показано девять лучей). На рис. 11.31 б представлена рефракционная картина распространения акустической энергии от источника, находящегося на глубине 15 м, при наличии изотермического слоя до глубины порядка 60 м. Лучи показаны через интервалы в 1° (от плюс 3 до минус 3°) с дополнительными траекториями лучей, выходящих под углами $-1,5$ и $-1,76^\circ$ [Urik, 1967].

На рис. 11.32 а, б, в, г, д изображены типичные рефракционные картины распространения лучей рыбопоискового гидролокатора при поиске рыбы в различные времена года в реальных промысловых районах у западного побережья Норвегии в Норвежском море (что типично для умеренных и северных широт Атлантики [Fish finding with sonar, 1964, 1969]. Летом, когда верхние слои воды имеют достаточно высокую температуру, быстро понижающуюся с глубиной, лучи гидролокатора из-за отрицательных градиентов c резко отклоняются вниз и реальная дальность обнаружения рыбы гидролокатором резко сокращается — так называемая «отрицательная» рефракция. Получаемая

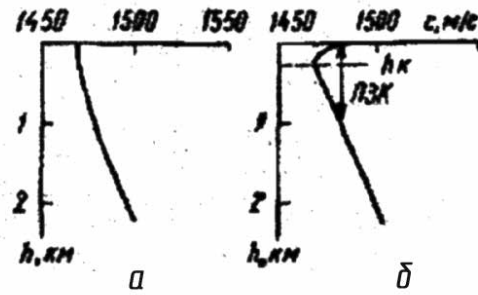


Рис. 11.30. Некоторые профили скорости звука [Акустика океана, 1974]:

а — для приполярных и полярных районов зимой; б — для тех же районов летом

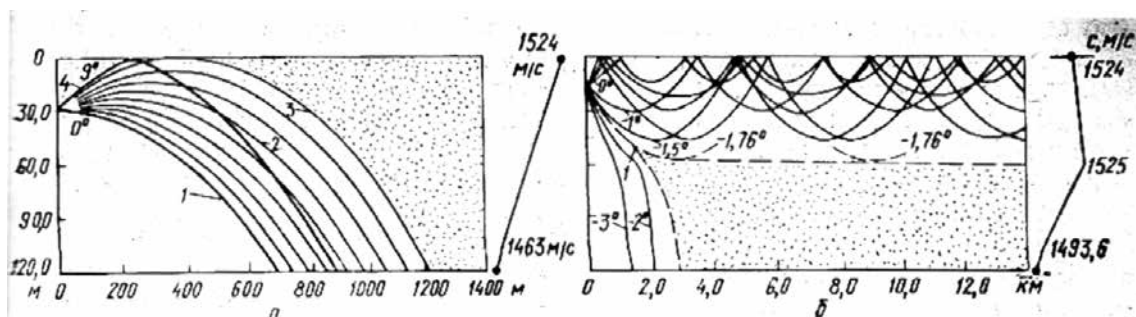


Рис. 11.31. Лучевые диаграммы при постоянном (а) и изменяющемся (б) градиенте c

дистанция обнаружения косяков, находящихся в поверхностных и приповерхностных слоях воды, часто не превышает нескольких сот метров вследствие появления большой зоны акустической тени (рис. 11.31 а и 11.32 а). Это нередко вызывает у эксплуатационников сомнения в исправности аппаратуры.

При этом ухудшаются и условия обнаружения придонных косяков, т. к. акустические лучи падают на дно под большими углами (более круто) и к антенне гидролокатора приходят более интенсивные донные эхосигналы. В результате имеет место более сильная маскировка полезных эхосигналов от придонной рыбы.

Осенью и ближе к зиме условия распространения звука значительно лучше, чем летом, однако неполное перемешивание холодных и теплых вод, наличие чередующихся холодных и теплых слоев воды может вызывать появление как приповерхностных звуковых каналов (увеличивающих возможности обнаружения рыбы в слоях воды, находящихся недалеко от ее поверхности), так и больших зон акустической «тени», а также загибание акустических лучей на сравнительно небольших дистанциях. Скорость звука вначале обычно увеличивается, обеспечивая появление акустического канала, затем уменьшается, что вызывает отклонение некоторых (нижних) лучей звукового пучка станции вниз. На рис. 11.32 б показано как лучи вначале отклоняются немного вверх (примерно до дистанции 1000 м), а затем идут круто вниз, что уменьшает дальность обнаружения косяков, находящихся на глубинах, превышающих несколько десятков метров. Положительные градиенты скорости звука в данном случае начинаются от самой поверхности воды (рис. 11.32 б). В теплых водах до глубин 50–100 м ночью также иногда

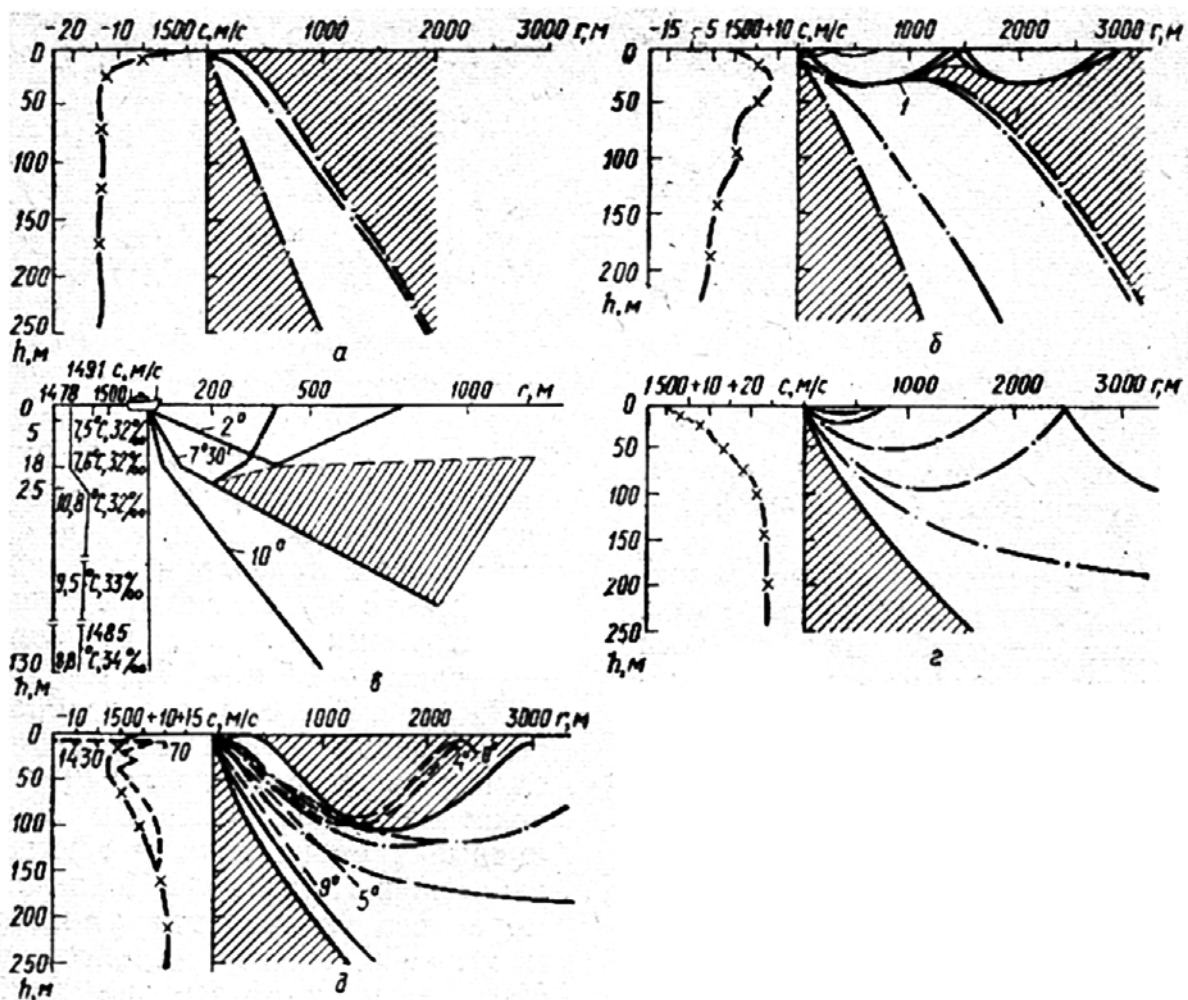


Рис. 11.32. Лучевые картины при сезонном изменении c :
 а — летом; б — осенью; в — в весенне-зимний период; г — зимой; д — весной

наблюдаются положительные градиенты скорости звука, но они малы и неустойчивы [Андреева, 1975].

При указанных условиях происходят существенная расфокусировка акустического пучка излучателя и образование значительных зон тени ниже слоя приповерхностного звукового канала. Некоторая засветка указанной зоны может происходить под влиянием рассеянной акустической энергии, поступающей от поверхности воды при волнении моря, и при проникновении звука из канала вследствие неидеальности его нижней границы. На рис. 11.31 б и 11.32 в видно, что в данном случае происходит «расщепление» звукового луча 1, испытывающего полное внутреннее отражение на границе слоя. Верхняя часть его изгибается по направлению к поверхности моря, а нижняя — ко дну, образуя зону тени, подобную зоне тени при отрицательной рефракции.

При таких условиях распространения звука оператор гидролокатора может при поддержании акустического контакта с небольшими судами и их кильватерными струями на значительных дистанциях не обнаруживать даже плотные и крупные косяки рыбы, находящиеся в толще водной среды, до приближения к ним судна на небольшое расстояние. Например, из лучевой картины, показанной на рис. 11.32 в, видно, что объекты, находившиеся в слое воды от поверхности до глубины 25 м, обнаруживались на больших расстояниях, а скопления скумбрии, располагавшиеся в основном на глубинах ниже 25–30 м фиксировались гидролокатором лишь на дистанциях до 300–400 м. В таких условиях отсутствие данных о фактическом характере распространения звука может сильно затруднять работу оператора.

Зимой дальность распространения акустической энергии бывает наибольшей. Наличие более холодных верхних слоев воды приводит к отклонению звуковых лучей вверх от более глубоких теплых слоев (см. рис. 11.32 г). Получается канальный эффект, но в большем диапазоне глубин, чем в случае приповерхностных каналов звука: звуковые лучи отражаются от поверхности воды, идут вниз в более теплые слои, затем снова отклоняются вверх и т. д.

Зимой распространение акустических лучей в умеренных и северных широтах по своему характеру подобно их распространению при наличии приповерхностных каналов звука, однако такой значительно более протяженный поверхностный канал захватывает существенно больший интервал углов выхода лучей (до 15–20°). Кроме того, в обычной зоне действия гидролокаторов значительно меньшее число лучей распространяется с отражением от поверхности (которая в общем случае приводит к большому затуханию звука, чем это имеет место при распространении только в водной среде), а также практически не наблюдается расфокусировка акустического пучка и отсутствуют зоны тени. В данном случае улучшаются и возможности обнаружения косяков у дна, так как при отражении звука от грунта больше звуковой энергии распространяется в сторону от судна. Все это и создает более благоприятные условия для работы аппаратуры при горизонтальной локации в указанный период.

Рефракционные картины распространения акустических лучей весной, как правило, наиболее сложны (для гидролокаторов с подкильными антеннами), что обусловлено различным расположением холодных и теплых слоев воды (см. рис. 11.32 д). Скорость звука c сначала понижается до некоторого минимума, а затем увеличивается (т. е. от поверхности до глубины, соответствующей минимуму скорости звука, простирается область отрицательных градиентов скорости звука). Ниже этого горизонта условия соответствуют положительной рефракции звуковых лучей, т. е. положительным градиентам скорости звука.

Луч, вышедший из источника, расположенного в точке, находящейся выше минимума скорости звука (где $c = c_0$), в горизонтальном направлении (см. рис. 11.32 д) сразу же отклоняется вниз (так как источник находится в области отрицательной рефракции). Этот луч пересечет ось минимума скорости звука c_k под некоторым углом $\beta_{к0}$

$$\cos \beta_{к0} = c_k / c_0,$$

где c_0 — скорость звука в слое нахождения источника звука.

Далее он проникает в нижние слои воды до некоторой глубины, на которой с вновь станет равной c_0 , направляется вверх, снова пересекает ось минимума скорости звука под углом $\beta_{к0}$, достигает глубины h_0 (h_0 — глубина источника), поворачивает вниз и цикл начинается сначала. Лучи, выходящие из источника под любыми другими углами, будут пересекать ось минимума c только под большими углами $\beta_{к}$ ($\cos\beta_{к} = \cos\beta_{к0}c_{к}/c_0$). Граница ближней освещенной зоны будет определяться таким же граничным лучом, как и в случае обычной отрицательной рефракции. При таких условиях возникает значительная зона тени от поверхности моря, захватывающая большой интервал глубин и располагающаяся в определенном диапазоне расстояний от источника. На рис. 11.32 д можно видеть такую зону тени на расстоянии от 500 до 3000 м и до глубины порядка 100 м, возникшую вследствие изменения скорости звука в пределах от 9 до 12 м/с (или менее 0,7%). В результате этого при поиске рыбы может быть получен контакт с целью на больших дистанциях (в примере 2500–3000 м и более), теряющийся при приближении к косяку на средние дистанции (в примере от 2500 до 700–800 м) и затем снова появляющийся на небольших дистанциях. В условиях, показанных на рис. 11.32 д пунктиром [Андреева, 1975], повторный контакт с косяком, находящимся в приповерхностном слое (после первоначального обнаружения его на дистанции около 2000 м и более), будет получен лишь после того, как судно подойдет к нему почти вплотную. В этот период от операторов требуются очень большое внимание и натренированность. Особенно большие подобные зоны тени появляются в это время года при штилевой погоде. При волнении моря и после шторма в этом случае могут создаваться лучшие условия для распространения звука благодаря перемешиванию слоев.

Рассмотрим влияние изменения положения акустической антенны по глубине на возможности аппаратуры при одном и том же характере изменения c (рис. 11.33 а).

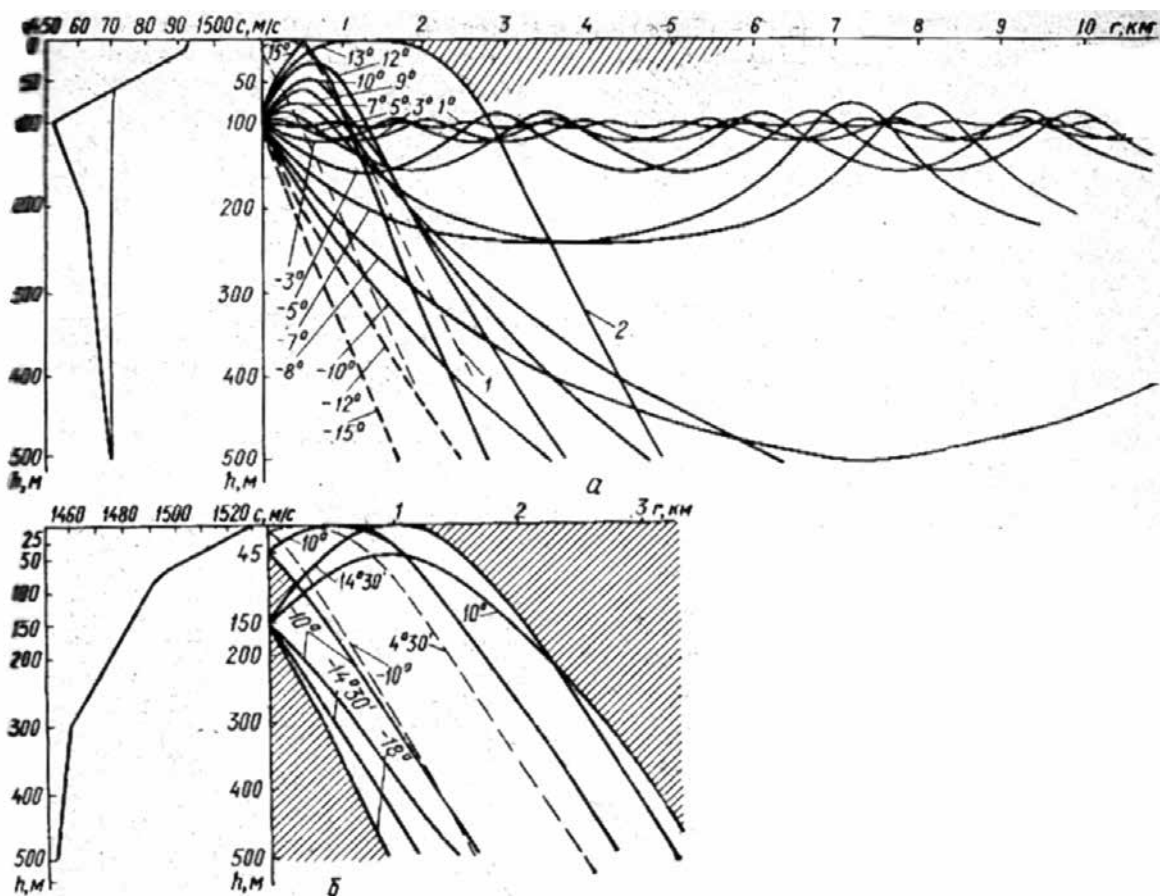


Рис. 11.33. Влияние погружения антенны на условия распространения звука: а — при наличии ПЗК, б — в условиях отрицательной рефракции

На рис. 11.33 *a* показаны лучевые картины, полученные при заглублении излучателя на ось минимума с (на ось ПЗК). В этом случае часть лучей захватывается звуковым каналом — канализуется, благодаря чему увеличивается дальность обнаружения рыбы в районе канала.

Кроме того, существенно отодвигается граница зоны тени, т. е. возрастает ближняя освещенная зона в результате увеличения углов выхода лучей до граничного угла (см. рис. 11.33 *a*, луч 2 вместо луча 1). Для сравнения освещаемых зон пунктиром показаны границы зоны освещенности при подкильной установке излучателя (т. е. вблизи поверхности). Таким образом, изменяя положение излучателя по глубине, можно существенно расширить тактические параметры рыболокационной аппаратуры дальнего действия в условиях наличия ПЗК, тогда как для подкильных источников колебаний указанные условия соответствуют отрицательной рефракции. Дальность обнаружения в условиях ПЗК: при нахождении источника на его оси — в 1,5–2 раза превышает энергетическую дальность, тогда как при расположении того же излучателя у поверхности дистанция обнаружения в приведенном примере составляет не более 1 м. Ближняя освещенная зона при заглублении источника также может быть увеличена в 2–3 раза.

На рис. 11.33 *б* можно видеть, как в условиях отрицательной рефракции сильно изменяются возможности обнаружения скоплений, находящихся в приповерхностных слоях, в зависимости от степени заглубления антенны гидролокатора.

Условия распространения звука и, следовательно, дальность обнаружения рыбы гидролокатором, могут существенно изменяться в течение короткого периода времени даже в пределах ограниченного района моря. Так, при рассмотрении реальных лучевых картин, построенных во время работы с гидролокатором фирмы «Симрад» в Северном море летом 1966 г. (рис. 11.34), видно сильное изменение его геометрической дальности действия на протяжении 3 сут при промысле примерно в одном районе моря [Fish finding with sonar. Part 4.1970].

В связи с этим операторам гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры горизонтального действия важно знать условия распространения акустических колебаний в процессе работы аппаратуры, чтобы не теряться при внезапных пропадающих эхосигналов, принимаемых, от обнаруженных скоплений, в случае попадания их в зону акустической тени, правильно оценивать и анализировать эхосигналы, обоснованно выбирать диапазоны действия гидролокатора и т. д. Это определяет необходимость регуляр-

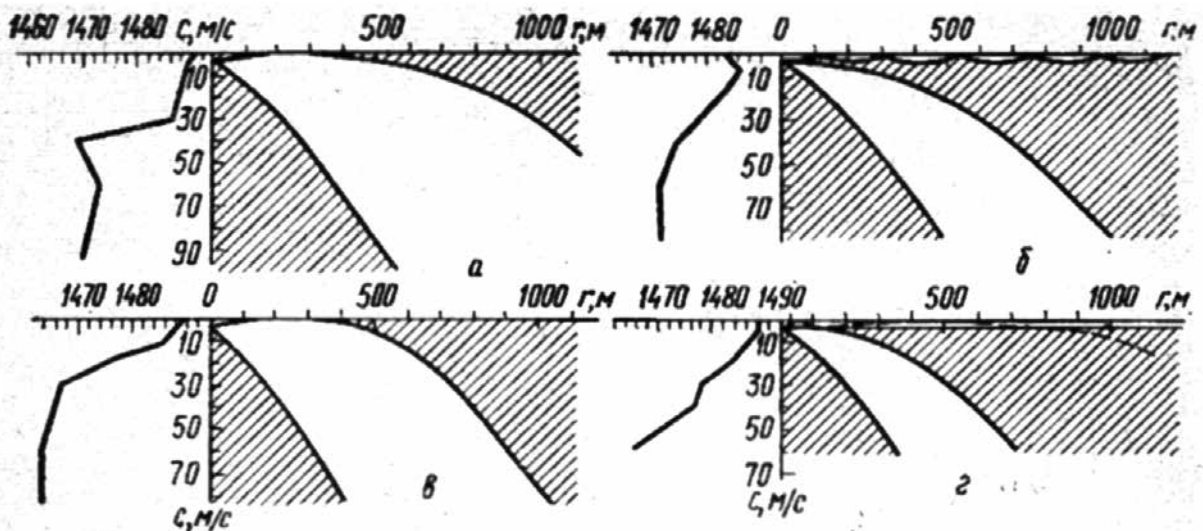


Рис. 11.34. Примеры изменения условий распространения звука летом [Fish finding with sonar. Part 4]:
a — 21.06.66 г. в 20 ч 40 мин $\varphi = 57^{\circ} 26'$, $\lambda = 06^{\circ} 34'$; *б* — 22.06.1966 г. в 08 ч 00 мин, ($\varphi = 58^{\circ} 00'$, $\lambda = 05^{\circ} 00'$); *в* — 22.06.1966 г. в 15 ч 00 мин район 20 миль от Егероуа; *г* — 23.06.66 г. в 05 ч 30 мин, $\varphi = 57^{\circ} 47'$, $\lambda = 04^{\circ} 35'$.

ной оценки условий распространения звука в районах промысла [Кудрявцев, 1976, 1977 а, 1977 б, 1978, 1979 а, 1979 б].

Перед началом работ с рыбопоисковым гидролокатором необходимо проанализировать гидрологические условия в обследуемом районе для оценки возможной дальности обнаружения им скоплений установленным на судне гидролокатором. Построение лучевых картин на основании данных о температуре и солености морской воды не вызывает серьезных затруднений. В случае произвольного профиля $c(h)$ построение лучей осуществляется путем разбивания среды горизонтальными плоскостями на слои, в каждом из которых градиент скорости звука считается постоянным и, следовательно, реальная кривая распределения скорости звука c аппроксимируется ломаной линией (рис. 11.35 а) [Шташкевич, 1966]. В этом случае траекторию луча в каждом слое можно представить в виде дуги окружности радиусом R_i :

$$R_i = c_i / G_{ci} \cos \beta_i = c_i / G_{ci}$$

где G_{ci} – градиент скорости звука в i -м слое [$i=1, 2, 3, 4, 5$ (см. рис. 11.44 а)]; c_i – скорость звука, при которой луч горизонтален; β_i – угол входа лучей в i -й слой (угол скольжения).

Траекторию луча, проходящего через всю толщу воды, можно представить как сопряжение дуг окружностей (траекторий луча), определенных для каждого слоя в отдельности (рис. 11.35 б). Для сопряжения дуг достаточно знать горизонтальное расстояние Δr_i , которое для первого слоя равно дистанции между осью h и точкой сопряжения, для последующих слоев – между ближайшими точками сопряжения дуг. Расстояние Δr_i до первой точки сопряжения A равно:

$$\Delta r_1 = R_1(\sin \beta_1 - \sin \beta_0),$$

где β_0 – угол входа лучей в первый слой; β_1 – угол выхода луча из первого слоя (под этим же углом луч входит во второй слой).

Выражения расстояний до последующих точек аналогичны:

$$\Delta r_2 = R_2(\sin \beta_2 - \sin \beta_1); \Delta r_3 = R_3(\sin \beta_3 - \sin \beta_2); \Delta r_i = R_i(\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1}).$$

Здесь:

$$R_i = c_i / G_{ci} \cos \beta_i; G_{ci} = \Delta c_i / \Delta h_i.$$

где $\Delta c_i = c_i - c_{i-1}$ – перепад скорости звука в i -м слое; Δh_i – толщина i -го слоя.

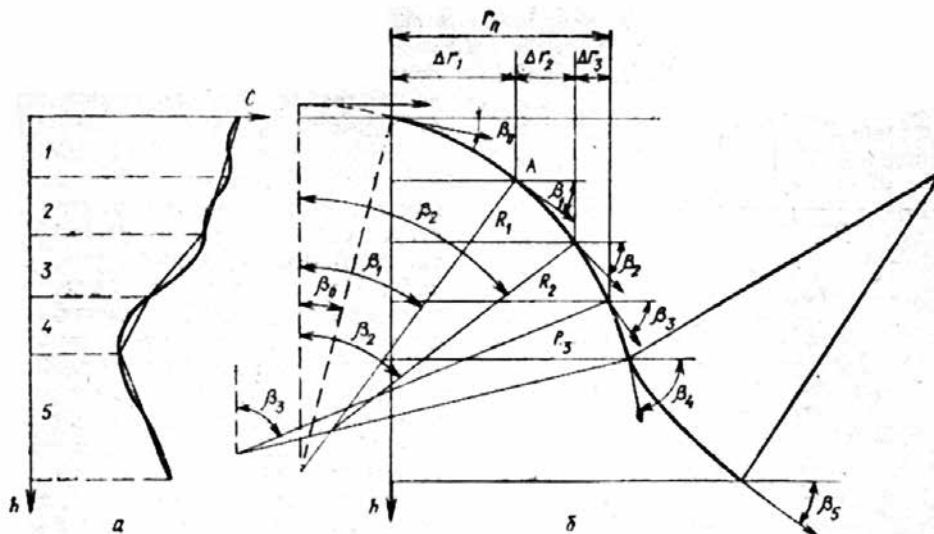


Рис. 11.35. К построению траектории акустического луча для любого распределения c : а – распределение c ; б – построение траектории

Тогда

$$\Delta c_i = (c_r \Delta h_i / \Delta c_i) \times (\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1}) \quad (11.1)$$

или

$$\Delta r_i = (c_r / G_{ci}) \times (\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1}) \quad (11.2)$$

Формулу (3.1) можно представить в виде

$$\Delta r_i = \frac{\Delta h_i}{\frac{c_i - c_{i-1}}{c_2}} (\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1}).$$

Поскольку $c_i / c_r = \cos \beta_i$; $c_{i-1} / c_r = \cos \beta_{i-1}$, то

$$|\Delta r_i| = \Delta h_i \frac{\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1}}{\cos \beta_i - \cos \beta_{i-1}} = \Delta h_i \frac{\cos \frac{\beta_i + \beta_{i-1}}{2}}{\sin \left(\frac{\beta_i + \beta_{i-1}}{2} \right)};$$

$$|\Delta r_i| = \frac{\Delta h_i}{\operatorname{tg} \left(\frac{\beta_i + \beta_{i-1}}{2} \right)}.$$

Полное расстояние до i -й точки сопряжения будет равно

$$r_{ii} = \frac{c_r \sum_{i=1}^n \Delta h_i}{\operatorname{tg} \left(\frac{\beta_i + \beta_{i-1}}{2} \right)}. \quad (11.3)$$

При малых углах β_i для r_{ii} получим приближенное равенство

$$r_{ii} = \frac{\sum_{i=1}^n 2 \Delta h_i}{(\beta_i + \beta_{i-1})}.$$

Выражение для полного расстояния r_{ii} можно получить также, используя выражение (11.2):

$$r - r_{ii} = c_r \sum_{i=1}^n (\sin \beta_i - \sin \beta_{i-1}). \quad (11.4)$$

Вычислив по формуле (11.3) или (11.4) значения r_1, r_2, \dots и откладывая эти величины на графике вдоль границы раздела между слоями, легко построить траекторию луча, проходящего через всю толщу воды; r_{ii} можно быстро определить с помощью номограммы (рис. 11.36), по нижней линейке которой находят отклонение луча от горизонтального направления, соответствующее заданному Δc_2 . Например, если $\Delta c_{ri} = 1$ м/с, то этому изменению скорости звука, как видно из номограммы, соответствует отклонение луча от горизонтального направления на угол $\beta \approx 2^\circ$. Перепад скорости звука при пользовании данной номограммой следует отсчитывать от c_r , при которой луч горизонтален ($\Delta c_{ri} = c_r - c_i$). Пусть задано, что источник помещен в слое, где скорость звука $c_i = 1495$ м/с, и требуется построить траекторию луча, выходящего из источника под

углом $\beta_0 = 10^\circ$. Для этого необходимо прежде всего найти c_r . С помощью нижней линейки номограммы находим, что углу β_0 соответствует $\Delta c_{r1} = 22,5$ м/с. Следовательно, $c_r = c_1 + \Delta c_{r1} = 1517,5$ м/с.

Далее пусть требуется найти расстояние r_1 от вертикали, проходящей через источник звука, до точки пересечения луча с границей между первым и вторым слоем (расстояние до первой точки сопряжения). Если при этом задано, что толщина первого слоя, отсчитываемая от уровня источника, Δh_1 , равна 50 м, а перепад скорости звука в этом слое Δc составляет 10 м/с (скорость звука с глубиной уменьшается), то по перепаду скорости звука, отсчитываемому от c_r , находим $\Delta c_{r1} = 32,5$ м/с, а по линейке номограммы — $\beta_1 = 12^\circ$ (под углом β_1 луч покидает первый слой). Далее находим $(\beta_0 + \beta_1)/2 = 11^\circ$; на номограмме по вертикальной оси отложены значения $(\beta_i + \beta_{i-1})/2$.

Наклонные линии на номограмме соответствуют толщинам слоев, а горизонтальные — расстояниям Δr_i (в м). Таким образом, от метки на вертикальной шкале, соответствующей 11° , идем по горизонтали до наклонной линии с надписью 50, а от точки пересечения с ней опускаемся вниз и отсчитываем $\sim \Delta r_1 = 250$ м [Сташкевич, 1966].

Величина скорости звука при известных температуре и солености может быть определена по номограмме (рис. 11.37). Поправка за счет глубины h может быть учтена дополнением слагаемого, равного $0,0175h$ (h в м). Существенную помощь при получении лучевых картин могут оказать электронные построители и индикаторы траекторий акустических лучей, позволяющие производить быстрый расчет. Их работа основана на аппроксимации плавных изменений скорости звука с глубиной прямолинейными дискретными отрезками.

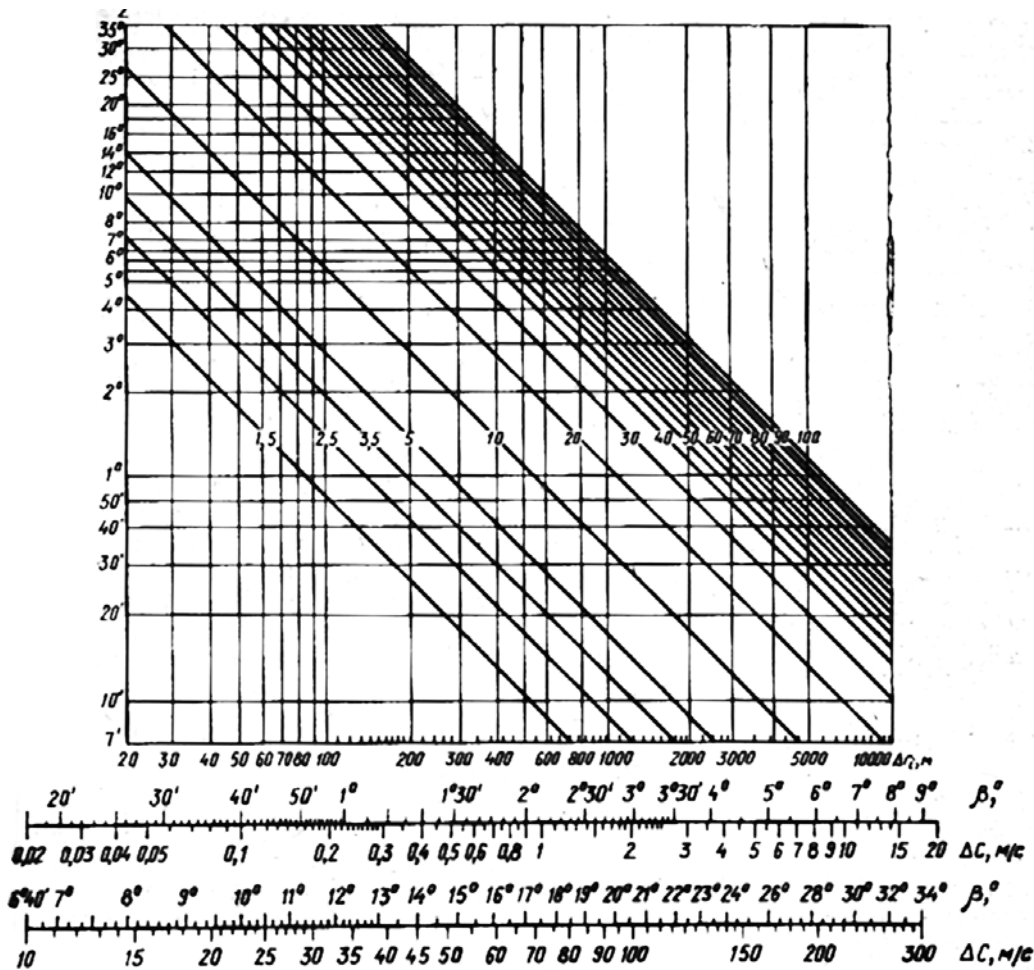


Рис. 11.36. Номограммы для определения параметров траектории луча.

На рис. 11.38 показаны два изображения с экрана индикатора такого построителя с угловым расстоянием между ними, равным $0,5^\circ$. На рис. 11.38 *а* представлен типичный «летний» профиль скорости звука в Средиземном море, а на рис. 11.37 *б* и *в* — траектории акустических лучей антенны с шириной характеристики направленности 10° (вертикальная шкала изображения на рис. 11.37 равна 375 м, горизонтальная — 9 км) с угловым расстоянием между ними, равным $0,5^\circ$. Путем соответствующей установки органов управления с помощью подобной аппаратуры может быть быстро оценен характер распространения акустических колебаний в данном районе при различных углах наклона акустической антенны, ее характеристик направленности, глубин погружения при использовании буксируемых носителей и т. д. Общее количество траекторий на экране, определяется шириной характеристики направленности антенны.

На рис. 11.38 *в* видно, что при данном профиле скорости звука антенна, буксируемая на глубине 375 м, позволяет получать лучшие условия распространения звука по сравнению с подкильной (рис. 11.38 *б*).

Некоторые ученые при исследовательских работах с рыбопоисковыми гидролокаторами обязательно используют лучевые картины распространения акустических колебаний [см., например, Trevorrow, Farmer, 1997]. В районах с изменяющимися гидрологическими характеристиками, особенно весной и осенью, целесообразна постоянная периодическая корректировка лучевых картин для своевременного учета колебаний дальностей действия рыбопоисковых гидролокаторов. Эти данные необходимы для выбора диапазона работы аппаратуры и при анализе результатов исследований.

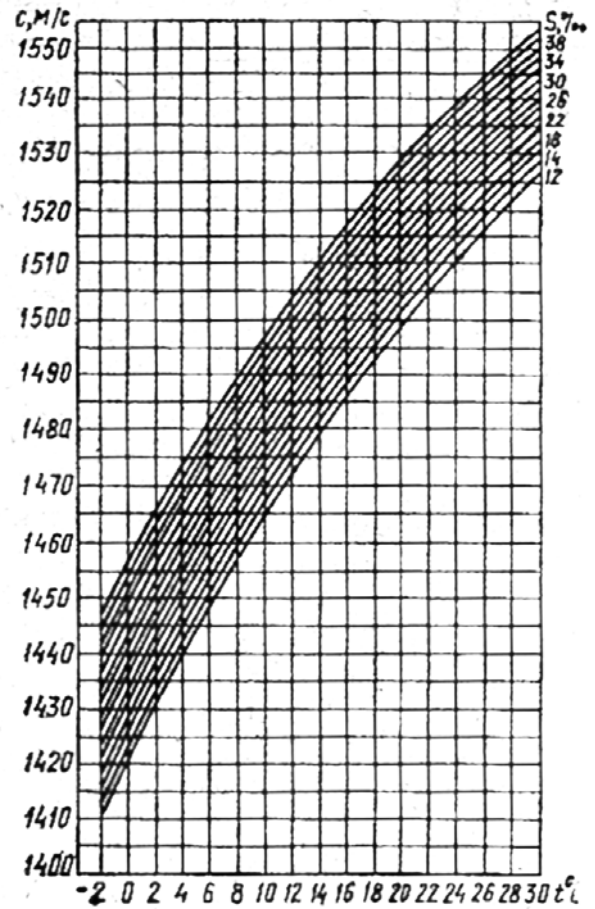


Рис. 11.37. Номограмма для определения c

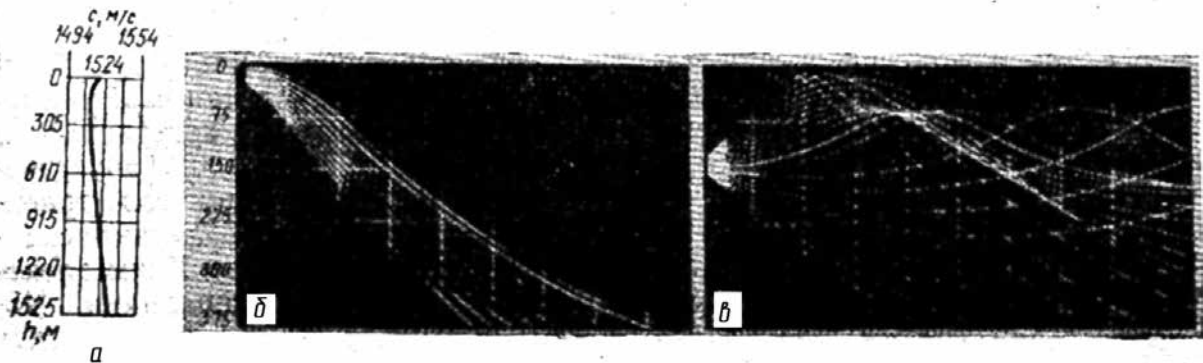


Рис. 11.38. Пример лучевых картин, полученных с помощью электронных построителей на ЭВМ: *а* — типичный «летний» профиль скорости звука (слева), *б* — диаграммы лучей при подкильном расположении акустических антенн и нахождении их на глубине 375 м

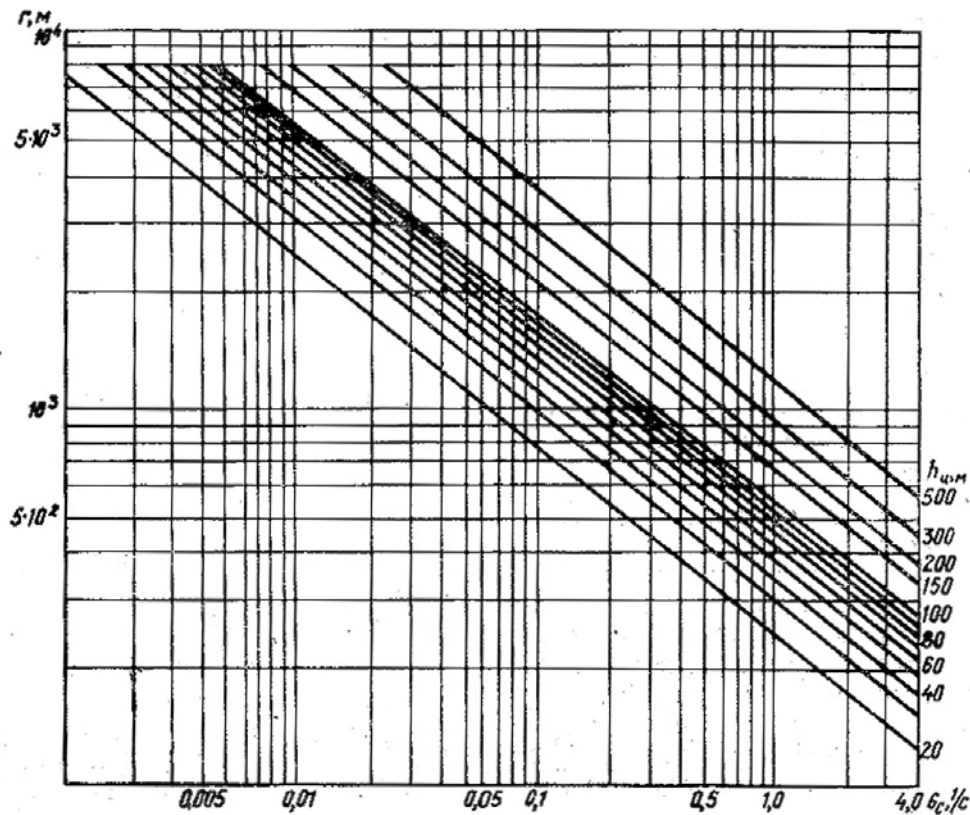


Рис. 11.39. Номограмма для определения дальности обнаружения гидролокатора при отрицательной рефракции.

Многие рыбопромысловые суда в настоящее время оборудованы телеметрической аппаратурой контроля параметров орудий лова и подводной обстановки в зоне их действия с измерителями температуры [Кудрявцев, 1972, 1978], позволяющими получать температурные разрезы. По данным таких разрезов лучевые картины распространения акустических колебаний могут быть построены и судовыми операторами с достаточной для практики точностью, т. к. температура оказывает доминирующее влияние на распространение звука при горизонтальной и наклонной локации.

В случае отрицательной рефракции геометрическая дальность обнаружения объектов, располагающихся в определенном диапазоне глубин, при известном модуле градиента скорости звука G_c (с достаточной для практики точностью) может быть определена с помощью номограммы, представленной на рис. 11.39. G_c определяется по данным вертикального распределения температуры с помощью формулы

$$|G_c| = (4,206 - 0,073t_{cp}) \Delta t / \Delta h,$$

где Δt — разность температур на глубинах расположения антенны h_a и цели $h_{ц}$, °C; t_{cp} — температура воды на средней глубине, равной $\Delta h = (h_{ц} - h_a) / 2$ (м), °C.

Из номограммы можно видеть, что в условиях отрицательной рефракции для обнаружения целей, находящихся у поверхности воды на дистанциях более 1000 м, необходимы $|G_c|$ менее 0,05 1/с. Пользуясь указанной номограммой, можно решать и обратные задачи (определять любой из трех параметров по двум известным).

11.3.2. Методы оценки дальности действия рыбопоисковой аппаратуры горизонтальной локации

При отсутствии данных об условиях распространения звука в районе работы судна или благоприятных гидрологических условиях используют и некоторые другие методы

определения дальности действия гидроакустической рыболокационной аппаратуры. Оценка дальности действия гидролокатора может проводиться по длительности реверберации, которая определяется по отображению ее на экране дисплея или по продолжительности послезвучания в слуховом индикаторе. При большой длительности эхо реверберации отмечается на всей ширине экрана дисплея. При волнении моря длительность реверберации в сильной степени зависит от наклона характеристики направленности антенны: при небольшом ее отклонении вверх длительность реверберации значительно увеличивается, при отклонении вниз — существенно уменьшается, т. к. характеристика направленности лишь частично захватывает волнующуюся поверхность воды и эхосигналы принимаются только от слабых рассеивателей в толще водной среды. Тон слышимого эха реверберации на движущемся судне изменяется при повороте акустической антенны относительно курса судна (повышается при зондировании в носовых курсовых углах и понижается при зондировании в кормовых). С увеличением длительности реверберации возрастает возможная дальность обнаружения рыбы. Нерегулярность реверберации на эхограммах связана обычно с качкой судна. В ряде случаев разреженные рыбные скопления («поля») могут вызывать реверберационно подобные эхосигналы.

Возможная дальность действия гидролокатора может определяться при локации искусственных целей. Периодическая проверка аппаратуры по искусственным целям важна также для контроля основных параметров станций, т. к. при длительной эксплуатации аппаратуры в тяжелых условиях фактические значения этих параметров могут оказаться значительно ниже номинальных из-за возможных изменений технических характеристик гидролокатора, условий его работы (обрастания поверхностей антенн, их обтекателей), а также условий обтекания подводных поверхностей судна, уменьшения к. п. д. антенн из-за старения пьезокерамики, снижения сопротивления изоляции.

Для правильной оценки работы приборов, сравнения их поисковых возможностей и получаемых результатов проверка должна проводиться по стандартным целям, например, по акустическому уголкового отражателю. В качестве стандартной цели при разработке и испытаниях гидролокационной аппаратуры может использоваться уголкового отражатель. Периодическая проверка работы гидролокатора по искусственной цели целесообразна также для тренировки в его практическом использовании.

Проверка проводится следующим образом. С борта судна в воду опускают уголкового отражатель несложной конструкции на тросе с плавучим бумом. К отражателю крепят груз для удержания его в вертикальном положении. При необходимости на плавучем буме может быть установлен радиолокационный отражатель. После установки цели судно отходит от нее, затем проверяется максимальная дальность обнаружения цели на различных курсовых углах при разных скоростях судна, возможность регистрации цели при работе в кормовом секторе судна, через кильватерную струю, а также при других возможных маневрах судна [Кудрявцев, Щербино, 1976]. Так как цель близка к точечной, сближение с ней целесообразно начинать на малых скоростях судна. После установления контакта с целью ход судна увеличивают до максимального в поисковом режиме. Для получения более достоверного результата оценку дальности обнаружения необходимо повторять несколько раз.

Даже при постоянстве технических параметров гидролокационных станций дальность обнаружения ими промысловых объектов подвержена очень большим изменениям из-за значительных колебаний условий распространения звука в воде. Знание фактических значений этой важной тактической характеристики аппаратуры позволяет судоводителю-оператору более правильно подходить к выбору методики и галсов поиска с учетом просмотра водной среды на всем требуемом участке моря без пропусков.

При благоприятных гидрологических условиях возможная дальность действия гидролокатора будет определяться в основном его энергетическими и другими техническими параметрами. В случае отсутствия условий для проверки гидролокатора по искусственным целям (например, перед выходом судна в рейс) ожидаемая дальность обнару-

жения им объектов лова может быть определена на основании данных измерений технических характеристик аппаратуры.

Такую оценку можно выполнить по методу, основанному на использовании графического решения основного уравнения гидролокации, выраженного в логарифмической форме [Кобяков и др., 1986]. Как известно,

$$\frac{P_a \gamma R_s^2}{16\pi r^4 10^{0,2\beta r}} = I_s = \frac{P_{эфф.э}^2}{\rho c} = \delta^2 I_n = \sigma \frac{P_{эфф.п}^2}{\rho c}$$

или

$$\sqrt{P_a \gamma \frac{\rho c}{4\pi} \cdot \frac{R_s}{2} \cdot \frac{1}{r^2 \cdot 10^{0,1\beta r}}} = \delta p_{эфф.п},$$

где P_a – излучаемая акустическая мощность; γ – коэффициент концентрации антенны; R_s – радиус эквивалентной сферы (шара); ρc – акустическое сопротивление среды; r – дальность действия; β – коэффициент пространственного затухания звука; I_s – интенсивность эхосигнала; $p_{эфф.э}$ – эффективное значение звукового давления эхосигнала; δ – коэффициент распознавания; I_n – интенсивность помех; $p_{эфф.п}$ – эффективное значение звукового давления помех.

Так как контролируемой и измеряемой величиной гидроакустической аппаратуры активного действия является создаваемое ею акустическое давление, акустическую мощность P_a необходимо выразить через этот параметр. Выражение

$$\sqrt{P_a \gamma \frac{\rho c}{4\pi}} \equiv (\text{примерно равно}) p_{эфф} (1 \text{ м}),$$

т. е. приведенному акустическому давлению, создаваемому излучателем на расстоянии 1 м от его поверхности в направлении излучения.

Коэффициент распознавания δ определяется из выражения

$$\delta = \frac{\sqrt{2}K_\delta}{\sqrt{\Delta f T}},$$

где K_δ – коэффициент надежности приема, т. е. минимально допустимое отношение звукового давления сигнала к звуковому давлению помехи на входе устройства воспроизведения; Δf – полоса пропускания приемного тракта; T – время усреднения сигнала, принимаемое на практике равным длительности излучаемого импульса (Δf считается согласованной с длительностью импульса).

Акустическое давление помех $p_{эфф.п}$ (Па) на рабочей частоте f (кГц) и в полосе пропускания приемного тракта Δf (Гц) определяется как

$$p_{эфф.п} = \frac{p_{н.с.}}{f} \sqrt{\frac{\Delta f}{\gamma}},$$

где $p_{н.с.}$ – звуковое давление помех, приведенное к стандартным условиям ($f=1$ кГц, $\Delta f=1$ Гц, $\gamma=1$).

С учетом изложенного выше можно получить выражение

$$p_{эфф} (1\text{м}) = \frac{R_s}{2} \cdot \frac{1}{r^2} 10^{0,1\beta r} = \frac{\sqrt{2}K_\delta p_{н.с.}}{f \sqrt{\gamma T}}.$$

После логарифмирования получаем следующее уравнение:

$$20 \log p_{\text{эфф}(1\text{м})} + 20 \log(R_{\text{э}}/2) - 20 \log K_{\delta} - 20 \log p_{\text{п.с.}} + \\ + 20 \log f + 10 \log T + 10 \log \gamma - 3 = 40 \log r + 2\beta r,$$

где $20 \log p_{\text{эфф}(1\text{м})}$ — уровень источника звука SL.

Данное уравнение решается с помощью графика потерь распространения акустических колебаний в зависимости от рабочей частоты и дистанции до лоцируемого объекта [Кобяков, Кудрявцев Н.Н., 1978; Кудрявцев В.И., 1979]. Указанный график и номограммы для определения величин, входящих в левую часть уравнения, приведены на рис. 11.40 и 11.41.

Ниже приводится пример использования указанного графика и номограммы. Требуется определить дальность действия гидролокатора при работе с характеристикой направленности $9^\circ \times 14^\circ$ и следующих значениях его параметров: $p_{\text{эфф}(1\text{м})} = 1,84 \cdot 10^8$ Па; $K_{\delta} = 2$; $f = 19,7$ кГц; $T = 10$ мс, для $R_{\text{э}} = 2$ м и $p_{\text{п.с.}} = 0,05$ Па.

Величины γ и $10 \log \gamma$ определяют по номограмме (см. рис. 11.41 а) проведением прямой линии через точки $\theta_{\text{в}} = 14^\circ$ и $\theta_{\text{г}} = 9^\circ$ и отсчетом значений в точке пересечения этой линии со средней шкалой (в данном случае $10 \log \gamma = 23,7$ дБ). Этой же номограммой с достаточной для практической оценки точностью (с погрешностью $\sim 4\%$) можно пользоваться и для определения γ антенн с круглой апертурой, при этом принимается

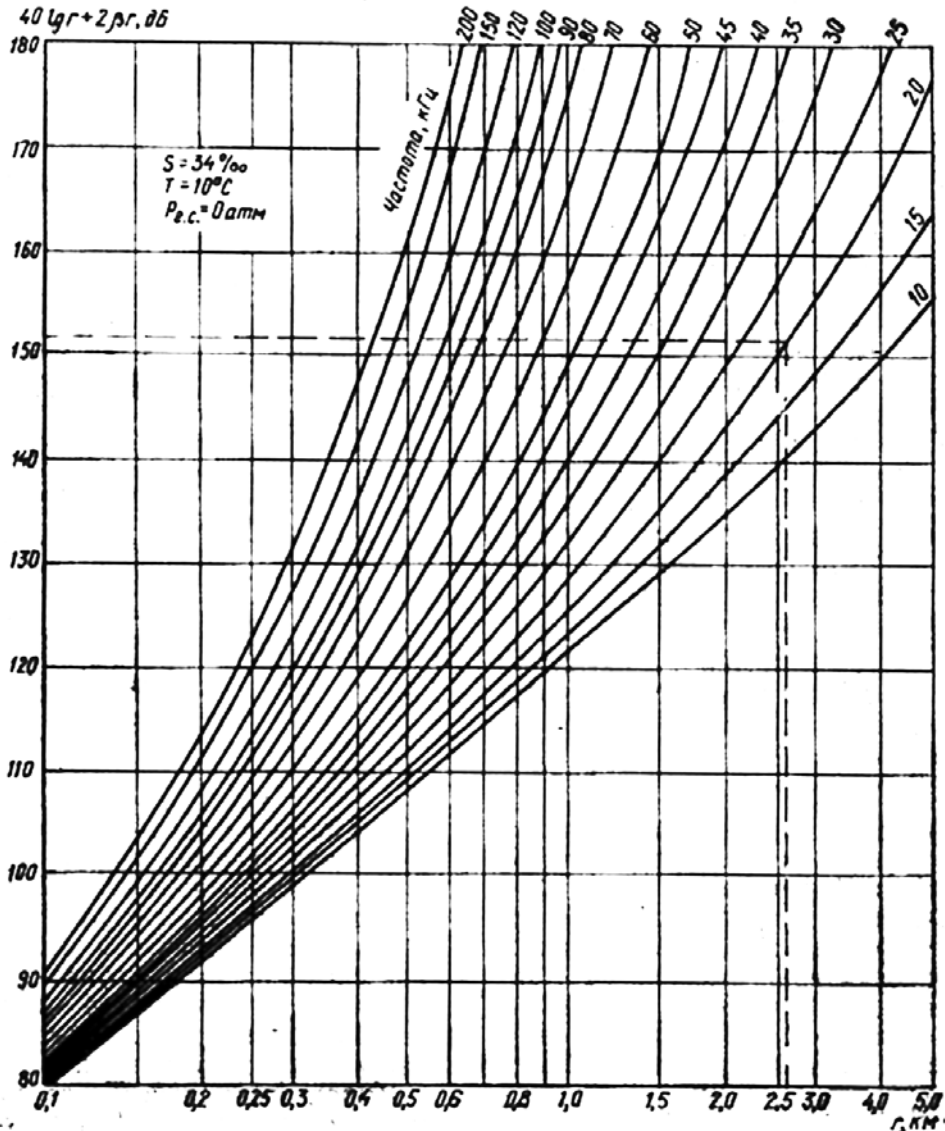


Рис. 11.40. График потерь распространения звука в зависимости от f и r

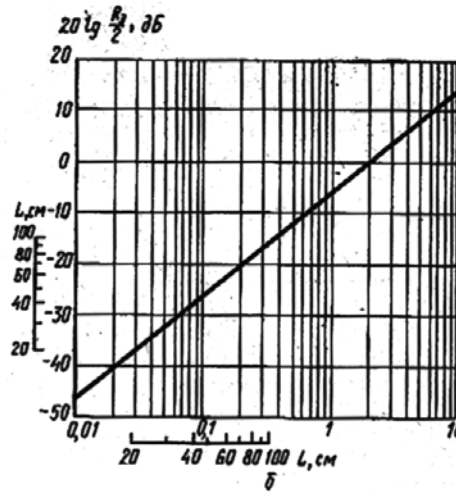
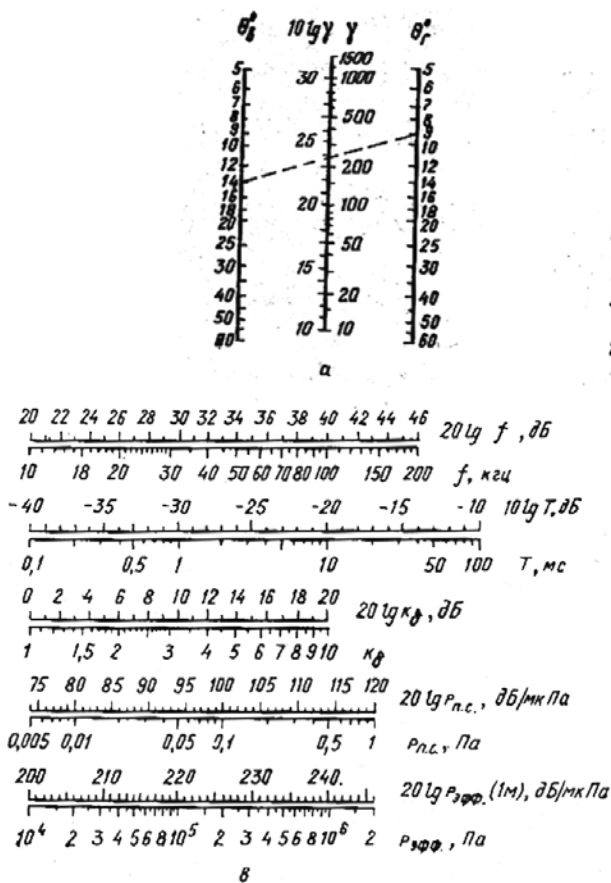


Рис. 11.41. Номограмма определения γ в зависимости от ширины характеристики направленности антенны в горизонтальной θ_r и вертикальной θ_v плоскостях на уровне 0,7 (а); зависимость силы цели от R_s (б) (R_s — по оси абсцисс в м, L — длина рыбы) и номограммы для перевода f , T , K_d , $p_{н.с.}$ и $p_{эф}$ (в дБ) (в).

$\theta_r = \theta_v = \theta_{крт}$. Величину $20 \log R_s/2 = TS$ (сила цели) определяют из графика (рис. 11.41 б), а остальные — по номограммам (рис. 11.41 в) путем непосредственного отсчета по двойным шкалам. В качестве опорного звукового давления принято звуковое давление, равное 1 мкПа. В результате расчета по номограммам получают 151,7 дБ = $40 \log r + 23r$. На графике (рис. 11.40) по вертикальной оси откладывают 151,7 дБ, проводят через эту точку горизонтальную линию до пересечения с кривой 20 кГц и получают в данном случае расстояние, равное 2,6 км.

Звуковое давление гидролокаторов определяют с помощью калиброванных гидрофонов. Гидрофон опускают в воду на глубину, соответствующую расположению акустической антенны станции. Расстояние между гидрофоном и антенной гидролокатора не должно быть меньше дистанции, определяемой по формуле:

$$r \geq (2D^2/\lambda),$$

где D — максимальный размер антенны.

При проверке аппаратуры на судне указанное условие обычно выполняется достаточно легко. Разворачивая акустическую систему и поднимая или опуская в небольших пределах гидрофон, добиваются получения максимального значения сигнала на выходных устройствах измерительной установки.

Серьезное влияние на дальность действия гидролокаторов могут оказывать подводные течения, изменяющие температурные режимы в районе промысла. При волнении моря характеристику направленности прибора несколько отклоняют вниз для снижения уровня поверхностной реверберации. В режиме поиска гидролокатором с одной характеристикой направленности обычно включают устройство ее автоматического сканирования в выбранном секторе обзора.

11.3.3. Обнаружение рыб у дна

Рассмотренные выше устройства (типа «отсечки» грунта и др.) расширяют возможности эхолотаторов в части обнаружения и индикации рыбы у дна только в том случае, если эхосигналы от объектов лова поступают на антенну и в приемный тракт аппаратуры раньше прихода эха от грунта. Если же эхо от рыбы приходит на фоне отраженных сигналов от дна, указанные устройства в большинстве случаев не могут выделить полезную информацию, поэтому даже при их применении не всегда обеспечивается получение фактической картины распределения рыбы у грунта в районе поиска.

Рассмотрим дополнительные ограничения, имеющие место у рыбопоисковой аппаратуры вертикального действия при обнаружении придонных объектов лова. Маскировка показаний придонной рыбы происходит, прежде всего, из-за сферического фронта падающей акустической волны [Юданов, 1967]. Пусть импульс, излученный антенной эхолотатора, падает на абсолютно ровное дно, находящееся на глубине h (рис. 11.42). Как видно из рис. 11.42 *a*, эхолотатором могут быть зарегистрированы эхосигналы лишь от объектов, находящихся выше дуги СВЕ. Эхосигналы от рыбы, расположенной ниже этой дуги, не будут видны на экране дисплея аппаратуры, т. к. эхосигналы от них принимаются на фоне значительно более сильных отраженных сигналов от грунта. Если рыба находится, например, в слое воды Δh , то могут быть отображены только эхосигналы от рыбы, находящейся в пределах сегмента СЕ, т. е. ширина просматриваемой зоны D_1 , может быть определена из треугольника АСF:

$$D_1 = 2\sqrt{AC^2 - AF^2} = 2\sqrt{h^2 - (h - \Delta h)^2} = 2\sqrt{2\Delta h h - h^2}.$$

При $\Delta h \ll h$ $D_1 \sim \sqrt{2\Delta h h}$.

Таким образом, ширина просматриваемой зоны D_1 в случае нахождения рыбы в придонном слое Δh при ширине характеристики направленности эхолотатора больше α не зависит от ширины характеристики, а определяется только глубиной места и положением рыбы относительно грунта. Чем ближе к дну находится рыба, тем уже зона, с которой может быть получена информация о наличии рыбы в придонном слое (рис. 11.42). Она несколько расширяется при данном Δh с увеличением глубины. Например, при $\Delta h = 1$ м и $h = 100$ м $D_1 = 28,2$ м; при $h = 200$ м, $D_1 = 40$ м; при $h = 500$ м $D_1 = 66$ м; при $h = 1000$ м $D_1 = 88$ м. Эффективный угол поиска определяется из того же треугольника АСF:

$$\cos \alpha/2 = h - \Delta h/h.$$

Эффективные углы поиска для разных Δh и h приведены в табл. 11.1 [Юданов, 1967].

Как видно из табл. 11.1, эффективные углы поиска придонной рыбы имеют весьма малые значения, особенно с увеличением глубины места, и характеристики направленности (ХН) большинства эхолотаторов в основном превосходят их. Следовательно, ког-

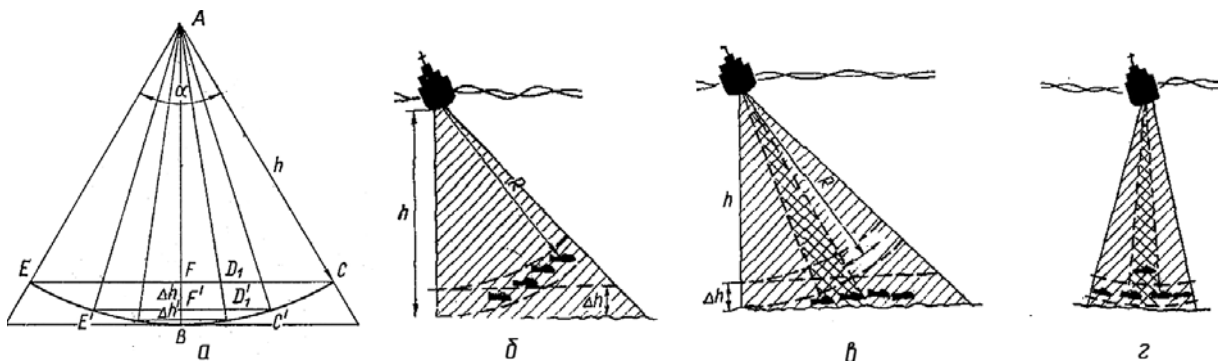


Рис. 11.42. Схема обнаружения придонной рыбы (*a*), неопределенность в оценке отстояния рыбы от дна при широкой характеристике (*b*) [Эллис, 1968], при узкой (*в*), при узкой стабилизированной (*г*)

Таблица 11.1. Эффективные углы поиска при $\Delta h=0,1$ и $0,5$ м и различной глубине дна h (м)

Δh	50	100	200	250
0,1	3° 40'	2° 35'	2° 10'	1° 50'
0,5	8° 05'	4° 40'	4° 50'	4° 10'

да рыба держится близко у грунта, расширение ХН антенны аппаратуры не увеличивает ширину просматриваемой зоны и в случае ровного дна лишь ведет к бесполезному рассеиванию акустической энергии. В отличие от этого при поиске пелагической рыбы расширение ХН увеличивает ширину просматриваемой полосы, с которой могут быть зафиксированы эхосигналы от объектов промысла. В связи с этим обычные эхолоты с широкой характеристикой направленности (обычно значительно превышающей эффективный угол поиска для обнаружения придонной рыбы) при наличии одинаковых концентраций рыбы в толще воды и у дна будут регистрировать пелагические объекты в значительно большем количестве, чем придонные. Как указывается в литературе [Юданов, 1979], эта разница может выражаться не только в единицах (в 3–5 раз), но даже в десятках раз (в 8–30 раз на глубинах до 200 м и при Δh от 1,0 до 0,3 м). Особенно велико различие в показаниях, когда рыба держится очень близко у дна, т. е. при малых Δh (например, при $\Delta h=0,3-0,5$ м). Это подтверждается использованием эхолотов на донном траловом лове при сравнениях эхограмм аппаратуры и получаемых уловов [Заферман, 1994]. В литературе [Юданов, 1979] приводятся характерные примеры использования эхолотов на промысле трески в Балтийском и Баренцевом морях, сельди в Северном море и др. Например, при наличии промысловых уловов балтийской трески в дневное время на эхограммах при достаточно ровном дне наблюдались лишь редкие показания единичных рыб. Основная масса рыбы, облавливаемая тралом, держалась днем близко к грунту и маскировалась эхосигналами от дна. Вечером, когда треска поднимается над грунтом (уловы донным тралом в это время резко падают), маскирующего действия дна практически нет и оно не влияет на показания. В этом случае на эхограмме отмечается вся рыба, попадающая в озвучиваемую эхолотом зону обнаружения. При этом можно непосредственно по показаниям видеть значительную разницу в возможностях обнаружения эхолотом одних и тех же объектов в толще воды и у дна. Иногда показания могут практически отсутствовать при наличии промысловых уловов. В то же время в ряде случаев наблюдается обратное явление: показаний больше, а уловы меньше.

Это объясняется тем, что до сих пор мы рассматривали идеальный случай: рыба держится лишь в определенном слое над грунтом, дно моря абсолютно ровное и отсутствует волнение. Из-за сферического фронта волны акустического импульса эхолота рыба, находящаяся на одном расстоянии от антенны на краю и в середине характеристики направленности, будет фактически расположена на разных дистанциях от дна (рис. 11.42 б), а на экране дисплея эхосигналы от нее будут отображаться примерно на одной и той же высоте над грунтом. Таким образом, если рыба или другие объекты имеются не только в слое Δh (рис. 11.42 а, б), но и выше на краях характеристики, то эхосигналы от них будут регистрироваться на эхограмме на расстоянии от дна, не превышающем Δh , хотя фактически часть рыбы будет находиться выше. Если же в слое Δh в данный момент рыба отсутствует, а имеется лишь у краев характеристики направленности на большем отстоянии от дна, то на экране она будет зафиксирована расположенной в слое Δh . Если Δh соответствует величине вертикального раскрытия трала, то при наличии на эхограмме показаний рыбы улова не будет (даже при наличии достаточно ровного дна и отсутствии волнения моря). Таким образом, из-за сферического фронта волны возникает неопределенность в оценке фактической глубины нахождения придонной рыбы. Величина этой неопределенности может быть определена из рис. 11.42 и равна:

$$\Delta h = h - h \sin(90 - \alpha/2)$$

или

$$h - h \cos(\alpha/2) = h(1 - \cos \alpha/2),$$

где α — эффективный угол акустического пучка эхолокатора.

Чем больше h и a , тем значительнее неопределенность в оценке фактической глубины нахождения придонной рыбы. Например, при $\alpha = 13^\circ$ и $h = 400$ м Δh может быть более 2 м, и отметки от рыбы, появляющиеся на экране на расстоянии 1–2 м от линии грунта, на самом деле могут находиться на дистанции свыше 4 м и не будут облавливаться донным тралом с малым вертикальным раскрытием. При $\alpha = 28^\circ$ и $h = 400$ м $\Delta h'$ уже будет равна 10 м. Таким образом, при широкой характеристике направленности эхолокатора даже в случае идеальных характеристик дна и состояния моря не только расходуется бесполезно большая часть излучаемой эхолокатором акустической энергии, но в случае наличия рыбы на различных расстояниях от дна (не только вблизи от грунта) могут иметь место большие ошибки при обнаружении скоплений, пригодных для облова донными тралами. При уменьшении α Δh , соответственно, уменьшается (см. рис. 11.42 а).

Рассмотрим характер регистрации эха от рыбы на экране дисплея эхолокатора в указанных случаях (рис. 11.43 а). На рис. 11.43 а представлены регистрации эха от одиночных рыб и небольших стайк рыб — 1, 2 (3, 5 — трассы от одиночных рыб, 4 и 6 от стайк), находящихся на различных расстояниях от плоского дна непосредственно вдоль линии хода судна (т. е. судно при движении проходит точно над этими объектами). В приведенном примере оператор может определить фактическое положение объектов относительно дна по максимальному отстоянию отметок от линии грунта; характер регистрации эха от одних и тех же рыб, находящихся на разных расстояниях от грунта, отличается также продолжительностью отображения отметок эха (рис. 11.43 а). Если же данные объекты будут находиться не на оси ХН аппаратуры, а, например, в положении, показанном на рис. 11.43 б, тогда нижняя стайка 1 (или отдельная рыба) не будет зафиксирована на экране, а верхняя стайка 2 будет зарегистрирована расположенной значительно ближе к грунту, чем это есть на самом деле. В результате при наличии показаний рыбы у грунта улова донным тралом не будет. В других ситуациях, когда во время хода судна рыба находится как вблизи от оси акустического пучка, так и у его краев, указанное обстоятельство приводит к завышению количества рыбы, пригодной для облова донным тралом, т. е. эхолокатор дает неверное представление о распределении придонных скоплений. Волнение моря, вызывающее бортовую и килевую качку судна, приводит фактически к пропорциональному расширению эффективного угла акустиче-

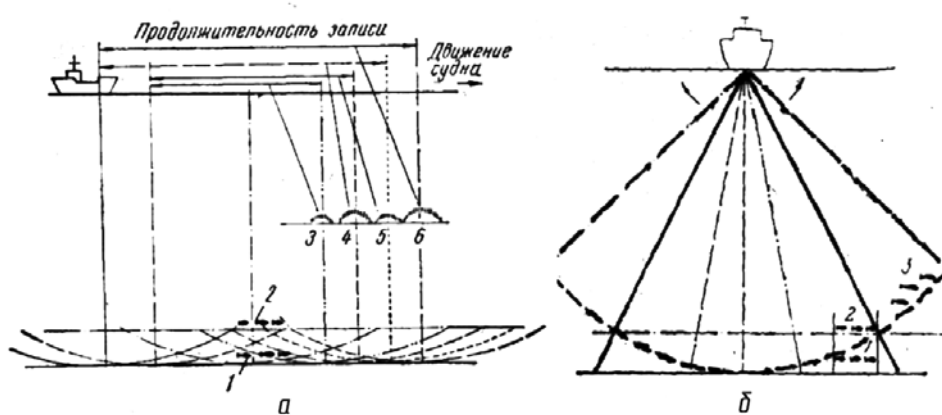


Рис. 11.43. Характер получения регистрации эха от придонных рыб на экране при нахождении их в стороне от него (вид со стороны кормы):

1, 2, 3 — стаи рыб, стрелки показывают колебания характеристики направленности

ского пучка эхолотатора, т. е. к увеличению неопределенности (стайка 3 при бортовой качке может отображаться находящейся недалеко от дна – рис. 11.43 б).

При сужении характеристики направленности неопределенность в оценке дистанции между рыбой и дном уменьшается, например, при $\alpha = 3,5^\circ$ и глубине порядка 400 м ошибка будет составлять уже примерно 0,3 м, т. е. неопределенность резко сократилась. Однако это справедливо лишь при отсутствии волнения моря. В случае качки судна будет происходить следующее.

Во-первых, большую часть времени ось характеристики будет направлена в сторону от вертикали, и эхолотатором будет зондироваться пространство, значительная часть которого может быть не захвачена тралом.

Во-вторых, рыба, находящаяся вблизи грунта (рис. 11.42 в), практически не будет видна на дисплее рыбопоисковой аппаратуры, даже если она расположена в пределах основного лепестка ХН. Это объясняется следующим. Несмотря на то, что основной лепесток характеристики может быть достаточно узким, при отклонении оси главного максимума в сторону всегда некоторая часть акустической энергии распространяется вертикально вниз по направлению к грунту. Эхосигналы от грунта могут быть значительно большими по амплитуде, чем эхосигналы от рыбы (особенно разреженной, что наиболее характерно в случае донных и придонных объектов) при равных расстояниях и излученной мощности, т. е. эхолотатор практически всегда имеет резко различающиеся зоны действия по придонной рыбе и грунту.

В связи с этим для случая, показанного на рис. 11.42 в, эхолотатор вначале будет принимать и регистрировать эхосигналы, соответствующие кратчайшему расстоянию h от судна до морского дна, а затем уже эхосигналы от рыбы, находящейся вблизи грунта на расстоянии, большем h . Но так как эхосигналы от грунта даже при небольшой величине акустической энергии, излучаемой вниз вне главного лепестка аппаратуры, будут больше эхосигналов от рыбы, даже находящейся в пределах основного луча, то на воспроизводящих устройствах отраженные от рыбы сигналы маскируются эхосигналами от дна. Вследствие этого практически для появления эхосигналов от рыбы на экране дисплея эхолотатора в момент, когда характеристика направлена в сторону от вертикального положения, рыба должна находиться на дистанции R от судна, меньшей глубины дна ($R < h$). Таким образом, при наличии волнения данный случай подобен рассмотренному выше, за исключением уменьшения озвучиваемой зоны и соответственно уменьшения вероятности маскировки эхосигналов от рыбы эхосигналами от возвышений на морском дне.

Наличие неровностей на морском дне приводит к дополнительной маскировке эхосигналов от придонной рыбы. Если принять минимальное число последовательно регистрируемых отметок эха от рыбы, достаточное для принятия обоснованного решения о наличии объекта, равным 3, тогда минимальная озвучиваемая площадь, с которой принимаются эти эхосигналы при движении судна, может быть определена по формуле [Юданов, 1979]:

$$S_{\min} = v_c t_1 D + (\pi D^2 / 4),$$

где v_c – скорость судна; t_1 – время, необходимое для приема трех эхосигналов от рыбы; D – диаметр акустически освещаемой зоны, с которой могут быть приняты эхосигналы от рыбы и дна (при принятом допущении $t_1 = 3/n$, где n – число циклов зондирования эхолотатора в единицу времени).

Даже на небольших глубинах S_{\min} измеряется сотнями квадратных метров, а при увеличении глубины S_{\min} будет уже превышать тысячи квадратных метров. Если на указанной площади озвучивания встретится хотя бы одна неровность, высота которой, к примеру, превышает или равна толщине придонного слоя Δh , то эхосигналы от рыбы, находящейся в указанном слое, будут замаскированы сигналами, отраженными от этой неровности. Вероятность появления таких неровностей, а значит и вероятность маскировки показаний рыбы, может быть достаточно большой, особенно на твердых и каме-

нистых грунтах. Так как $S_{\text{мин}}$ возрастает с глубиной, то вероятность маскировки эхосигналов от рыбы с глубиной еще более увеличивается. Из-за того, что эхолот озвучивает большую площадь дна, отметки (трассы) эха от придонной рыбы могут маскироваться эхосигналами от неровностей, находящихся не только под судном, но и в стороне от него — в зоне крайних лучей акустического пучка. Маскирующее действие усиливается с увеличением высоты неровностей и зависит также от расстояния между ними. С расширением характеристики направленности вероятность маскировки также увеличивается. Как указывалось, сужение характеристики уменьшает вероятность маскировки эхосигналов от рыбы эхосигналами от дна при неровном дне, но практически не снижает неопределенность оценки положения рыбы у дна. Величина неопределенности будет обусловлена фактически уже не характеристикой направленности эхолота, а углами бортовой и килевой качки. При больших углах качки эффективный угол акустического пучка будет в основном определяться этими углами и лишь незначительно отличаться от эффективного угла поиска при широкой характеристике направленности прибора. Например, если ширина основного лепестка характеристики равна 15° и 5° (при узкой диаграмме), то эффективный угол озвучивания при бортовой качке судна до 20° будет равен соответственно 55° и 45° .

На рис. 11.42 *з* показано положение, имеющее место при применении системы с узкой стабилизированной характеристикой. Независимо от качки судна характеристика эхолота всегда направлена вертикально вниз, поэтому постоянно обследуется пространство вблизи грунта, захватываемое тралом. Неопределенность в оценке положения принимаемых эхосигналов от рыбы в этом случае становится равной той, которая имеет место при узкой характеристике без волнения моря, так как эхосигналы от рыбы, не попадающей в зону основного лепестка, незначительные и не регистрируются на экране дисплея аппаратуры. Таким образом, применение узкой стабилизированной характеристики позволяет значительно повысить эффективность обнаружения придонной рыбы эхолотами вертикального действия. Тем более целесообразно использование узких стабилизированных характеристик при поиске и регистрации донных промысловых объектов и ракообразных, большую часть времени находящихся вблизи дна. Кроме того, в этом случае существенно сокращается и вероятность маскировки эхосигналов от объектов сигналами, отраженными от грунта, за счет сокращения озвучиваемой зоны.

При узкой стабилизированной характеристике значительно улучшаются возможности рыболокаторной аппаратуры при поиске и обнаружении придонной рыбы на свалах глубин. Если рыба держится вблизи дна на склонах, то она может плохо регистрироваться рыболокаторами с широкой характеристикой направленности из-за разницы в зонах действия прибора для рыбы и дна (зона действия для дна, как правило, значительно больше зоны действия для рыбы). При крутых склонах к антенне эхолота будут вначале приходить эхосигналы от участков дна, которые озвучиваются крайними лучами характеристики, а затем уже от рыбы, поэтому будет происходить маскировка отображений эха от рыбы. Степень маскировки растет с увеличением глубины и крутизны свала, а также при наличии значительных неровностей на склонах.

Из рис. 11.44 видно, что при применении эхолота с широкой характеристикой значительно увеличивается неопределенность в оценке расположения рыбы (ФК значительно больше СИ; СИ — величина неопределенности при работе одного и того же эхолота в случае ровного дна), появляется дополнительная маски-

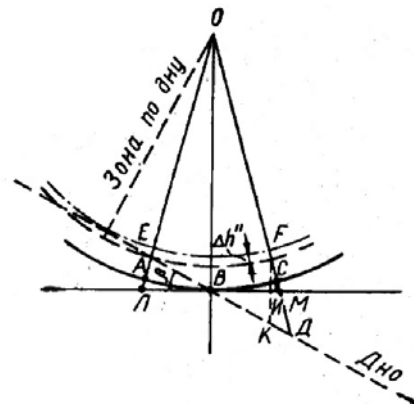


Рис. 11.44. Маскирующее действие уклона дна

ровка регистрацией эха от рыбы $\Delta h'$, а также увеличивается объем придонного слоя, эхосигналы от рыбы с которого не будут различимы на эхограмме вследствие наложения отраженных сигналов от дна (площадь EDF значительно больше площадей АЛВ и ВСМ, маскировка эха с которых имела бы место при ровном дне).

Введение узкой нестабилизированной ХН, на первый взгляд, приводит к увеличению возможностей обнаружения рыбы на склонах, однако при качке судна и вследствие различия зон действия эхолокатора для дна и рыбы, а также из-за влияния боковых лепестков изменений в регистрации рыбы по сравнению с предыдущим рассмотренным случаем практически не будет. Введение стабилизации характеристики также может не дать значительного увеличения поисковых возможностей аппаратуры при работе на свалах, если имеются большие боковые лепестки. В данном случае необходимы как стабилизированная узкая характеристика, так и меры по снижению уровня бокового излучения. Величина площади EDF, эха от рыбы с которой маскируются отраженными сигналами от дна, зависит от угла наклона дна β . При наличии стабилизации и малом уровне боковых лепестков на величину ее также влияет ширина ХН антенны.

Следует, конечно, учитывать, что при промысловой разведке придонной рыбы с помощью обычных эхолокаторов вертикального действия удастся получать и дополнительную информацию об этих объектах благодаря тому, что большинство придонных и донных рыб, как правило, не находятся постоянно у грунта и на грунте, а в определенные периоды времени совершают и вертикальные миграции. Однако как для промысла, так и для рыбохозяйственных исследований весьма желательна возможность непосредственной индикации и регистрации рыб и других объектов у дна, их распределения и поведения. Необходимость существенного сужения ХН для повышения эффективности эхолокаторов при поиске придонных рыб ставит еще одну серьезную проблему (кроме стабилизации и подавления боковых лепестков): в этом случае величина просматриваемой зоны в единицу времени будет значительно меньше, чем при поиске пелагических скоплений аппаратурой с широкими характеристиками. Хотя эхолокатор с узкой стабилизированной характеристикой, конечно, способен обнаружить и зарегистрировать эхосигналы от значительно большего количества рыб, находящихся близко у грунта, чем аппаратура с широкой характеристикой, однако для повышения эффективности работы судна, ведущего поиск или промысел придонной рыбы в заданном районе, целесообразно увеличение скорости обследования придонного пространства. В противном случае судну необходимо будет тратить намного больше времени на поиск, чем при разведке пелагических рыб в таком же районе при использовании обычного эхолокатора (с соответствующим увеличением эксплуатационных расходов). Повышение эффективности поиска придонных объектов важно, в первую очередь, при проведении рыбохозяйственных исследований указанных объектов, условий их обитания, распространения, поведения и т. д.; а также и для рыбодобывающих судов, которым часто тоже приходится вести предварительный поиск скоплений.

Более эффективными в этом отношении могут быть буксируемые системы вертикальной локации. Существенную помощь в решении указанной задачи могут также оказать эхолокаторы вертикального действия с электронным сканированием узкой ХН в плоскости, перпендикулярной направлению движения судна, с акустическими антеннами с существенно меньшим уровнем боковых лепестков. Однако это достаточно затратно, особенно для промысловых судов.

Наиболее эффективными и целесообразными представляются системы с использованием уже имеющегося на рыболовных и научно-исследовательских судах оборудования. В работе [Кудрявцев, 2002, 2004] рассматривается система с использованием своего рода верхней подборы трала с подъемными устройствами вдоль нее и отводителями — упрощенными траловыми досками на ее краях, буксируемая на траловых ваерах недалеко от дна. Вдоль такой верхней подборы устанавливается ряд малогабаритных гидроакустических датчиков последовательной вертикальной локации. Для определенного регулирования положения верхней подборы относительно грунта, а также запуска

эхолокационных датчиков с судна кодированными сигналами и передачи на судно принятых эхосигналов, применяется обычный стандартный кабель связи судового тралового зонда. Для обеспечения последовательного запуска эхолокационных датчиков своеобразная верхняя подбора может быть выполнена в виде отрезков кабеля связи с соответствующими герметичными разъемами. Подобная система может быть реализована и с использованием гидроакустической линии связи.

Другим вариантом указанной системы может быть использование в ней вместо эхолокационных датчиков телевизионных видеокамер, тем более, что вместо одножильных карротажных кабелей связи в траловых зондах в настоящее время уже применяются и бронированные коаксиальные кабели, позволяющие передавать на судно широкополосную телевизионную информацию. Кроме применения для повышения эффективности обнаружения придонных рыб, указанная система с запоминанием получаемой видеоинформации целесообразна при изучении распределения, поведения и других характеристик различных донных гидробионтов. Вместо траловых ваеров в этом случае могут применяться простые тросы. Получаемые данные будут считываться после выборки системы на борт.

Еще меньшими возможностями в части обнаружения придонных рыб обладает обычная рыболокационная аппаратура при горизонтальном и наклонном зондировании. Исследования и разработка в части повышения эффективности рыболокационной аппаратуры при поиске и обнаружении придонных рыб при наклонном зондировании имеют важное значение по двум основным причинам.

Первая из них состоит в необходимости (целесообразности) увеличения скорости обследования придонного пространства. Если в случае поиска пелагических объектов при горизонтальном зондировании можно просмотреть в единицу времени площадь примерно в 100 раз большую, чем при вертикальном, то при обнаружении придонных объектов картина резко меняется. При наклонном зондировании с помощью обычно применяемых гидролокаторов регистрация разреженных придонных рыб возможна лишь в редких случаях. Большинство используемых на промысловых судах гидролокаторов горизонтально-вертикального действия при поиске концентраций таких придонных объектов, как треска, пикша, морской окунь, менее эффективны, чем эхолокаторы лишь вертикального действия.

Вторая причина заключается в том, что для повышения эффективности донного и придонного тралового лова целесообразно введение хотя бы элементов прицельности, что широко практикуется при разноглубинном траловом промысле косячных и подвижных скоплений и лове рыбы кошельковыми неводами.

В настоящее время траления донными тралами проводятся, как правило, по времени (при движении судна в основном постоянными курсами), определяемому исходя из опыта предыдущих рейсов, предшествующих тралений в данном районе, по изобатам, по данным предварительного обследования участка рыболокатором вертикального действия (что требует дополнительных затрат времени), на основании информации от соседних промысловых судов.

Для поиска и обнаружения рыбы при донном траловом промысле применяется преимущественно аппаратура вертикального действия, при использовании которой просматривается лишь небольшая зона водной среды у дна под килем судна, поэтому эхолокатор служит лишь средством обнаружения рыбы и непосредственно в процессе лова не участвует (как, например, аппаратура горизонтально-вертикального действия при кошельковом промысле или траловом пелагическом).

В то же время известно, что донные и придонные рыбы не распределяются равномерно у грунта, а образуют, как правило, определенные локальные концентрации. Поэтому с большой степенью вероятности можно утверждать, что при регистрации рыбы только под килем судна аппаратурой вертикального лоцирования донный трал в течение траления не идет оптимальными курсами с точки зрения получения максимального улова в единицу времени. Так как при донном тралении в отличие от разно-

глубинного лова трал может проходить довольно значительные расстояния, например, до 10 миль, то в величине получаемого улова присутствует значительно больший элемент случайности.

Если бы промысловое судно могло иметь информацию об объектах лова в его передней зоне в достаточно широкой зоне (исходя из возможностей маневрирования судна с тралом) и на достаточно большом расстоянии от судна, обеспечивающего своевременное выполнение необходимого маневра для вывода трала на наибольшие концентрации, судоводитель всегда мог бы выбрать и осуществить более целесообразный для конкретных условий курс судна, обеспечивающий наиболее эффективное траление*.

В случае донного и придонного тралового лова также требуется получение достаточно точных данных о характере и очертаниях морского дна во избежание аварий орудий лова. Так как это не всегда обеспечено, гидроакустическая аппаратура продолжает оставаться важным средством получения такой информации.

Опытным операторам в некоторых случаях (например, при слабо отражающих грунтах (илистых), при наличии ровного и плоского дна, при поиске рыбы на отлогих грунтах с лоцированием в сторону увеличения глубины, при работе на не очень больших глубинах со сравнительно небольшими наклонами ХН антенны в вертикальной плоскости, удается с помощью обычных гидролокаторов обнаруживать и фиксировать придонные концентрации рыбы в стороне от судна (в т. ч. и впереди судна) [Кудрявцев, Сапин, 1977].

Современные электронно-сканирующие гидролокаторы позволяют более успешно решать данную задачу.

На рис. 11.45 представлена схема возможного обнаружения косяков рыбы (двух косяков рыбы – а и б) вблизи дна и показан характер получаемых изображений) многоканальной гидроакустической станцией одновременного кругового или широкосекторного обзора при различных углах наклона ее ХН между 30 и 40° (case 1), между 10 и 20° (case 2) и 0–5° (case 3) и сравнительно ровном дне.

В первом случае (слева) при угле наклона ХН от 30 до 40° компактный и плотный косяк (а) может быть выделен на фоне донных отражений (изображение на экране дис-

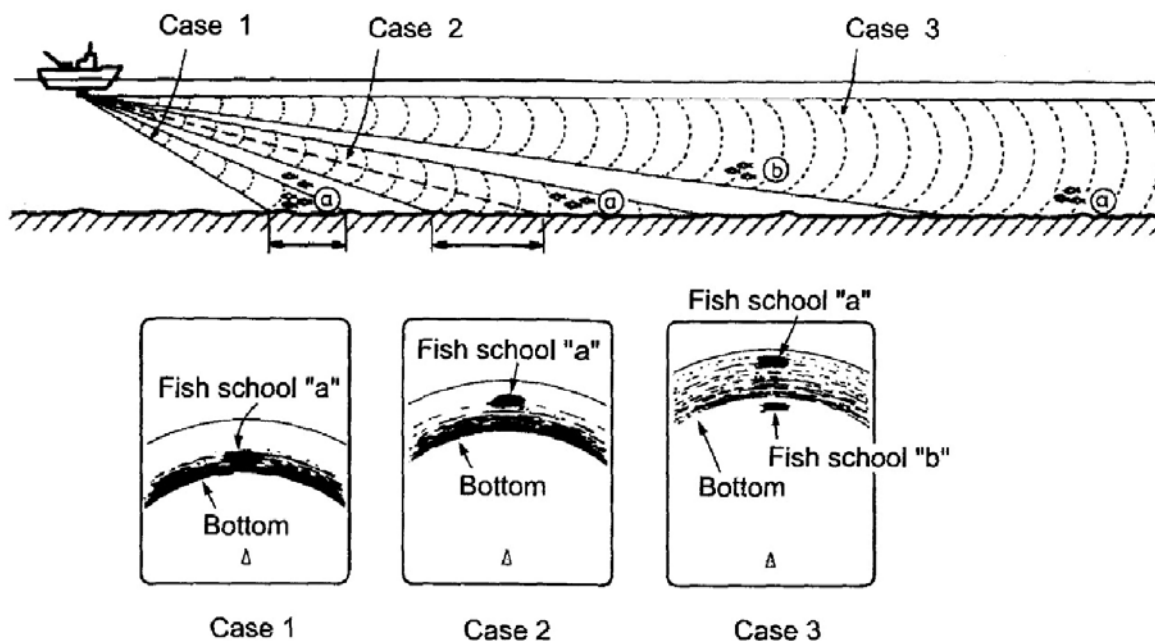


Рис. 11.45. Схема возможного обнаружения косяков рыбы вблизи сравнительно ровного дна многоканальным гидролокатором при различных углах наклона его характеристик направленности: сверху слева направо – наклон 30–40°, 10–20°, 0–5°; внизу – соответственно, характер получаемых при этом отображений на экране дисплея на фоне донной реверберации

плея — слева) благодаря частично зеркальным отражениям акустических лучей от грунта и диффузному от косяка.

Во втором — при угле наклона от 10 до 20° доля зеркальных отражений будет еще больше и эхосигналы от косяка (а) будут выделяться более четко (отображение на экране дисплея — в середине рис. 11.45).

В третьем случае при углах наклона от 0 до 5° доля зеркальных отражений будет максимальной и можно будет выделить на экране оба косяка (а и б).

11.4. ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Благодаря возможности получения большой дальности обнаружения низкочастотная гидроакустическая эхолокационная аппаратура может быть полезной при рыбохозяйственных исследованиях по изучению формирования скоплений рыб, их миграций и других характеристик. Наиболее целесообразной в этом отношении представляется техника бокового или траверзного обзора, позволяющая обеспечивать автоматическое отображение и накопление панорамных акустических изображений водных объектов и подводной обстановки

Первыми известными экспериментальными исследованиями в этом направлении были работы, проведенные [Revie, Weston et al., 1963, 1968] с использованием низкочастотного (1,5 кГц) гидролокатора Британских ВМФ большой мощности (20 кВт) и апертурой антенны 18 м. С его помощью могли контролировать миграции сардины на расстояниях до 65 км [Internat. Congr. 1974; Weston and Revie, 1971, 1974].

Подобные работы по скоплениям и косякам сельди были проведены в начале 1970 гг. с использованием буксируемого гидролокатора бокового обзора GLORIA [Rusby, 1970, 1974; Rusby et al., 1969].

Перспективным представляется применение низкочастотной гидроакустической аппаратуры бокового обзора дальнего действия для изучения формирования скоплений рыб, их миграций и других характеристик. Об этом свидетельствуют, например, работы в этом направлении, проведенные Английским национальным институтом океанографии с использованием гидролокатора «Глория», предназначенного для геологических исследований дна. Принципы работы гидроакустических систем бокового обзора рассмотрены и изложены ранее.

В указанной аппаратуре использовалась пьезоэлектрическая антенна из цирконат-титаната свинца (ЦТС), размещенная в буксируемом носителе торпедообразной формы из стеклопластика длиной 10 м. Носитель может буксироваться на глубине от 30 до 120 м при скорости судна до 7 уз. Применение буксируемой антенны с переменной глубиной погружения обеспечивает стабильность положения ее характеристики направленности в пространстве при движении судна во время волнения моря, позволяет получать большую акустическую мощность P_a (до 50 кВт) без появления кавитации, обеспечивает уменьшение уровня шумов и помех и достижение максимальных дальностей действия при различных гидрологических условиях. Масса носителя — с антенной составляла 6,7 т в воздухе и 3,5 т в воде. Аппаратура могла формировать и излучать тональные импульсы или импульсы с внутриимпульсной ЧМ с шириной спектра около 100 Гц и $P_{a \text{ имп}}$ до 50 кВт, со средней несущей частотой 6,4 кГц и длительностью до 2–4 с один раз в 18 или 30 с.

При излучении широкополосных импульсов с внутриимпульсной ЧМ обработка принимаемых эхосигналов производилась коррелятором с устройством временного сжатия сигналов и использованием запомненной в нем копии импульса лоцирования. При приеме эхосигнал от цели отображался выборочными значениями, взятыми с частотой $2f_b$ через интервалы $t = (1/2f_b)$ (f_b — верхняя частота спектра). Полный сигнал, таким образом, разлагается на $n = (\tau/t) = 2f_b \tau$ выборков (τ — длительность сигнала). Выборки затем подвергаются сжатию во времени и накапливаются в линии задержки. До прихода эхосигнала выходная функция коррелятора равна 0. Она достигает макси-

мального значения, когда отраженный сигнал полностью переходит в линию задержки, и по окончании эхосигнала убывает.

Как указывается [Moss, 1970; Rusby, et al., 1975], использование коррелятора позволило улучшить соотношение сигнал/шум, т. е. оно стало примерно в 400 раз (на 26 дБ) больше, чем при излучении коротких, не модулированных импульсов (с τ порядка 10 мс) одинаковой мощности с сохранением равной разрешающей способности ($\approx 7,5$ м). Таким образом, при излучаемой мощности 9–10 кВт аппаратура с внутриимпульсной ЧМ будет эквивалентна станции обычного типа с пиковой мощностью свыше 1 МВт (при $\tau = 10$ мс). В системах с корреляционной обработкой принимаемых эхосигналов улучшение соотношения сигнал/шум на выходных устройствах аппаратуры обеспечивается излучением импульсов большой длительности, т. е. с большой энергией при обычных уровнях мощности, с сохранением разрешающей способности, соответствующей получаемой при использовании коротких импульсов.

В системах с корреляционной обработкой излучаются значительно более продолжительные импульсы примерно с той же самой шириной спектра частот. Коррелятор сравнивает принимаемые колебания с копией излученного импульса (с частотой до нескольких тысяч раз в секунду) и вырабатывает выходной сигнал при согласовании двух указанных колебаний посредством их перемножения и усреднения результирующего колебания по длительности копии зондирующего импульса. Усреднение позволяет уменьшить относительный уровень шума на выходе коррелятора.

В некоторых случаях применения эхолокационной аппаратуры помехи на ее входе характеризуются наличием конечного числа очень интенсивных импульсов, создаваемых различными источниками. Корреляционная обработка в системах с внутриимпульсной ЧМ является эффективным средством защиты от таких помех (во-первых, предусматриваемое в корреляторах ограничение уменьшает амплитуду шумовых импульсов, и, во-вторых, импульсы помех, которые короче зондирующих импульсов, вносят пропорционально меньшие вклады в выходной сигнал вследствие усреднения при корреляционной обработке).

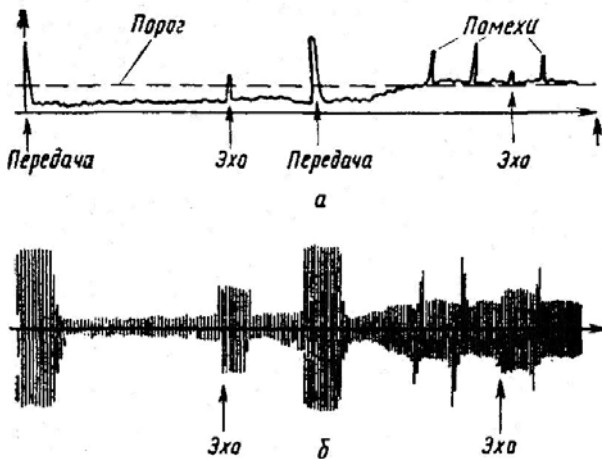


Рис. 11.46. Воздействие импульсных помех на работу эхолокационной аппаратуры обычного типа *а* и с корреляционной обработкой — *б* (на входе коррелятора до обработки)

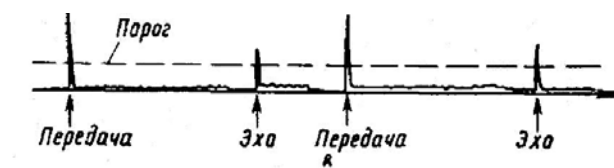


Рис. 11.47. Эхосигнал на выходе коррелятора (после обработки)

импульсов, и, во-вторых, импульсы помех, которые короче зондирующих импульсов, вносят пропорционально меньшие вклады в выходной сигнал вследствие усреднения при корреляционной обработке).

На рис. 11.46 показано влияние изменения уровня помех на выходные сигналы обычной эхолокационной системы, а на рис. 11.47 — системы с корреляционной обработкой ЧМ колебаний (на рисунках показаны два цикла лоцирования).

Как можно видеть (рис. 11.46 *а*), во время первого цикла лоцирования уровень помех составляет третью часть амплитуды эхосигнала и значительно увеличивается в течение второго цикла из-за появления в этот период нескольких весьма интенсивных импульсных помех, например, при включении какой-либо установки на судне. Если в первом цикле эхосигнал может быть четко выделен, то во втором он практически неразличим среди помех. На рис. 11.46 *б* показаны необработанные колебания в приемном тракте аппаратуры с внутриимпульсной ЧМ, которые отличаются большей длительностью излучаемого импульса и, следовательно, эхосигнала. Выходной сигнал коррелятора показан на

рис. 11.47 (изменение уровня помех почти не повлияло на эффективность выделения полезного эхосигнала).

Излучение в станции «Глория» проводилось под прямым углом к направлению движения носителя антенны, которая может быть установлена в носителе с излучением вправо или влево. Характеристика направленности антенны является узкой в горизонтальной плоскости (около 2°) и более широкой в вертикальной ($10\text{--}15^\circ$) (рис. 11.48 – траверзный обзор). При исследованиях характеристик и рельефа дна ось характеристики устанавливается с некоторым смещением вниз от горизонтали для озвучивания большей площади дна. На рис. 11.48 также показаны три боковых лепестка антенны.

Предусмотрено два режима отображения принимаемой информации. При работе в первом режиме темные отметки соответствуют большим величинам эхосигналов, например, от береговой черты или скал, тогда как более светлые отметки указывают на наличие слабо отражающих участков, объектов или зон акустической «тени». Чаще аппаратура работала во втором режиме, в т. ч. и при поиске рыбных скоплений, при этом применялся метод теневой индикации (отраженные сигналы, принимаемые с достаточно узкого слоя водной среды и дна от достаточно сильных рассеивателей, отображались в виде светлых отметок, а зоны тени или участки мелкозернистых донных осадков, рассеивающие в обратном направлении небольшое количество акустической энергии, – в виде темных отметок и при последовательном накоплении в виде темных пятен).

Полезно иметь представление и о методических аспектах использования подобной аппаратуры. Работы с аппаратурой «Глория» по обнаружению рыбы проводились в 1971 и 1973 гг. в мелководных шельфовых районах (у Гебридских о-вов) с глубинами до 150 м, поэтому ось ХН устанавливалась практически под углом 0° . Уже начиная с небольшого расстояния от антенны (≈ 50 м) весь слой воды в данном случае полностью озвучивался, а носитель буксировался на небольших глубинах (до 33 м). В связи с этим используемая акустическая мощность не превышала 10 кВт (для исключения кавитации). В основном использовалась $P_a = 5$ кВт.

Выбранный для испытаний участок был предварительно обследован с помощью аппаратуры бокового обзора малого радиуса действия с $f = 36$ кГц и гидроакустической аппаратуры вертикального действия с $f = 10$ кГц. По полученным данным было установлено, что в указанном районе скалы практически отсутствуют, грунт илистый или песчаный (слабо рассеивающий), глубины в среднем равны 150 м. У одного края выбранного района находилась банка на глубине около 50 м. При вертикальной локации была проведена предварительная оценка распределения, плотности и глубин расположения пелагических рыбных скоплений в данном районе.

В процессе первых работ с аппаратурой «Глория» в летний период 1971 г. было установлено, что условия распространения звука в выбранном районе были неблагоприятными из-за отрицательной рефракции, поэтому цели не обнаруживались на дистанции, превышающей 4–5 км. Анализ данных профиля скорости звука показал, что при движении носителя на глубине 33 м антенна располагалась в верхней части сильного температурного скачка, что приводило к достаточно быстрому искривлению акустических лучей в направлении дна.

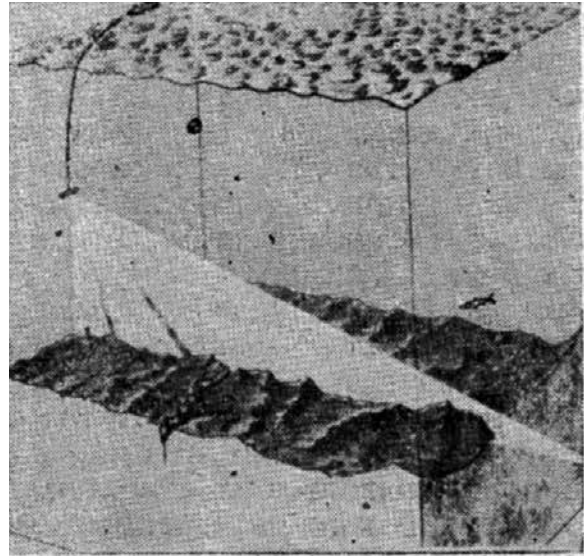


Рис. 11.48. Процесс просмотра водного пространства аппаратурой «Глория» (в левой нижней части рисунка показаны три боковых лепестка ХН)

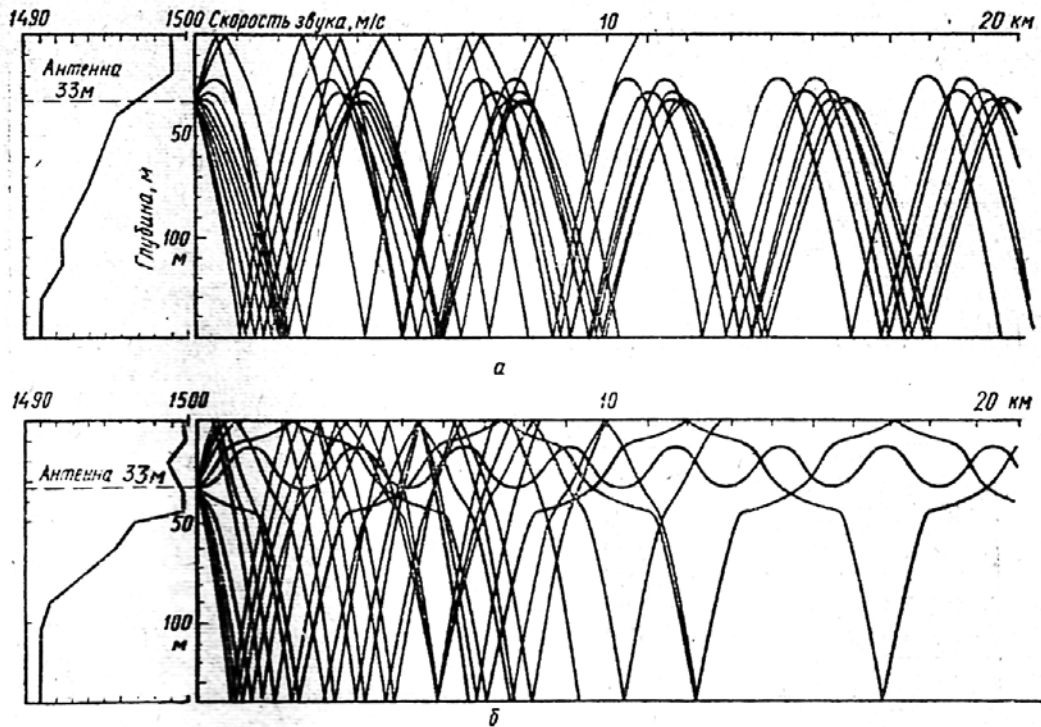


Рис. 11.49. Характер распространения звука в начале (а) и в конце (б) экспериментальных работ с аппаратурой

Указанный профиль c и соответствующая лучевая диаграмма показаны на рис. 11.49 а. Лучи на диаграмме рассчитаны и нанесены через интервалы 1° , по 5° вверх и вниз от центрального луча, выходящего под углом 0° . Приведенное на рис. 11.49 а изменение скорости звука в диапазоне глубин от 20 до 130 м соответствовало изменению температуры от $13,4$ до $10,7^\circ\text{C}$ при постоянной солености $S=35\%$.

Через несколько дней после интенсивного перемешивания поверхностных слоев воды под действием сильного ветра условия распространения акустических колебаний значительно улучшились и дальность обнаружения целей аппаратурой существенно увеличилась. В результате было зафиксировано большое количество скопления рыбы между судном и краем банки Хеймс, а скальные образования на этой банке обнаруживались на дистанциях до 13 км. В конце экспериментальных работ была выполнена серия галсов, параллельных границе банки Хеймс на расстоянии 18 км от нее, для определения максимальной дальности обнаружения скопления рыбы при данных гидрологических условиях. Рыбные концентрации обнаруживались на дистанциях до 15 км при излучаемой мощности 9 кВт.

При этом вновь были оценены условия распространения звука. Профиль скорости звука и соответствующая лучевая диаграмма показаны на рис. 11.49 б, на котором видно, что антенна станции в данном случае находится в пределах изотермического слоя (у его нижней границы). Обнаружение рыбы на глубинах, больших 33 м, означало, что имело место проникновение части энергии через границу температурного скачка в более глубокие слои воды.

При указанных условиях за время эксперимента было выполнено более 40 одинаковых галсов длиной порядка 13 км. Это позволило каждые 1,25 ч получать своеобразные «планшеты» подводной обстановки с участков площадью $17 \times 13 \text{ км}^2$ и $13 \times 13 \text{ км}^2$. В указанной работе приведен ряд полученных в процессе галсов эхограмм. На эхограммах, полученных с помощью станции «Глория», можно было видеть большое количество отметок от целей над ровными грунтами у банки Хеймс (малых и рассеянных, протяженных и достаточно плотных). В светлое время суток регистрировались эхосигналы от ско-

плений рыбы протяженностью до 5–7 км. В качестве примера на рис. 11.50 приведены эхограммы последовательных наблюдений за скоплениями рыб, выполненных не в светлое, а в темное время суток. Для облегчения анализа и расшифровки показаний рыбных скоплений и их перемещений на получаемых эхограммах в качестве опорных использовались отметки эхосигналов от трех скальных образований (имевших характерные очертания), которые отмечены на рис. 11.50 *а* буквами А, В и С. На рис. 11.50 *б* показана эхограмма гидроакустического обследования того же участка, полученная при движении судна параллельным курсом на большем расстоянии (на 5 км) от границы банки Хеймс.

Во время первых галсов (начиная с 17 ч 55 мин) отметки эхосигналов от рыбы не были зафиксированы, далее (в 20 ч 00 мин) начали появляться рассеянные отметки эхосигналов от рыбы над банкой Хеймс. Затем (в 21 ч 40 мин) рыба стала формироваться в небольшие скопления, эхосигналы от которых показаны стрелками на первой эхограмме (см. рис. 11.50 *а*). В течение следующего галса (с 22 ч 40 мин) они стали объединяться в более плотные скопления длиной до 2 км (см. рис. 11.50 *б*). Во время дальнейших наблюдений (в 00 ч 25 мин и 1 ч 15 мин) были зафиксированы еще более плотные концентрации рыб (см. рис. 11.50 *в*) и их передвижение вдоль края банки.

В работе также приводятся результаты экспериментальных работ и эхограммы, полученные в том же районе в 1973 г.

В 1971 г. в ходе экспериментов также проверялась возможность наведения на рыбные скопления по данным аппаратуры «Глория» сейнера «Лунар Боу», осуществлявшего облов кошельковым неводом косяков, обнаруженных станцией «Глория», для их идентификации, оценки количества рыбы и т. д. После обнаружения скопления на большой дистанции определялось его положение относительно промыслового судна, место нахождения которого оценивалось с помощью радиолокационной станции. Далее судну сообщали курс следования для сближения со скоплением, который затем корректировали, и расстояние до скопления. Когда сейнер подходил к косяку на дистанцию около 1 км, устанавливался контакт гидролокатора ближнего действия, установленного на сейнере, с косяком и проводился облов скопления. Используя информацию от аппаратуры «Глория», сейнер «Лунар Боу» тратил меньше времени на поиск рыбы и имел больший улов по сравнению с тринадцатью другими однотипными судами, работавшими в этом же районе.

Видовая принадлежность обнаруживаемых при экспериментальных работах скоплений определялась контрольными уловами сейнера «Лунар Боу», а также была проверена сравнением акустической силы цели сельди с отражательной способностью других биологических объектов, имевшихся в данном районе (скумбрии, сифонофор и мальков рыб), с помощью графиков, приведенных на рис. 11.49. На рис. 11.51 представлено из-

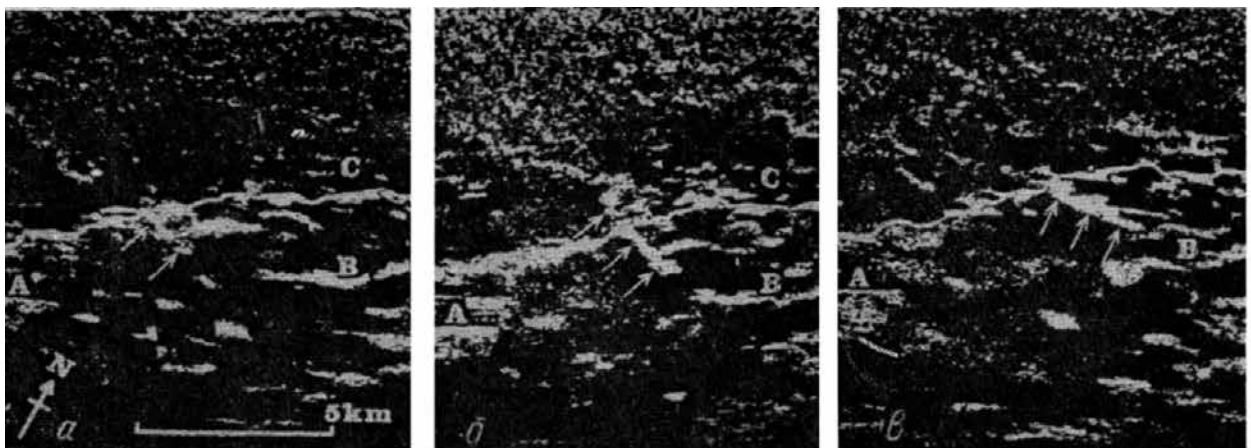


Рис. 11.50. Эхограммы последовательных наблюдений за формированием скоплений сельди в ночное время (направление озвучивания – сверху вниз)

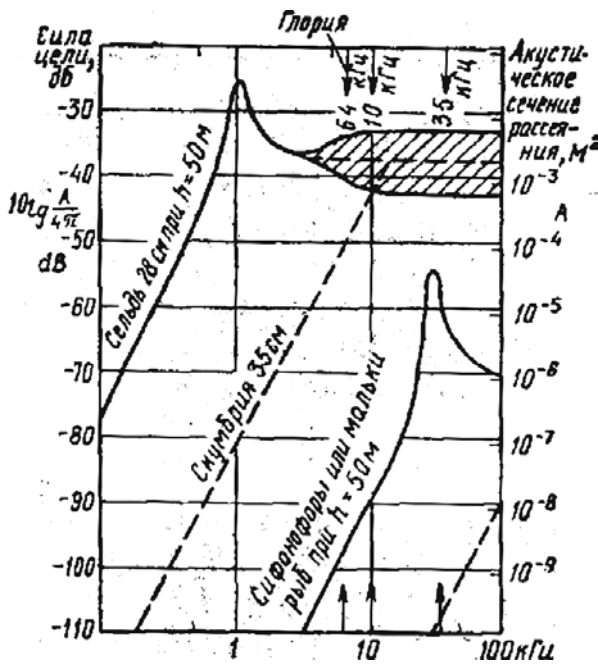


Рис. 11.51. Изменение силы цели рыбы с частотой

ных, полученных от «Лунар Боу» во время: облова рыбы при наведении его по показаниям станции «Глория». Перед обловом объем косяка был оценен примерно в $200\,000\text{ м}^3$ с количеством рыб порядка 80 000 шт. (исходя из массы выловленной рыбы), что соответствует среднему расстоянию между рыбами в скоплении $d=1,2\text{ м}$ (т. е. $d=5\lambda$ на частоте 6,4 кГц). Из этого был сделан вывод о некогерентном вкладе отражений отдельных рыб в общий эхосигнал от скопления. Тогда с учетом акустического поперечного сечения отдельной сельди A , равного примерно $2,5 \times 10^{-3}\text{ м}^2$ (рис. 11.58), и объема, захватываемого ХН аппаратуры при направлении ее на косяк, сила цели его была определена в +5 дБ.

Таким образом, если бы зарегистрированные на указанных эхограммах показания являлись эхосигналами от скумбрии, это означало бы, что она находится в очень крупных и плотных скоплениях (чтобы иметь силу цели +5 дБ). Однако ни одно из промысловых судов не наблюдало больших концентраций скумбрии во время проведения экспериментальных работ в указанном районе. Небольшие рыбы длиной 3–6 см с плавательным пузырем могли бы иметь подобную отражательную способность в скоплении при наличии их в таких же концентрациях, как и сельдь, но таких скоплений молоди также не наблюдалось в это время. Не было и значительных скоплений сифонофор и мальков рыб. Таким образом, проведенный анализ акустических характеристик обнаруживаемых скоплений подтвердил, что основным объектом локации при проведении экспериментов с аппаратурой «Глория» являлась сельдь [Rusby et al., 1974].

В результате проведенных работ была установлена возможность успешного применения гидроакустической аппаратуры бокового обзора с большой дальностью действия для рыбного промысла, особенно в сложных гидрологических условиях, а также при изучении поведения рыбы, ее распределения, миграциях и т. д.

Экспериментальные рыбохозяйственные исследования с гидроакустической аппаратурой бокового обзора дальнего действия при исследованиях по контролю подходов мигрирующих лососевых рыб к устью реки Фрейзер были проведены в проливе Джорджии вблизи Ванкувера (Канада) на судне CCS Vector в период 4–12 августа 1997 г. [Trevorrow and Farmer, 1997]. Аппаратура, установленная в буксируемом устройстве, включала 40-элементную 12-килогерцевую акустическую антенну, подключенную к генераторно-приемному блоку с выходной мощностью 2 кВт, и имела характеристику направленности шириной $2,8^\circ$ (на уровне 3 дБ) в горизонтальной плоскости и 122° в вер-

менение силы цели сельди длиной 28 см, сифонофор (или мальков рыб длиной порядка 1 см), рассчитанных для глубины 50 м и скумбрии длиной 35 см. Сельдь, некоторые сифонофоры и мальки рыб имеют плавательные пузыри, а скумбрия является беспузырной рыбой. В области выше резонанса (в районе рабочей частоты станции «Глория») на графике для сельди значения ее силы цели имеют примерно десятикратный разброс, обусловленный рядом причин, в т. ч. и изменением положения рыбы относительно направления озвучивания. С учетом указанной неопределенности минимальная разница в силе цели сельди и скумбрии на частоте 6,4 кГц составляет 10 дБ, а силы цели сифонофор и мальков рыб на этой частоте отличаются от силы цели сельди на много порядков.

Для перехода к определению силы цели скоплений сельди была предварительно оценена их плотность на основании дан-

тикальной (буксируемое тело было длиной 5,41 м и максимальным диаметром 0,89 м, длина апертуры антенны 2,49 м). Ширина полосы пропускания находилась в пределах от 11,2 до 12,8 кГц. При указанных исследованиях использовалась линейная частотная модуляция в излучении импульсов лоцирования длительностью от 100 до 200 мс при минимальной частоте их повторения, меньшей 6 с, с временным сжатием принимаемых эхосигналов для обеспечения высокой разрешающей способности по дистанции.

Также предварительно проводилась оценка возможностей распространения акустических колебаний в районе проведения исследований и построены лучевые картины. Было установлено, что поверхностные слои воды (до глубины 5–10 м) являются значительно более теплыми и более пресными в результате потока вод р. Фрейзер. На рис. 11.52 показаны типичные профили изменения температуры, солёности и скорости звука в данной зоне. По результатам измерений температуры и солёности проводилось построение лучевых картин распространения акустических колебаний. Из рис. 11.52 видно, что поверхностные слои воды (до глубины 5–10 м) являются значительно более теплыми и более пресными в результате потока вод р. Фрейзер. Слои в диапазоне глубин от 10 до 40 м характеризовались большими градиентами температуры и солёности из-за смешения вод речного стока с более глубокими водными массами пролива Джорджии.

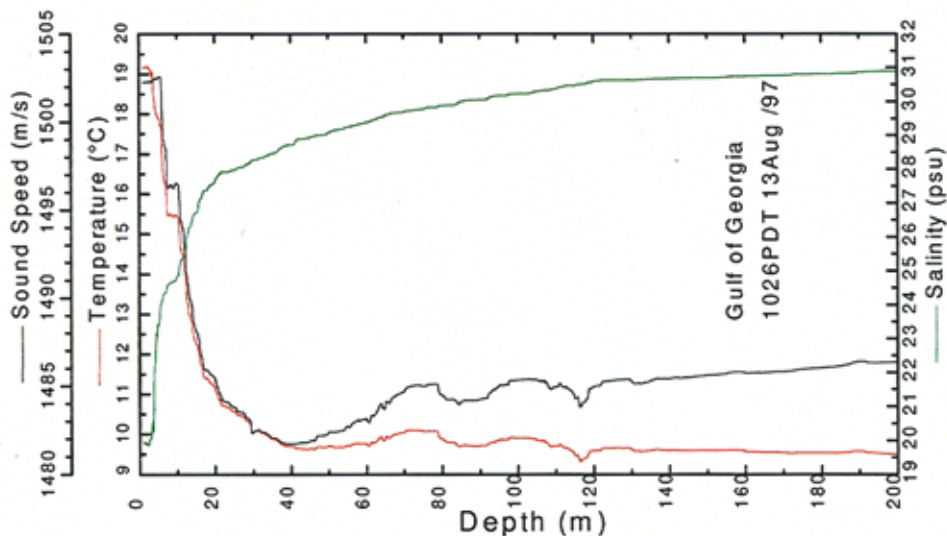


Рис. 11.52. Полученные графики изменения температуры, солёности и скорости звука в районе исследований

Это привело к образованию приповерхностного подводного звукового канала с минимальной скоростью распространения акустических колебаний вблизи глубины 40 м.

Имело место примерно полное акустическое перекрытие толщи водной среды, за исключением зоны тени в приповерхностном слое воды в диапазоне дистанций от 500 до 700 м. При типичных условиях района исследований различимые трассы эхосигналов от отдельных рыб или небольших групп лососей наблюдались на расстояниях от 1500 до 7000 м в диапазоне глубин от 60 до 220 м благодаря наличию вышеуказанного канального эффекта и соответствующей фокусировки акустических лучей (рис. 11.54). Видовая принадлежность лоцируемых объектов во время вышеприведенных исследований была подтверждена контрольными уловами. В августе преобладающим видом была нерка (в среднем между 89 и 99%). Остальная часть контрольных уловов состояла из горбуши и небольшого количества чавычи.

В работе [Стародубцева и др., 2008] приводятся отображения скоплений рыбы на экране дисплея гидролокатора, обнаруженных на больших расстояниях, полученные

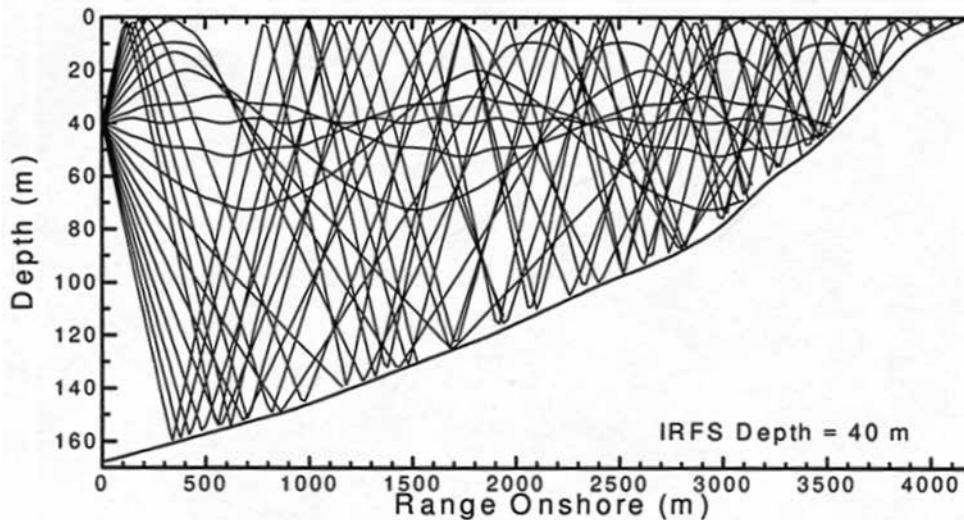


Рис. 11.53. Лучевая картина распространения звука (траектории 21 луча) при глубине перемещения буксируемого устройства акустической аппаратуры бокового обзора 40 м в направлении к берегу (вблизи района Sandheads), построенная по данным профиля скорости звука рис. 11.52

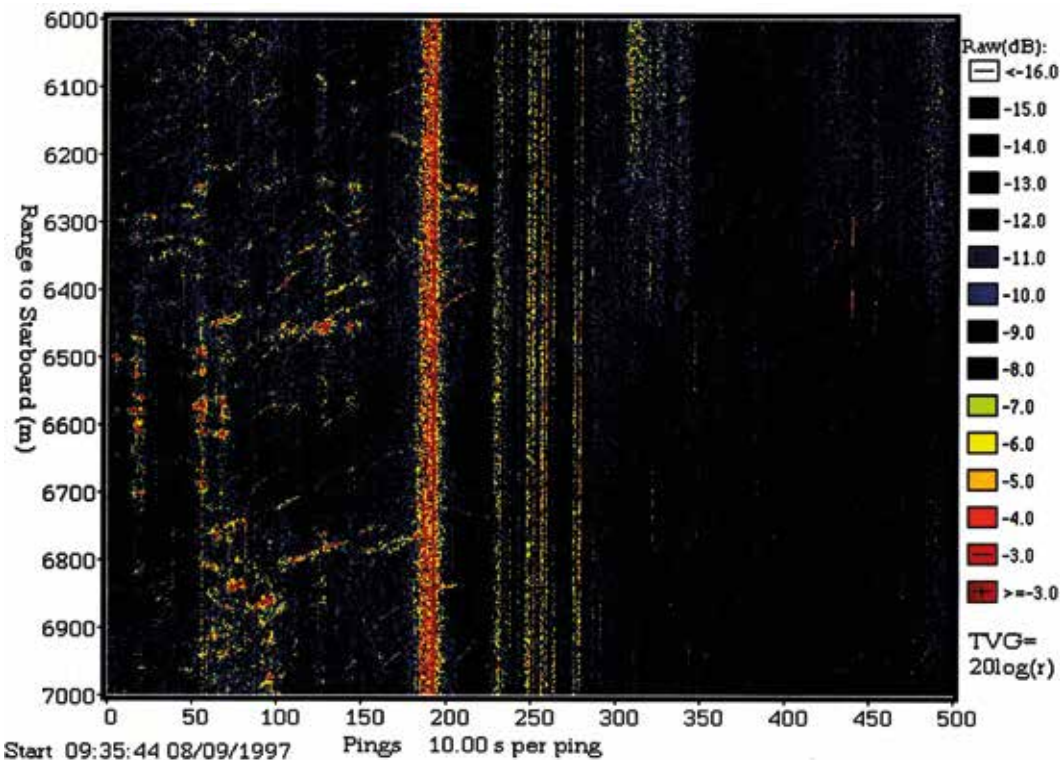


Рис. 11.54. Эхограмма регистрации разреженных концентраций лососевых – левая часть эхограммы (горизонтальная шкала – циклы лоцирования)

при экспериментальных исследованиях профессора Макриса из Северо-восточного университета США в 2003 г. (рис. 11.55). К сожалению, в работе не приводятся ни характеристики использованной аппаратуры, ни виды обнаруженных объектов.

По нашему мнению, при данных исследованиях также применялась низкочастотная гидроакустическая аппаратура бокового обзора или электронно-сканирующие системы.

Изложенное свидетельствует о целесообразности применения специализированной гидроакустической аппаратуры при серьезных рыбохозяйственных исследованиях,

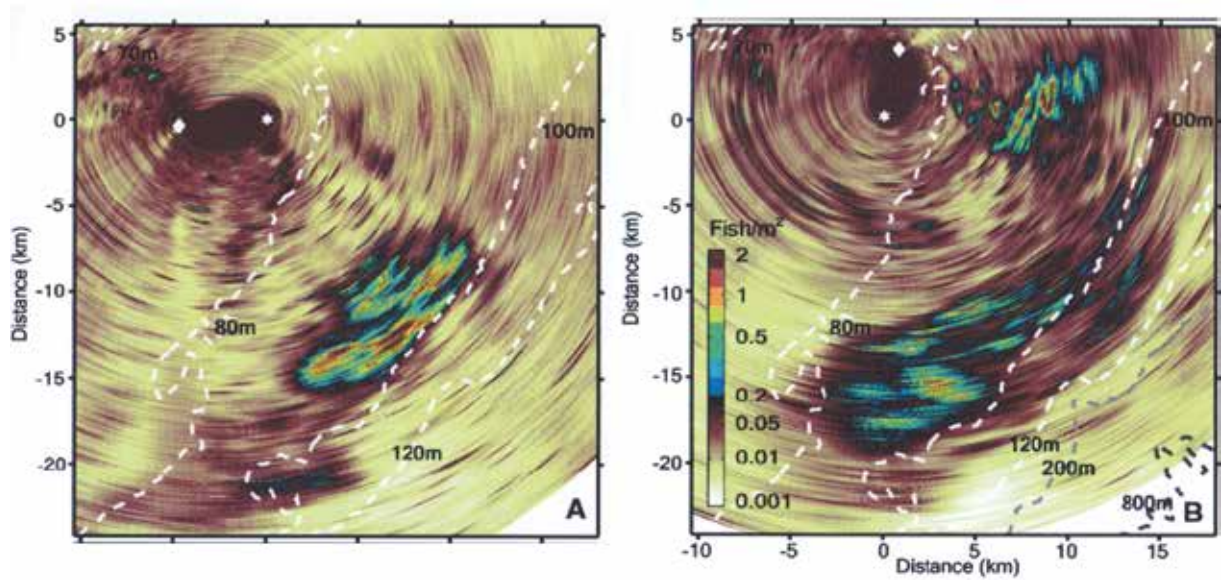


Рис. 11.55. Акустическое отображение скоплений рыб на экране дисплея гидролокатора при их обнаружении на больших расстояниях:

А – 14 мая; В – 15 мая (пунктирными линиями отмечены изобаты)

но при учете возможных ограничений (в основном гидрологического характера) и качественном методологическом выполнении.

В отношении контроля подходов лососевых к прибрежным зонам более приемлемой представляется сеть из m -го количества рядов гидроакустических буев активной горизонтальной локации кругового обзора приповерхностного слоя. Каждый ряд сети включает n -е число последовательно соединенных (с помощью кабелей) буев с запоминанием акустической информации [Кудрявцев, 2010]. Установка рядов буев осуществляется подобно дрефтерных порядкам. После установки сети поисковое судно периодически считывает запомненную информацию буев для ее анализа на борту или передачи на береговую станцию. Как было указано, горизонтальная локация лососей в приповерхностном слое показала свою эффективность.

ГЛАВА 12.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ ПРИ ОБЛОВЕ ОБНАРУЖЕННЫХ СКОПЛЕНИЙ

Основное применение указанные средства находят при активных методах промышленного лова рыбы и других объектов промысла: кошелькового и тралового. В 60–70-е гг. использование рыболокаторов горизонтальной локации, позволивших существенно сократить недостатки применявшегося у нас метода наведения кошельковых сейнеров с самолетов, связанных с погодными условиями и небольшими глубинами визуальных наблюдений, во многом способствовало расширению отечественного промысла рыбы кошельковыми неводами.

Лишь благодаря созданию телеметрических приборов контроля параметров трала непосредственно в процессе траления стало практически возможным развитие и распространение разноглубинного тралового промысла [Кудрявцев, 1974]. Вначале (в конце 50-х – начале 60-х гг. прошлого века) разрабатывались приборы для измерения горизонта хода трала с гидроакустической линией связи. В связи с недостаточностью информации только о глубине хода трала при пелагических тралениях далее были начаты разработки траловых зондов с датчиками информации эхолокационного типа, в т. ч. и для оценки поведения объектов лова в зоне работы трала. В 1964 г. нами были проведены морские натурные испытания прототипа тралового зонда с эхолокационным датчиком вертикальной локации и кабельной линией передачи [Кудрявцев, Романенков, 1965].

Следует отметить, что, когда мы в БалтНИРО начинали разработки технических средств гидроакустической траловой телеметрии и проводили опрос промысловиков, они, не имея представления о реальном поведении объектов в зоне трала, говорили, что им достаточно знать лишь глубину хода трала.

12.1. ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ОБЛОВЕ РЫБЫ КОШЕЛЬКОВЫМИ НЕВОДАМИ

После поиска и обнаружения скопления (косяка) с помощью гидролокатора и предварительной оценки пригодности его для облова оператором (по силе эхосигналов, на основании опыта работы в данном районе и т. д.), он служит средством информационного обеспечения наведения на него судна, а также и его последующего облова.

При приближении к косяку оператор гидролокатора определяет его основные параметры – горизонтальную протяженность и протяженность в направлении зондирования, размер по вертикали, глубину расположения, ориентировочную плотность и максимум плотности, скорость и направление перемещения, реакцию рыбы на шумы судна, иногда – форму скопления. Когда характеристика района и поведение рыбы в нем известны, часть из указанных параметров может не уточняться. Получение полного представления о косяке облегчает выбор правильного способа его облова и сокращает количество малорезультативных заматов кошелькового невода.

Большую помощь оператору при слежении за скоплением во время маневрирования судна оказывают устройства автоматического сопровождения цели, предусмотренные

в современных гидролокаторах. После выбора объекта для облова оператор включает систему «захвата цели» и производится автоматическое слежение за косяком при выходе судна в исходное положение для последующего облова скопления.

С уменьшением дистанции от судна до косяка целесообразно постепенно снижать усиление и длительность зондирующих импульсов, а также своевременно переходить на меньшие диапазоны индикации дисплея. Это способствует более точному определению характеристик косяка, т. к. при уменьшении усиления сужается полярная характеристика дальности гидролокатора и, следовательно, повышается его разрешающая способность по углу, а при сокращении длительности посылки повышается разрешающая способность аппаратуры по дистанции, что важно при оценке плотности и протяженности скопления в направлении зондирования (уменьшается также затягивание принимаемого эхосигнала за счет внутривосячной реверберации).

Особенно это относится к низкочастотным гидролокаторам, имеющим достаточно широкие ХН, которые могут приводить к весьма большим погрешностям при определении характеристик косяка. При наличии в станции высокочастотного тракта с узкой ХН параметры скопления можно определить более точно. В случае использования гидролокаторов одновременного кругового или секторного обзора такая оценка требует существенно меньших затрат времени.

Успех облова во многом зависит от точности определения параметров косяка и его поведения. Одним из основных параметров, определяющих целесообразность облова скопления, является его горизонтальная протяженность l , т. е. расстояние или угол α между кромками косяка в горизонтальной плоскости (угловая протяженность косяка зависит от расстояния r до него): $l = 2r \operatorname{tg} \alpha / 2$.

Зная горизонтальную протяженность косяка, можно быстро определить дистанцию r_3 , на которой может держаться судно при замете кошелькового невода вокруг него. Она равна разности между радиусами невода R_H и косяка R_K : $r_3 = R_H - R_K = (L_H / 2\pi) - R_K$ (L_H – длина невода). При размерах косяка, превышающих размеры невода, стараются обловить наиболее плотную часть скопления.

Протяженность косяка в направлении зондирования определяется по длительности отметок эхосигналов на экране дисплея при развороте акустической антенны (или характеристики направленности) от одной его кромки до другой в горизонтальной плоскости. Одновременно оценивается плотность скопления, как правило, на основе опыта оператора, учета предшествующих обловов и т. д., а иногда и центр плотности косяка [Дежарев, 1969]. В общем случае отсчет длины отметок эхосигналов целесообразно уменьшать на 25–30%, т. к. длительность эхосигналов от плотных косяков увеличивается за счет многократных отражений акустической энергии от входящих в него рыб.

Для оценки плотности скопления опытные операторы эффективно использовали слуховые индикаторы и достаточно четко определяли возможную плотность по характеру звучания принимаемых эхосигналов. Наиболее объективную оценку плотности скопления можно получить при одновременном анализе показаний всех выходных устройств станции (электронного и слухового индикаторов).

Глубина нахождения косяка также является весьма важным параметром. При кошельковом лове этот параметр определяет возможность облова данного косяка неводом с определенной высотой стенки. Глубина h , на которой находится обнаруженный косяк, определяется по углу наклона β акустической системы или характеристики направленности при электронном сканировании и дистанции r до него, $h = r \operatorname{tg} \beta$. По этой формуле получают данные для составления соответствующих таблиц или номограмм (см. рис. 12.1). В пульты управления наиболее совершенных гидролокаторов встроены соответствующие индикаторы для определения глубины нахождения косяка.

При определении глубины нахождения косяка необходимо учитывать расстояние от антенны до поверхности воды, которое добавляют к значению, полученному по номограмме.

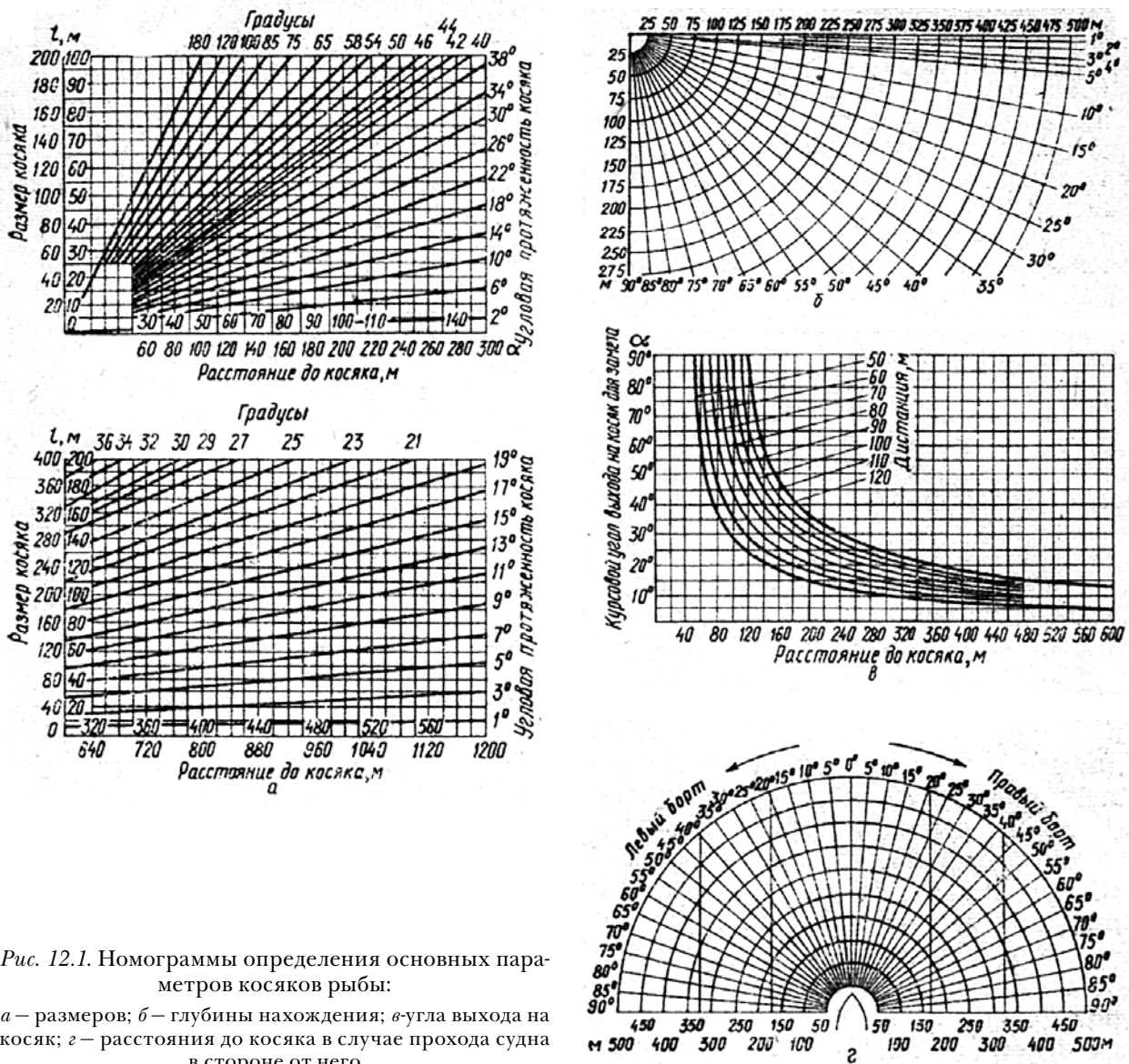


Рис. 12.1. Номограммы определения основных параметров косяков рыбы:

a – размер; *b* – глубины нахождения; *γ* – угла выхода на косяк; *г* – расстояния до косяка в случае прохода судна в стороне от него

Определять глубину косяка, если он находится на большом расстоянии от судна, нецелесообразно из-за возможной рефракции лучей, обуславливающей получение неточных данных. На дистанциях порядка 300–600 м ошибка будет меньше. Размер косяка по вертикали можно определять с помощью номограммы (см. рис. 12.1 *a*). При определении указанных параметров, а также горизонта наиболее плотной части скопления необходимо работать при возможно меньших усилении приемного тракта, длительности импульса и узкой характеристике направленности. Более точные оценки глубины расположения косяка и его вертикальной протяженности могут быть получены при вертикальной локации. Проходить над косяком можно в тех случаях, когда известно, что рыба в нем незначительно реагирует на шумы судна.

При лове рыбы кошельковыми неводами во многих случаях важно знать направление и скорость перемещения косяка для получения более полной информации о поведении рыбы. Когда используется гидролокатор с однолепестковой ХН, определение указанных параметров вызывает большие затруднения и во многом зависит от опыта оператора.

При выходе судна на курс перемещения косяка эхосигналы от него часто резко ослабевают или пропадают. Это происходит в том случае, когда косяк озвучивается зондирующими импульсами в направлении его движения (сзади), т. е. когда курсы судна и косяка совпадают, и особенно при регистрации быстро плавающих рыб. Отражательная

способность рыб в косяке в данном случае (при озвучивании с хвоста) сильно уменьшается, что может служить косвенным признаком для определения направления движения косяка. Успех при облове такого косяка зависит от точности оценки направления и скорости его перемещения.

В случае применения рыболокационных станций одновременного кругового или секторного обзора определение параметров движения рыбы значительно облегчается и требует меньших затрат времени. Электронный дисплей фактически выполняет при этом функции планшета.

При оценке косяка и выборе наиболее рационального способа его облова необходимо знание реакции рыбы на шум, создаваемый судном. Если по сведениям, полученным с других промысловых судов, работающих в данном районе, или при предыдущих заметах или тралениях, установлено, что рыба не распугивается проходящим над ней судном, то можно получить более точные данные о параметрах косяка, пройдя над ним двумя перпендикулярными галсами. Если рыба резко реагирует на шум, создаваемый судном (опускается на глубину, рассеивается или резко меняет направление своего движения), проходить над косяками или очень близко подходить к ним не следует (параметры косяка нужно определять на дистанции 200–300 м).

В некоторых случаях при кошельковом лове возникает необходимость определения угла выхода судна на косяк в начале замета. Величину его можно определить исходя из расстояния до косяка перед выходом на замет и заданного расстояния до него в начале замета с помощью графика (см. рис. 12.1 *в*), и на одной оси которого нанесены расстояния до левой кромки косяка, на другой — курсовые углы выхода на косяк. Кривые на графике рассчитаны для расстояний до: косяка в начале замета от 50 до 120 м.

После определения основных параметров косяка и его поведения, направления ветра и течения (если оно имеется в данном районе) проводятся необходимые маневрирование судна и последующий облов рыбы.

Для более эффективного использования гидролокатора оператор должен в первую очередь знать, на каких глубинах в районе лова в данное время может находиться рыба. Днем, когда рыба обычно находится у дна или только начинает подниматься от грунта, угол наклона антенны устанавливают в пределах от 3 до 15° в зависимости от глубины места. При большей глубине и угол наклона выбирается большим. По мере подъема рыбы к поверхности воды наклон антенны уменьшают. При обнаружении скопления рыбы на большой глубине ждут, пока она не поднимется на такой горизонт, на котором можно проводить замет невода.

Обычно с наступлением сумерек и заходом солнца рыба поднимается почти к самой поверхности воды. Как правило, скопление поднимается достаточно быстро, поэтому необходимо постоянное наблюдение за рыбой с помощью гидролокатора. В связи с этим после обнаружения скопления на большой глубине наклон антенны устанавливают, чтобы рыболокатором фиксировалась только верхняя кромка скопления (принимаются эхосигналы небольшой интенсивности) и разворачивают антенну в направлении центра скопления в горизонтальной плоскости. Контрольные зондирования проводят периодически несколькими послылками. К моменту ожидаемого подъема рыбы гидролокатор включают на непрерывную работу. Если интенсивность отметок эхосигналов увеличивается, значит, рыба начала подниматься к поверхности воды (т. е. гидролокатор уже фиксирует не слабые отраженные сигналы от кромки скопления, а эхосигналы от большей его части).

Иногда замет невода начинают раньше, чем рыба поднимется на глубину, достаточную для обмета ее неводом с данной высотой стенки, рассчитывая, что за время замета косяк успеет подняться. Если по данным гидролокатора за это время рыба не поднялась, то делают выдержку в течение нескольких минут и лишь после этого начинают кошелькование.

Если косяк рыбы при маневрировании или обходе судна (средних размеров) вокруг него на дистанции 200–250 м не рассеивается, то замет будет результативным, в противном случае заметы, как правило, оказываются неудачными.

Кошельковый лов более быстротечен, чем лов разноглубинными тралами, хотя оба способа относятся к активным методам лова и требуют от оператора гидролокационной станции внимания, быстроты и четкости действий. Замет невода проводят обычно на ветер, но при тихой погоде (при ветре 1–2 балла или маловетрии) его можно проводить из любого положения, учитывая только скорость и направление течения. При облове многих пелагических рыб необходимо давать полный ход на расстоянии порядка 300–350 м от косяка, т. к. увеличение скорости хода на близких дистанциях может напугать рыбу, в результате чего она уйдет на большую глубину.

В зависимости от направления ветра, скорости и направления течения, а также скорости и направления движения косяка применяют различные способы замета невода. Когда косяк неподвижен или малоподвижен, замет не представляет больших сложностей. При длине невода 600–700 м замет начинается на расстоянии до косяка приблизительно до 200 м и при курсовых углах в пределах от 10 до 25° на левую кромку косяка и может проводиться на среднем ходу судна при расстояниях до скопления 40–80 м (при большей длине невода указанные расстояния могут быть несколько увеличены). В процессе замета курсовой угол на кромку косяка при поддержании контакта с ним постепенно увеличивается до 60–90°.

При облове подвижных косяков очень важно правильно выбрать точку начала замета невода. В этом случае замет обычно начинают при меньших расстояниях до левой кромки косяка рыбы, чем при облове малоподвижных скоплений (исключением является обмет косяка, движущегося в направлении хода судна или на пересечение курса замета; в этом случае необходимо увеличить скорость судна до максимальной, т. к. при изменении скорости хода и, следовательно, увеличении шума косяк может изменить направление своего движения).

Начальный угол на левую кромку косяка при облове подвижных косяков изменяется в более широких пределах в зависимости от направлений движения косяка, ветра и течений. Когда косяк движется навстречу судну или по направлению движения судна, выбирают угол в пределах от 10 до 20°, а когда косяк движется в сторону левого борта, начальный угол на его левую кромку выбирают от 35–60° в зависимости от направления течения по отношению к направлению ветра (замет в любом случае проводится на ветер). Если косяк движется в сторону правого борта, то расстояние до косяка в начале замета выбирают, как и в случае перемещения косяка по направлению движения судна, в пределах от 60 до 120 м (при небольшой длине невода); исходный курсовой угол на левую кромку косяка также выбирают малым (0–5° или 0–10°).

При этом необходимо поддерживать минимальное расстояние до косяка в первой стадии замета (до поворота). Если косяк быстро смещается вправо, курс судна в начале замета необходимо держать на центр косяка (или ближе к центру) и проходить на минимальном расстоянии от него. В процессе замета постоянно поддерживается контакт с косяком.

В начале замета рекомендуется держать акустический контакт с кромкой косяка, а как только курсовой угол достигнет 60–90°, необходимо следить за центром скопления. Чем ближе судно подходит к скоплению, тем быстрее меняется курсовой угол на него. В связи с этим операторы часто теряют акустический контакт с косяком примерно в середине замета, когда расстояние до него составляет 40–50 м, а курсовой угол — 30–50°. При таком расстоянии на полном ходу судна курсовой угол очень быстро увеличивается и необходимо оперативно разворачивать антенну в правую сторону и искать косяк в направлении 90° правого борта, не забывая одновременно изменять наклон характеристик направленности гидролокатора.

Применение современных электронно-сканирующих рыбопоисковых гидролокаторов одновременного крупносекторного или кругового обзора с цветными дисплеями отображения, обеспечивающих получение в течение каждого цикла зондирования данных обо всем косяке и соседних скоплениях и улучшающих наглядность отображения информации о подводной обстановке вокруг судна и траектории судна при связи со

спутниковыми радионавигационными системами, телеметрических приборов контроля скорости и глубины погружения нижней подборы кошелькового невода и гидроакустических устройств отпугивания рыбы от выхода из ворот невода значительно облегчает работу оператора и способствует повышению эффективности кошелькового лова (рис. 29 д и 73).

При разноглубинном траловом лове (особенно при облове косяков и скоплений) в поверхностных и промежуточных слоях воды на достаточно больших отстояниях рыбы от дна гидролокаторы частично выполняют те же функции, что и при кошельковом лове. Это относится к поиску рыбы и к определению параметров косяков и скоплений. Номограмма, представленная на рис. 12.1 б, позволяет определять глубину нахождения косяка по наклонной дальности до него и углу наклона характеристики направленности гидролокатора.

Перед отдачей трала и непосредственно в процессе самого траления методика использования гидроакустической рыболокационной техники существенно отличается от применяемой при замете кошелькового невода.

Во-первых, в случае прицельного разноглубинного тралового лова только комплексное применение различных типов средств промысловой гидроакустики обеспечивает его высокую эффективность (при кошельковом лове, как правило, используется только аппарата горизонтального действия).

Во-вторых, в связи с большим диапазоном глубин тралового лова (от самых малых глубин до глубин, превышающих 1000 м) методика применения гидроакустических приборов в значительной степени определяется условиями промысла, в т. ч. глубинами траления.

При прицельном разноглубинном лове в общем случае участвуют три типа средств промысловой гидроакустики: рыболокаторы горизонтального действия, рыболокаторы вертикального зондирования и траловые зонды – телеметрическая аппаратура контроля параметров орудий лова и подводной обстановки в зоне их действия [Кудрявцев, 1972]. При кошельковом лове лишь иногда применяются телеметрические гидроакустические приборы контроля времени и глубины погружения разных участков нижней подборы невода (нередко лишь при проверке и испытаниях новых неводов, хотя более широкое их использование представляется целесообразным, в частности при наличии подводных течений, влияющих на характер погружения подборы невода во время кошелькования).

При облове тралом скоплений рыбы, находящейся в поверхностных слоях воды в виде небольших стаек или косяков, после обследования акватории путем горизонтального и вертикального лоцирования трал выводится на необходимый горизонт с помощью траловых зондов (при постановке трала необходимо учитывать направление и скорость течения). Затем в процессе траления рыболокационной станцией ведется впереди судна поиск наиболее плотных и крупных косяков, примерно в пределах $\pm 45^\circ$ левого и правого борта исходя из возможностей маневрирования судна с тралом.

Одновременно аппаратурой вертикального действия постоянно регистрируются эхосигналы от косяков под килем судна, тем самым уточняется отстояние их от поверхности воды для корректировки горизонта хода трала по показаниям тралового зонда. В некоторых случаях приходится корректировать горизонт хода трала непосредственно по данным тралового зонда, если при движении трала на заданной глубине, выбранной на основании показаний прибора или тракта вертикальной локации, зонд не фиксирует рыбы в устье трала. Часто это связано с уходом косяка рыбы в более глубокие слои воды или в сторону от курса судна под действием шума, издаваемого проходящим над косяком судном.

В связи с этим при облове рыбы разноглубинным тралом на малых глубинах необходим некоторый запас мощности главного двигателя и траловой лебедки для вывода трала на горизонт нахождения косяка.

При тралениях в поверхностных и приповерхностных слоях воды (до 20 м, а иногда и на больших глубинах) кильватерная струя оказывает мешающее влияние на работу тра-

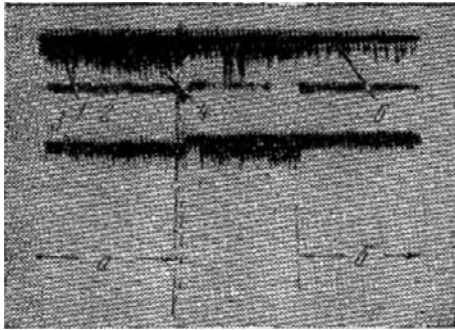


Рис. 12.2. Регистрация эхосигналов от кильватерной струи у кабельных траловых зондов:

1 – верхняя подбора; 2 – нижняя подбора; 3 – грунт; 4 – кильватерная струя; 5 – уменьшение помех при погружении трала (участок а – горизонт хода трала 10 м; участок б – горизонт хода трала 13 м)

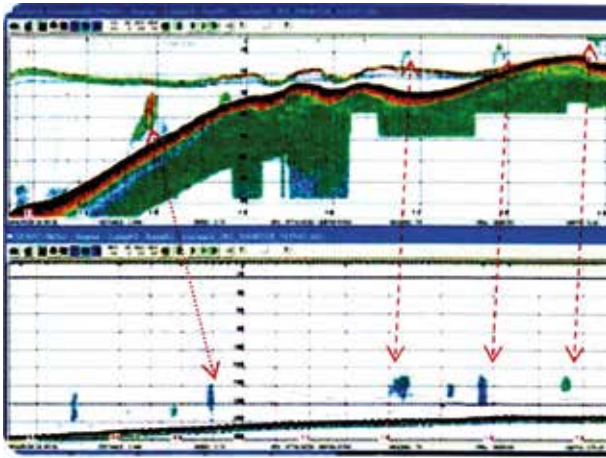


Рис. 12.3. Синхронные (и скорректированные по времени) эхограммы рыбопоисковой аппаратуры вертикальной локации и тралового зонда при придонном тралении (НИС «Галасса», рабочая частота 38 кГц, проект SIFAMI). Стрелками отмечены одни и те же косяки

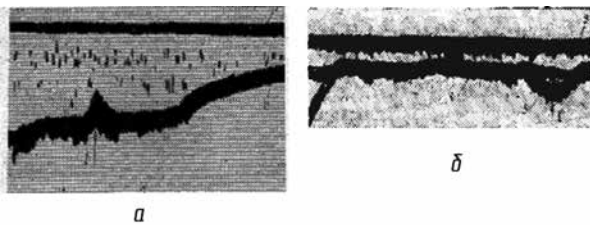


Рис. 12.4. Эхолокация бортовой аппаратурой вертикального действия препятствия на морском дне (а) и эхограмма тралового зонда (б), на которой показан обход тралом указанного препятствия в точке I

и недостаточных мощностях судна и траловой лебедки.

В процессе подхода к косяку с тралом оператор постоянно уточняет глубину нахождения косяка гидролокатором (и при необходимости корректируется горизонт хода тра-

ловых зондов с гидроакустической линией связи и приводит к маскировке полезных эхосигналов отраженных от кильватерной струи у кабельных систем (рис. 12.2).

В связи с нередкими ситуациями различного поведения рыбы в зоне траулера и районе трала важно иметь синхронные эхограммы судовой эхолокационной аппаратуры и траловой с временной коррекцией, определяемой расстоянием между судном и тралом.

На рис. 12.3 представлены синхронные эхограммы эхолокатора вертикального действия и тралового зонда при облове небольших косяков при придонном тралении.

На рис. 12.4 приведен пример обхода тралом препятствия на дне при одновременном наблюдении эхограмм судового эхолокатора вертикального действия и телеметрического тралового зонда.

При придонных тралениях в случае жестких грунтов требуется большое внимание судоводителя по контролю расстояния между тралом и дном для избежания возможных порывов его нижней подборы. В результате это привело к созданию приборов определения касания нижней подборы трала с дном с гидроакустической линией связи (фирмами Scanmar, Simrad).

На рис. 12.5 показан пример траления косяков большой протяженности по вертикали, когда тралом захвачена лишь часть косяка

При облове отдельных крупных косяков или скоплений на больших глубинах тактика использования аппаратуры горизонтального действия частично меняется. После обнаружения косяка судно подходит к нему на некоторое расстояние, сбавляет скорость для оценки параметров косяка и подготовки к отдаче трала. После определения характеристик косяка судно выходит на курс траления. Трал отдается с таким расчетом, чтобы он находился несколько выше верхней кромки косяка, определенной ориентировочно рыболокатором горизонтального действия, т. к. опустить трал легче и быстрее, чем его поднять, особенно при больших его размерах

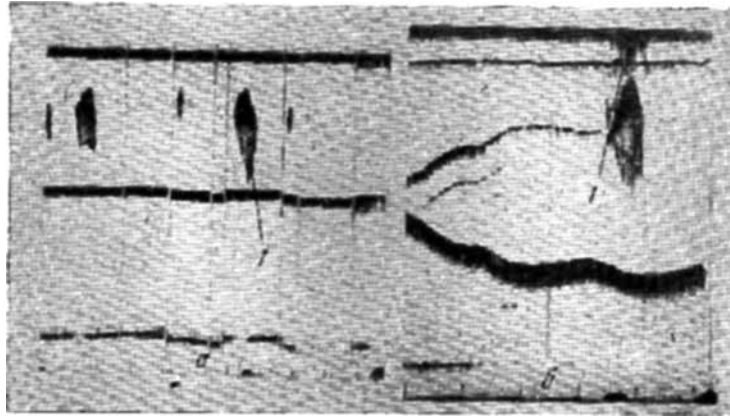


Рис. 12.5. Регистрация косяков сельди бортовой аппаратурой вертикальной локации (а) и аппаратурой контроля (б) (улов 15 т за 30 мин): 1 – обловленный косяк (тралом захвачена лишь часть косяка). На эхограмме тралового зонда (правая часть в более крупном масштабе) также отображена трасса эхосигналов от поверхности воды вследствие озвучивания тыльной стороной антенны зонда – показывает расстояние от трала до поверхности воды.

ла), т. е. следит за косяком путем постепенного изменения наклона ХН иногда практически до момента прохождения судна над ним. При использовании устройств повышения помехоустойчивости гидролокатора (например, корреляторов, блоков накопления [Кудрявцев, 1978] возможно слежение за косяком и в кормовых курсовых углах для более точного вывода трала на скопление. При прохождении судна над косяком уточняют горизонт его нахождения и по полученным данным более точно устанавливают глубину хода трала. При малоподвижных скоплениях наиболее результативным улов обычно бывает тогда, когда устье трала выводится на верхнюю половину косяка, зарегистрированного аппаратурой вертикального действия. Указанная методика работы применяется при тралениях больших косяков и скоплений.

Поведение рыбы в устье трала оценивается по показаниям тралового зонда, когда косяк начинает им фиксироваться. Если характер регистрации эхосигналов от рыбы остается подобным полученному на экране дисплея судовой аппаратуры вертикальной локации, это означает, что рыба не задерживается в устье трала. Когда же отображение отметок эхосигналов от рыбы в устье трала по продолжительности значительно больше ширины регистрации отметок эхосигналов от косяка под судном, необходимо увеличить скорость траления, т. к. рыба движется в устье трала со скоростью, равной скорости судна [Кудрявцев, 1972].

Если скопление большое, то иногда после прохода косяка тралом судно разворачивается с тралом на обратный курс, и проводится повторное траление по этому скоплению.

При наличии в районе работы судна сравнительно небольших косяков рыболокатором горизонтального действия постоянно проводится зондирование обстановки впереди судна для обеспечения выхода судна с тралом последовательно на ряд косяков. В этом случае слежение за очередным косяком до прохода над ним судна не проводится. После оценки глубины нахождения этого косяка на небольшом расстоянии от судна и корректировки курса судна в соответствии с его угловым положением в горизонтальной плоскости гидролокатором продолжается поиск в дальней зоне. С помощью аппаратуры вертикального действия уточняется фактическая глубина нахождения косяка и ведется наблюдение за прохождением его в устье трала с помощью тралового зонда. Подобным образом проводится траление следующих косяков.

Прицельный разноглубинный лов в большинстве случаев требует одновременной работы всего комплекса указанных средств промысловой гидроакустики, т. к. объекты лова не являются стационарными целями, часто меняют свое поведение, перемещаются как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях за сравнительно короткий про-

межутков времени. Особенно важны одновременная работа рыболокатора вертикального действия и тралового зонда (во всех случаях) и наблюдение за их показаниями, т. к. по характеру изменения отображения эхосигналов от одних и тех же косяков в районе судна и в районе трала можно быстро оценить возможные изменения в поведении рыбы под влиянием трала и своевременно скорректировать или поменять методику и тактику облова. Это обеспечивает наиболее производительную работу судна при добыче рыбы.

Иногда под влиянием течений трал во время траления идет не в кильватере судна, а в стороне от него. В таких случаях целесообразно не проходить над обнаруженными косяками, а оставлять их с левого или правого борта в зависимости от положения трала. Расстояние от судна до косяка при прохождении его на траверсных курсовых углах при этом может быть определено с помощью номограммы (рис. 12.1 з), на которой нанесена шкала дальностей и углов на косяк в горизонтальной плоскости. Например, если косяк обнаружен на расстоянии 500 м под углом 15° левого борта, то судно при неизменном курсе пройдет около него при курсовом угле, равном 90° , на расстоянии около 120 м.

В некоторых случаях до отдачи трала с помощью рыболокационной аппаратуры проводят всестороннюю оценку обнаруженного косяка, т. е. заканчивают измерение параметров, проходя над ним, уточняя глубину нахождения и вертикальную протяженность косяка при вертикальном лоцировании. После этого судно разворачивается и выходит в точку отдачи трала, выбранную с учетом полученных данных, а также направлений ветра и течения.

Некоторые промысловые рыбы (скумбрия, сельдь, ставрида, сардина и др.) совершают суточные вертикальные миграции в довольно большом диапазоне глубин. Утром, когда рыбы опускаются к грунту, верхняя подбора трала должна находиться ниже верхней кромки регистрации эхосигналов от косяка на экране дисплея судового эхолокатора (на величину, зависящую от скорости опускания рыбы и расстояния от судна до трала, вернее времени подхода трала в точку нахождения косяка при его регистрации аппаратурой вертикальной локации), а вечером, когда рыба поднимается в поверхностные слои воды, — выше верхней кромки косяка.

Применение современных дисплеев комплексного наглядного и удобного для восприятия представления принимаемой информации от большого количества средств рыбохозяйственной гидроакустики, обеспечивающих ведение прицельного тралового лова, существенно облегчает работу судоводителя.

При облове тралом рыбы на небольших и средних глубинах с помощью гидроакустической техники можно получать необходимые сведения практически от момента обнаружения скоплений аппаратурой горизонтальной локации (как с однолепестковыми характеристиками направленности акустических антенн, так и с более современной квазиодновременного кругового или секторного обзора) до попадания рыбы в мешок трала и его наполнения (с помощью телеметрических индикаторов степени наполнения трала рыбой) [Кудрявцев, 2013].

В течение этого периода аппаратура промысловой гидроакустики обеспечивает получение данных для слежения за рыбой при подходе к ней судна с тралом, для вывода трала на заданный горизонт, для уточнения параметров скоплений и косяков при прохождении над ними судна, информации о параметрах трала, о попадании рыбы в устье трала, а также о ее положении относительно трала по вертикали и в горизонтальной плоскости для более точной и объективной оценки возможных изменений поведения рыбы в зоне трала при ее облове и учета этих факторов при следующих тралениях.

Гидролокаторы с устройствами помехозащиты позволяют также получать данные о рыбе и трале в кормовых секторах судна, т. е. наблюдать процесс встречи трала с косяком для учета возможных изменений поведения рыбы от момента прохождения над ней судна до момента подхода к ней трала (для корректировки схемы последующих тралений). Так как в данном случае трал находится на небольшом расстоянии от судна, указанный промежуток времени составляет лишь несколько минут, и в связи с достаточно

большой инерционностью системы судно–трал корректировку положения трала в больших пределах осуществить за короткое время весьма сложно.

При тралениях на больших глубинах расстояние между тралом и судном больше, чем при тралении в поверхностных или промежуточных слоях и, следовательно, продолжительнее будет промежуток времени для корректировки положения трала исходя из возможных изменений положения облавливаемого косяка в пространстве после прохождения над ним судна или отклонения трала под воздействием течений. Кроме того, могут быть большими и абсолютные величины отклонений трала от курса судна, приводящие к тому, что скопления рыбы не будут захвачены тралом даже при точном измерении глубины его нахождения аппаратурой вертикального действия, правильном определении горизонта хода трала сетным зондом и нормальных параметрах трала.

При большом расстоянии между тралом и судном даже гидролокаторы, способные работать в кормовых курсовых углах, не могут обеспечить получение данных с требуемой точностью для наведения трала на рыбу (вследствие недостаточной разрешающей способности, рефракционных ограничений и других факторов). Для повышения точности определения углового положения трала относительно судна (в горизонтальной плоскости) могут быть использованы акустические буи для установки на трале и последующего их пеленгования с помощью судового гидролокатора. Целесообразным представляется также создание траловых локационных систем обзора в передней зоне перед тралом, обеспечивающих информацию непосредственно о положении косяка относительно трала после прохода над ним судна для более точного наведения трала на косяк [Кудрявцев, 1975; Кудрявцев, 1976 б].

Развитие систем дистанционного измерения и контроля в процессе отдачи и непосредственно в процессе траления характеристик и параметров трала также способствует повышению результативности лова и сокращению непроизводительных затрат времени и экономии топлива.

Датчики углов, глубины траловых досок и расстояния между ними обеспечивают полный контроль при отдаче трала: можно следить за глубиной каждой доски, расстоянием между ними и за их углами крена и дифферента, чтобы избегать каких-либо осложнений. Если при постановке возникают какие-либо проблемы с показаниями указанных датчиков и изменение скорости вытравливания ваеров не приводит к исправлению ситуации, следует прекратить отдачу и выбрать трал для проверки. При установке датчиков углов на сетной части можно сразу же обнаружить зацепы, перехлесты и другие отклонения.

При донном тралении рекомендуется приостановить травление ваеров, когда доски будут в нескольких метрах от грунта, выждать момент погружения трала на ту же глубину, а затем одновременно опускать трал и доски на дно. Благодаря этому можно избежать опрокидывания досок, волочения их по грунту и возможных повреждений оснастки. Эхолокационный датчик контроля рыбы в районе устья трала целесообразно устанавливать так, чтобы он находился непосредственно над грунтопом. На рис. 12.6 представлены схемы характера движения трала (I) и соответствующие отображения показаний телеметрической аппаратуры контроля в ситуации установки эхолокационного датчика на верхней подборе с излучением вниз (II и III); II – в ситуации, когда ХН датчика не захватывает нижнюю подбору трала; III – в ситуации, когда нижняя подборка находится в зоне действия датчика.

Подводные течения, особенно боковые, отклоняют поток воды в трал от оптимального, если только скорость и курс не скорректированы так, чтобы поток воды входил в трал перпендикулярно плоскости устья. Если трал не идет симметрично относительно потока воды, т. е. вектор потока (складывается из вектора скорости судна и вектора скорости течения) направлен под углом к оси трала, форма трала становится асимметричной. Ячеи на стороне выхода потока из трала будут растягиваться, что позволяет рыбе уходить из трала. Разработанный фирмой Сканмар датчик скорости/симметрии

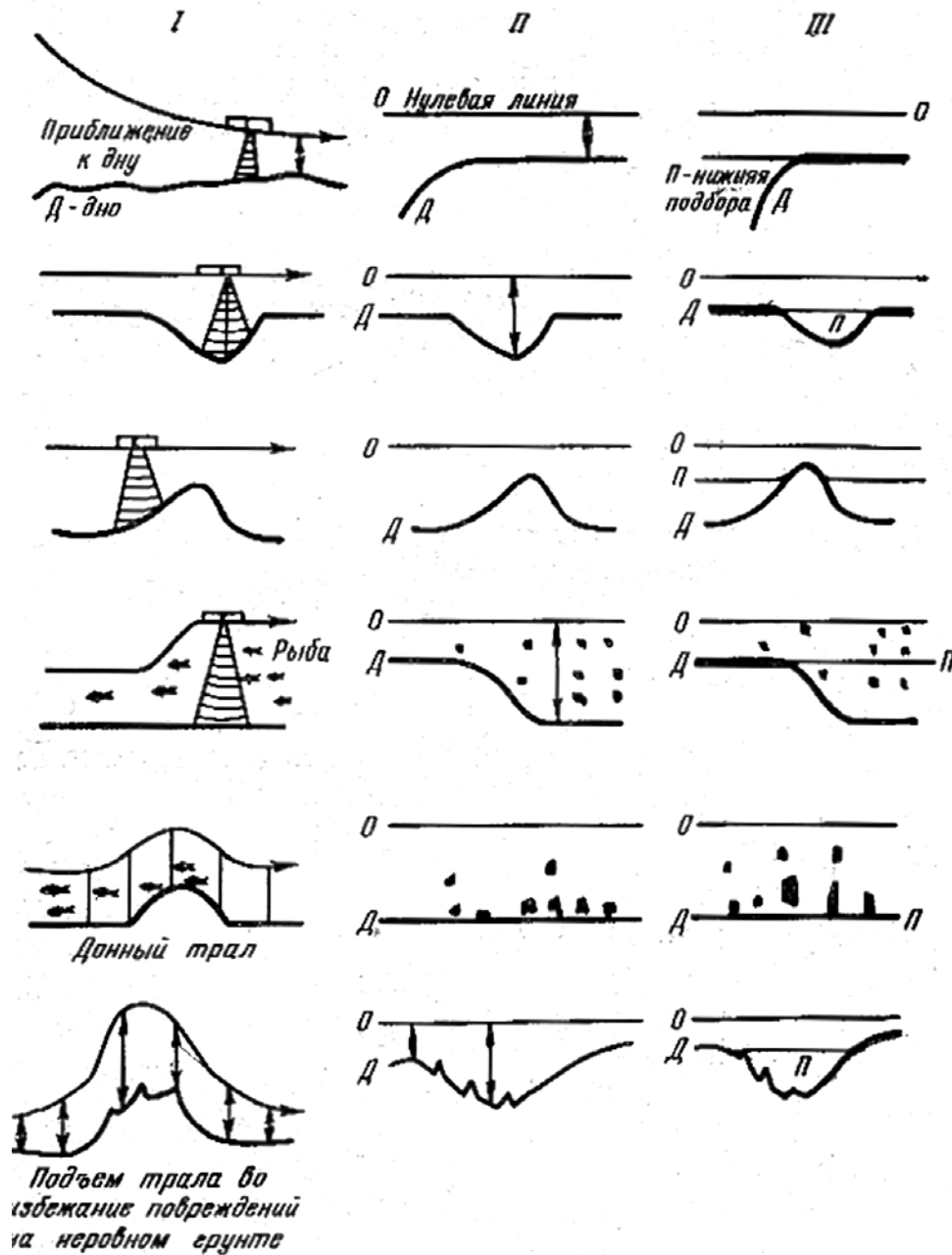


Рис. 12.6. Схемы движения трала I и характера показаний эхолотационного датчика аппаратуры контроля трала, установленного на верхней подборе трала в ситуации, когда характеристика направленности датчика не захватывает нижнюю подбору трала – II, и в ситуации, когда нижняя подборка находится в зоне действия датчика – III

снабжен инклинометром для обеспечения точности измерений. Он используется для коррекции показаний в случае негоризонтальности положения датчика.

Корректируя длину ваеров так, чтобы линия траловых досок не была больше перпендикулярной направлению траления, можно восстановить симметрию трала относительно потока воды (при боковых подводных течениях), хотя длины ваеров будут неравными, а трал больше не будет идти строго за судном.

По данным телеметрической аппаратуры контроля обстановки в районе работы трала можно своевременно судить о повреждениях трала, его порывах и др.

На рис. 12.7 представлены некоторые примеры эхограмм, позволяющих обнаруживать повреждения трала.

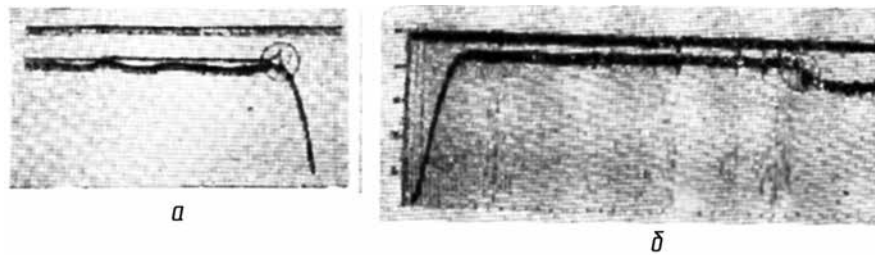


Рис. 12.7. Регистрация на эхограмме телеметрической аппаратуры повреждения трала при задеве:
а – (1 – обрыв нижней пласти); б – обрыв нижней подборы трала аппаратурой ФНР-50

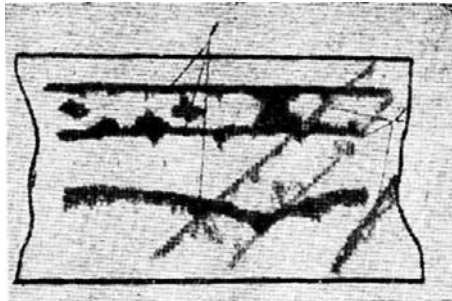


Рис. 12.8. Помехи от соседних приборов контроля у аппаратуры с гидроакустической линией связи и непосредственной регистрацией информации на экране дисплея:

1 – регистрация сигналов своего прибора; 2 – регистрация сигналов соседнего прибора

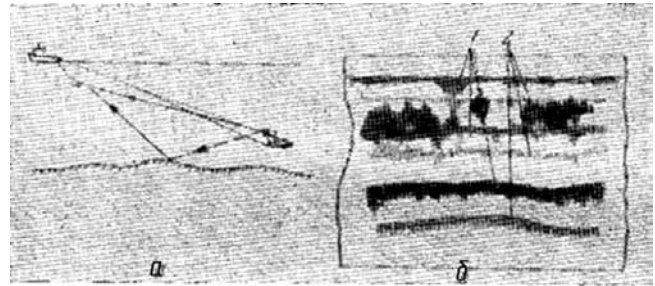


Рис. 12.9. Помехи в результате отражений сигналов, передаваемых по каналу связи с трала к судну, от дна у бескабельных зондов с непосредственной регистрацией информации на экране дисплея:

а – характер распространения сигналов; б – соответствующая эхограмма зонда; 1 – отображение трасс прямого сигнала; 2 – отображение трасс отраженных сигналов

При работе траулера в группе судов следует принимать во внимание возможность отображения на экранах дисплеев помех от соседних приборов (рис. 12.8 и 12.9)

На рис. 12.9 приведен пример отображения помех своего бескабельного прибора контроля, обусловленных дополнительными отражениями в канале связи.

ГЛАВА 13.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ГИДРОАКУСТИКИ ПРИ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Постоянно расширяется в мировой практике использование гидроакустической техники и ее методов в самых различных направлениях рыбохозяйственных исследований. В первую очередь, это относится к их применению при количественной оценке водных биоресурсов.

13.1. ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗАПАСОВ РЫБ И ДРУГИХ ГИДРОБИОНТОВ

Количественная оценка показаний гидроакустических приборов важна при определении промысловых ресурсов, изучении количественных биологических закономерностей распределения и поведения гидробионтов, а также в промысловой работе для обнаружения наиболее плотных участков концентраций и их прицельного облова.

В основе гидроакустического метода количественной оценки промысловых концентраций лежит положение о том, что энергия эхосигналов пропорциональна плотности распределения биологических объектов при рэлеевском рассеянии звука. Измеряется энергия эхосигналов посредством их интегрирования. Считается, что теория процесса интегрирования эхосигналов от объектов одинакова как при отдельной, так и при слитной их регистрации гидроакустическими приборами [Юданов, 1992], т. е. как для разреженных, так и множественных целей.

Формула для определения показаний интегратора за посылку при регистрации концентраций разной плотности имеет вид [Юданов, Калихман, 1981]:

$$M_1 = \tau C_a C_{\text{и}} \left(\frac{\mu_0}{r_0} \right)^2 \cdot 10^{-0,2\alpha r_0} \rho_v \frac{\sigma}{4\pi} \Psi, \quad (13.1)$$

где C_a – акустическая постоянная рыбопоискового прибора; $C_{\text{и}}$ – постоянная интегратора; μ_0 – коэффициент усиления за пределами дальности действия ВАРУ; r_0 – дальность действия ВАРУ; ρ_v – объемная плотность концентрации.

В этой формуле только интегральный фактор направленности Ψ изменяется при переходе от разреженного скопления к плотному. Эффективное значение интегрального фактора направленности при регистрации скопления (рис. 13.1) определяется из соотношения [Юданов, Калихман, 1981]:

$$\Psi = \frac{\int_{r_u}^{r_n} \Psi(\Theta_1 \cdot \Theta_2) dr}{h}, \quad (13.2)$$

где Θ_1 и Θ_2 – ширина характеристики направленности прибора, соответствующая текущей дистанции r до импульсного объема; r_u и r_n – дистанции, с которых приходят пороговые эхосигналы; h – толщина скопления.

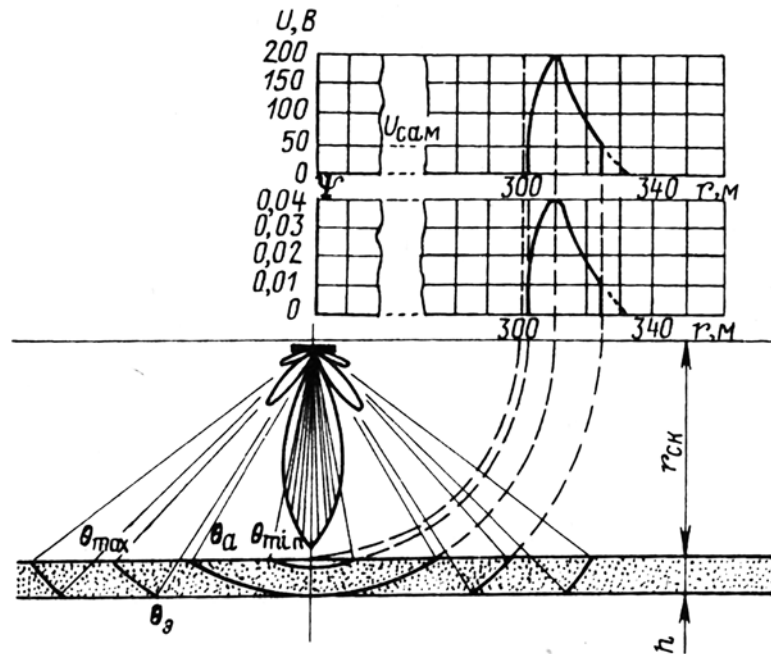


Рис. 13.1. Схема для расчета; графики изменения интегрального фактора направленности и огибающей эхосигналов применительно к регистрации множественных целей ($\sigma_{ск}=0,1$ экз/м³, $\sigma_p=10$ см², $r_{ск}=300$ м, $h=10$ м) ГАС «Сарган-Э» (частота 20 кГц, $\tau=1,0$ мс, ВАРУ для множественных целей, $U_{min}=50$ В)

Величина $\Psi(\Theta_1, \Theta_2)$ определяется как разность значений интегрального фактора направленности, соответствующих углам Θ_1 и Θ_2 .

Из соотношения (13.1) следует, что показания интегратора, а значит, и квадрат огибающей эхосигнала пропорциональны интегральному фактору направленности. Как следует из рис. 13.1, наибольшие значения огибающей эхосигнала U_{max} соответствуют максимуму интегрального фактора $\Psi(0, \Psi_a)$ в момент достижения импульсным объемом нижней границы скопления (при Θ_a – см. рис. 13.1). Пороговые, минимально необходимые для регистрации объектов, значения огибающей U_{min} , появляющиеся в начале (при Θ_{min}) и при окончании (при Θ_{max}) регистрации эхосигнала на границах зоны обнаружения, определяют минимально необходимые интегральные факторы: центральный $\Psi(0, \Theta_{min})$ и периферийный $\Psi(\Theta_{э}, \Theta_{max})$, т. е.

$$\Psi(0, \Theta_{min}) = \Psi(\Theta_{э}, \Theta_{min}) = \Psi(0, \Theta_a) \frac{U_{min}^2}{U_a^2}. \quad (13.3)$$

Таким образом, при равномерном распределении промысловых объектов в скоплении, эхосигналов, можно определить углы Θ_{min} , Θ_a , Θ_{max} . При этом находят и дистанции $r_{ц}$ и $r_{п}$, с которых приходят центральные и периферийные пороговые эхосигналы. Далее по формуле (13.2) рассчитывают эффективное значение интегрального фактора [Калихман, 1981].

На рис. 13.2 приведены полученные расчетным путем зависимости отношения действующего интегрального фактора Ψ к его полному, паспортному, значению $\Psi_{п}$ от динамического диапазона регистрируемых эхосигналов $D=U_a/U_{min}$. В работе [Калихман, 1981] указывается, что эти зависимости, а также расчеты при других дистанциях до скоплений показывают, что с увеличением толщины скопления и уменьшением его глубины Ψ стремится к постоянному, паспортному значению. Из рис. 12.2 видно, что при больших значениях динамического диапазона эхосигналов отношение $\Psi/\Psi_{п}$ может быть больше единицы; это объясняется искажениями регистрации скоплений гидроакустической аппаратурой с широкими ХН.

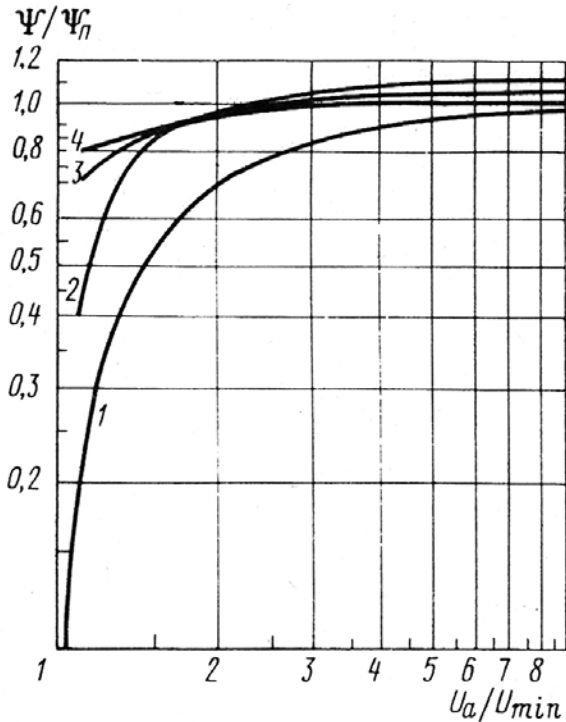


Рис. 13.2. Зависимость интегрального фактора направленности от динамического диапазона эхосигналов применительно к их регистрации:

1 — одиночные цели; 2, 3, 4 — множественные цели при дистанции до скопления 400 м и толщине слоя 5, 10 и 25 м соответственно аппаратурой «Сарган» (частота 20 кГц)

Выполненные применительно к гидроакустическим приборам с широкими и узкими ХН расчеты говорят о том, что во всех реальных случаях регистрации скоплений объектов, неразрешаемых приборами, можно использовать паспортное значение интегрального фактора. При этом погрешность показаний интегратора вследствие замены Ψ на Ψ_n не превышает 10% [Юданов, 1992].

Как показывают расчеты, при отдельной регистрации рыб в скоплениях зависимость $\Psi/\Psi_n = f(D)$ практически одинакова как для широконаправленных, так и для узконаправленных гидроакустических приборов.

Из представленной на рис. 13.2 кривой (1) следует, что использование паспортного параметра Ψ_n допустимо при $D \geq 4$. При меньшем динамическом диапазоне регистрируемых эхосигналов необходимо определять значение Ψ применительно к условиям регистрации цели.

После преобразования (13.1) получим обобщенную формулу для оценки объемной плотности скоплений (экз/м³):

$$\rho_v = \frac{M_1}{\left[\tau C_a C_n \left(\frac{\mu_0}{r_0} \right)^2 \cdot 10^{-0,2\alpha r_0} \right] \cdot h \left(\frac{\sigma}{4\pi} \right) \Psi} \quad (13.4)$$

Задача количественной оценки и построение карт распределения рыбных запасов, изучение влияния окружающей среды на временную динамику рыбных биомасс и ее пространственного распределения представляет несомненный интерес для рыбохозяйственных и природоохранных целей. Такие знания существенно помогают в сохранении водных биоресурсов. При мощном воздействии многочисленных антропогенных факторов, которые наблюдаются почти повсеместно, для сохранения рыбных запасов необходима правильная их эксплуатация.

Оценка и контроль биоресурсов осуществляются также с помощью методов, основанных на проведении обловов с помощью различных контрольных орудий лова. К сожалению, эти методы не всегда в состоянии обеспечить необходимую точность количественной оценки состояния рыбных ресурсов. Известно, что результат количественной оценки рыб по данным траловых съемок (траловые съемки, как правило, используются для оценки запасов на морских акваториях) в значительной степени зависит от точности данных о селективности и уловистости трала. Часто вариации этих параметров высоки и сильно отличаются для разных видов рыб. При количественной оценке многовидовых скоплений, как правило, точных данных о коэффициенте уловистости и селективности орудий лова для всех облавливаемых видов недостаточно. Кроме этого, результаты тралений в большой степени зависят от опыта и умения судоводителя и команды. При траловых съемках невозможно исследовать всю толщу воды, а результаты вычислений основываются лишь на данных, полученных в слое облова. Еще од-

ним недостатком этого метода является то, что данные имеют прерывистый характер, поскольку расстояния между траловыми станциями значительно больше, нежели дистанции тралений. При высокой неоднородности распределения рыбных скоплений степень пространственной неопределенности может быть очень большой. Еще большая неопределенность относится к результатам оценок рыбных запасов на внутренних водоемах, когда в качестве орудий лова используются жаберные сети.

Гидроакустический метод (ГАМ) количественной оценки базируется на проведении гидроакустических съемок (ГАС). При гидроакустических съемках исследуется вся толща воды, а не только слой облова, как при траловых. Материальные затраты на гидроакустическую съемку ниже, т. к. за относительно короткий промежуток времени она позволяет обследовать большие акватории. При гидроакустической съемке судно с установленной на его борту гидроакустической аппаратурой движется по заранее спланированной сетке галсов, при этом в толщу воды в вертикальном направлении постоянно излучаются ультразвуковые сигналы, а отраженные сигналы от различных звуко рассеивающих слоев записываются на компьютер, входящий в состав гидроакустической аппаратуры. Но для количественной оценки гидробионтов только гидроакустических наблюдений недостаточно, так как этот метод не всегда позволяет с высокой точностью распознавать гидробионтов по видам и размерным группам, и поэтому все же необходимы контрольные обловы. Именно по данным биологических анализов контрольных обловов производится пересчет энергетических характеристик отраженных сигналов в значения поверхностной плотности. Следует отметить, что по сравнению с траловыми съемками при выполнении гидроакустических съемок количество контрольных обловов существенно меньше. Хотя это может приводить к смещениям.

В общем гидроакустическая оценка состояния запасов рыб основывается на периодическом измерении эхолокационной аппаратурой вдоль галсов стратифицированной съемки¹ величин S_A — коэффициентов обратного поверхностного рассеяния звука скоплением рыб в исследуемом слое (в м²/миль²). Затем для каждой страты определяют среднее значение \bar{S}_A величины \bar{S}_{Aj} для каждого размерного класса j :

$$\bar{S}_{Aj} = (\rho_j \sigma_j / \sum \rho_j \sigma_j) S_A$$

и средние плотности $\bar{\rho}_j$ скопления рыб для каждого размерного класса j (в количестве рыб на миль²):

$$\bar{\rho}_j = \frac{s_{Aj}}{\bar{\sigma}_j} = \frac{\rho_j S_A}{\sum \rho_j \sigma_j},$$

где ρ_j — доля рыб размерного класса j в скоплении; $\bar{\sigma}_j$ — среднее акустическое поперечное сечение рассеяния одной рыбы размерного класса j , м².

Затем плотности $\bar{\rho}_j$ суммируют по всем размерным классам, определяют численность рыб для каждой страты и всего района.

13.2. КАЛИБРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ

Гидроакустическая техника количественной оценки является средством измерения, что обуславливает как необходимость обеспечения стабильности параметров и характеристик аппаратуры при ее разработке, так и необходимость регулярной калибров-

¹ Название стратифицированная обычно используется, т. к. для расчета численности и биомассы акватория съемки разбивается на участки (страты), по которым производится усреднение акустических данных. Выделение страт обусловлено необходимостью получения равномерного распределения выборок S_A при отсутствии их значительных (более чем на 1–2 порядка) вариаций в пределах каждой страты. В отдельных случаях в качестве таких страт выбираются стандартные географические координаты или площади между изолиниями равной плотности.

ки. Тщательная и качественная калибровка — одна из важнейших операций при практическом использовании указанной аппаратуры [ICES coop. Report, 2015].

В общем случае при этом пользуются обобщенными характеристиками аппаратуры. Обобщенные характеристики гидроакустической техники количественной оценки могут быть рассчитаны исходя из электрических и акустических параметров аппаратуры и интегратора или измерены с использованием образцовой цели. Свойства генераторно-приемного тракта и антенны по излучению и приему обычно характеризуются акустической постоянной; в качестве обобщенного параметра рыбопоискового прибора и интегратора часто используется электро-акустическая постоянная.

Акустическая постоянная, C_a , может быть рассчитана исходя из акустических параметров рыбопоискового прибора по формуле:

$$C_a = r^2 p^2 \chi^2 \left\{ \text{В}^2 \text{м}^2 \right\}, \text{ или } Ca = p_1^2 \chi^2 = \frac{U_{\text{ш}}^2 r_{\text{ш}}^4}{\mu_{\text{ш}}^2 \sigma_{\text{ш}}}, \quad (13.5)$$

где p_1 — эффективное значение звукового давления излучения, приведенное к 1 м от антенны, Па/м; χ — чувствительность антенны по приему, В/Па; $U_{\text{ш}}$ — напряжение эхосигнала от образцового шара на выходном устройстве (дисплее), В; $r_{\text{ш}}$ — расстояние от акустической антенны аппаратуры до шара, м; $\mu_{\text{ш}}$ — коэффициент усиления при регистрации шара; $\sigma_{\text{ш}}$ — акустическое сечение шара, м².

Чувствительность антенны по приему находят по измеренному значению напряжения, которое получается от известного акустического сигнала при работе гидрофона в режиме излучения. С выхода измерительного генератора на гидрофон подают сигнал на рабочей частоте генератора рыбопоискового прибора. Величину сигналов на гидрофоне и на антенне определяют при отключенном входе усилителя приемного тракта.

Формула для расчета чувствительности имеет вид:

$$\chi = \frac{rU}{\chi_{\text{и}} r_1 U_{\text{и}}}, \text{ мкВ/Па}, \quad (13.6)$$

или

$$VR = 20 \log U + 20 \log r - 20 \log \chi_{\text{и}} - 20 \log U_{\text{и}}, \text{ дБ/В/мкПа}, \quad (13.7)$$

где $\chi_{\text{и}}$ и $20 \log \chi_{\text{и}}$ — чувствительность гидрофона по излучению (на 1 м), выраженная соответственно в Па/В и в дБ/мкПа/В; VR — чувствительность приемного тракта, которая складывается из чувствительности антенны и коэффициента усиления; $U_{\text{и}}$ и U — значения сигналов, подаваемых на гидрофон и снимаемых с антенны, мВ.

Первое выражение в формуле (13.5) дает возможность определять C_a путем акустических измерений с помощью гидрофона, а второе — путем измерений по образцовому шару.

Формула (13.5) может быть выражена также как:

$$10 \log C_a = (SL + VR), \text{ дБ},$$

где SL — уровень источника.

Измерения акустической постоянной с использованием образцовой цели выполняют с выключенной временной автоматической регулировкой усиления (ВАРУ). При отсутствии такой возможности включают ВАРУ по квадратичному закону. Выражение для расчета акустической постоянной имеет вид:

$$C_a = \frac{2\pi U^2 r^4 10^{0,2\alpha r}}{\sigma \mu^2} \left[\text{В}^2 \text{м}^2 \right], \quad (13.8)$$

или

$$SL + VR = 20 \log \frac{U}{\sqrt{2}} + 40 \log r + 2\alpha r - TS - 20 \log \mu, \text{ дБ}, \quad (13.9)$$

где U – величина эхосигналов от образцовой цели на выходе усилителя.

При работе без ВАРУ в указанных выражениях фигурирует постоянный коэффициент усиления μ и расстояние от антенны до образцовой цели r ; при использовании ВАРУ – максимальный коэффициент усиления μ_0 и дальность действия ВАРУ r_0 [Юданов и др., 1984].

Электро-акустическая постоянная может быть рассчитана исходя из электрических и акустических параметров аппаратуры по формулам:

$$C_{\text{за}} = \frac{\tau \mu_0^2 C_{\text{и}} C_{\text{а}}}{r_0 10^{0,2\alpha r}}$$

или

$$10 \log C_{\text{за}} = 10 \log r + 20 \log \mu_0 + 10 \log C_{\text{и}} + (SL + VR) - (20 \log r_0 + 2\alpha r_0), \text{ дБ}.$$

где $C_{\text{и}}$ – постоянная интегратора, связывает его показания и сигнал на выходе усилителя интегратора:

$$C_{\text{и}} = \frac{M}{U^2_{\text{T}}} = \frac{cM}{2hnU^2};$$

M – показания интегратора; c – скорость звука; h – толщина слоя интегрирования, м; n – число циклов зондирования за время измерений.

Электро-акустическую постоянную с использованием образцовой цели измеряют путем интегрирования эхосигналов. Работают с включенной ВАРУ по линейному закону. При возможности интегрируют в пределах цикла лоцирования; в этом случае в расчет берут лишь наибольшие показания, соответствующие расположению цели на акустической оси. Менее точные результаты могут быть получены при интегрировании эхосигналов за серию циклов локации. Электро-акустическую постоянную находят по формулам:

$$C_{\text{за}} = \frac{4\pi r^2 M_1}{\sigma}$$

или

$$10 \log C_{\text{за}} = 20 \log r - 10 \log M_1 - TS, \text{ дБ}.$$

Если форма эхосигналов близка к прямоугольной, в расчетах можно использовать амплитудные значения. В тех случаях, когда эхосигналы имеют сложную форму, для повышения точности результата целесообразно брать в расчет среднеквадратичное значение огибающей.

13.2.1. КАЛИБРОВКА С ПОМОЩЬЮ ОБРАЗЦОВОЙ ЦЕЛИ

В рыбохозяйственной гидроакустике в основном используется способ калибровки гидроакустической аппаратуры с применением образцовой цели как более простой при проведении реальных гидроакустических съемок при количественной оценке биоресурсов.

Калибровочная сфера-шар изготавливается из высококачественной электролитической меди или в настоящее время из карбида вольфрама благодаря высокой чистоте и однородности материала, коррозионной стойкости к морской воде. Основные характеристики таких образцовых целей приведены в табл. 13.1.

Таблица 13.1. Физические характеристики двух образцовых шаров, используемых для калибровки 38-килогерцовой научно-исследовательской аппаратуры фирмы Симрад (вверху) и их силы цели (внизу)

Sphere material	Diameter, mm	ρ_1 , kgm ⁻³	c_1 , ms ⁻¹	c_2 , ms ⁻¹
Copper	60,0	8945	4760	2288
Tungsten carbide	38,1	14900	6853	4171

c, ms ⁻¹	TS, dB in spheres made from	
	Copper	Tungsten carbide
1430	-34,0	-41,8
1450	-33,8	-42,1
1470	-33,6	-42,3
1490	-33,6	-42,4
1510	-33,6	-42,4
1530	-33,6	-42,4
1550	-33,8	-42,2

Примечание. Расчет выполнялся для ситуации излучения непрерывной волны (нулевая ширина полосы пропускания): c – скорость звука в воде; c_1 и c_2 – продольная и поперечная скорости звука в шарах; ρ_1 – плотность образцового шара. Плотность воды 1000–1030 кг·м⁻³ [Simmonds and Makklenan, 2005]

Таблица 13.2. Силы цели карбидовольфрамовых шаров при скоростях звука 1450 мс⁻¹ (пресная вода) и 1490 мс⁻¹ (морская вода).

Частота, кГц	Диаметр, мм	Ширина полосы пропускания, кГц	TS в пресной воде, дБ	TS в морской воде, дБ
18	38,1	1	-43,0	-42,7
30	38,1	3	-39,8	-39,8
38	38,1	3	-42,0	-42,3
50	36,4	5	-40,9	-40,4
50	38,1	5	-41,4	-40,9
70	33,2	7	-41,3	-41,0
70	38,1	7	-40,6	-41,1
120	33,2	12	-41,0	-40,9
120	38,1	12	-40,1	-40,0
200	36,4	20	-39,8	-39,7
200	38,1	20	-40,0	-39,9
250	23,0	25	-43,7	-43,7
420	21,2	40	-44,3	-44,1
455	24,8	50	-42,9	-42,8

Примечание. Рассчитанные значения для идеального приемника (постоянное усиление в пределах полосы пропускания, нулевое вне полосы пропускания); скорость звука в шаре (продольная) $c_1 = 6853$ мс⁻¹ и (поперечная) $c_2 = 4171$ мс⁻¹; плотность шара $\rho_1 = 14900$ кг·м⁻³ [Simmonds and Makklenan, 2005]

В табл. 13.2 приведены примеры силы целей ряда размеров образцовых карбид-вольфрамовых шаров, перекрывающих частоты от 18 кГц до 0,5 мГц.

При калибровке по образцовой цели аппаратура должна работать в режиме с той же длительностью импульса, ВАРУ и излучаемой мощностью, которые используются или будут применяться в процессе гидроакустической съемки. Измеряются эхосигналы от цели и промежуток времени между излучаемым импульсом и эхо. При измерениях образцовая цель должна быть установлена строго на акустической оси. Точной установке цели мешают дрейф судна и течения, поэтому измерения выполняют в закрытой бухте: у причала или на рейде; лишь в крайних случаях работу проводят в открытом море.

Возможности строгого совмещения образцовой цели с акустической осью антенны различны применительно к гидролокатору и аппаратуре вертикальной локации. Если используют гидролокатор, то цель с грузом опускают со стрелы, после чего луч наводят на цель. О правильности юстировки судят по максимуму эхосигналов.

Значительно сложнее вывести образцовую цель на акустическую ось антенны аппаратуры вертикальной локации. Если измерения выполняют в закрытой бухте, то используют подкильные концы. Цель устанавливают на определенной глубине; положение и длину концов изменяют таким образом, чтобы получить максимальную величину эхосигналов. Для повышения точности измерения повторяют при расположении цели на других глубинах, причем каждый раз стремятся получить максимальные значения эхосигналов. Для повышения стабильности положения сферы в воде к ней часто на некотором расстоянии подвешивают груз. В этом случае расстояние между сферой и грузом должно быть не менее двух длительностей импульса локации. Груз не должен находиться на дне. Кроме этого место калибровки должно быть защищено от ветра. Наличие волн крайне нежелательно, поскольку это может вызывать дополнительные помехи, связанные с образованием воздушных пузырьков в приповерхностном слое. В месте калибровки не должно быть подводных течений. Судно должно быть заякорено как с кормы, так и с носовой части.

Перед калибровкой необходимо измерить скорость звука в воде как на глубине расположения антенны, так и на глубине нахождения калибровочной сферы. Определение скорости звука в воде через измерение солёности воды и её температуры позволит правильно определить дистанцию до сферы от антенны и, соответственно, обеспечить компенсацию эхосигнала, связанную с потерями при распространении акустического импульса.

Если работу выполняют в открытом море, образцовую цель выводят на акустическую ось эхолотатора с использованием плавучего буйа. При дрейфе положение судна корректируют так, чтобы буй с целью оказался у борта против места установки антенны. Результаты таких измерений обычно бывают значительно более грубыми, особенно в случае сильного течения. При калибровке аппаратура должна работать при тех же параметрах (длительность импульса, мощность ВАРУ), которые будут использоваться в процессе съёмки.

Схема установки образцовой цели для калибровки акустической аппаратуры с антенной, установленной в корпусе судна, показана на рис. 13.3. При таких измерениях образцовой целью обычно служит сплошной металлический шар-сфера; его отражательную способность предварительно определяют в базовых условиях.

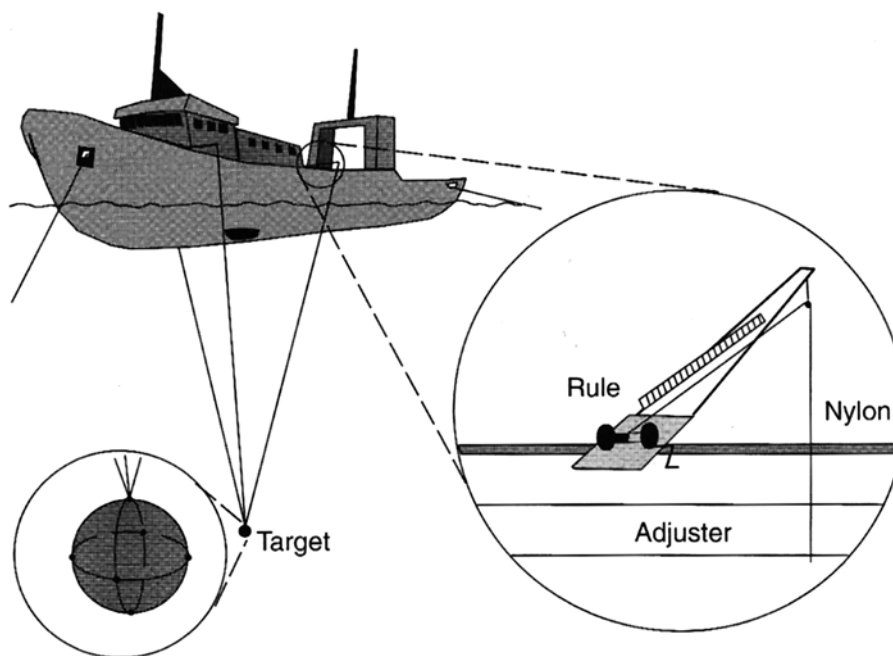


Рис. 13.3. Схема установки и регулировки положения образцовой цели относительно акустической оси антенны при нахождении антенны в корпусе судна или в ПОУ

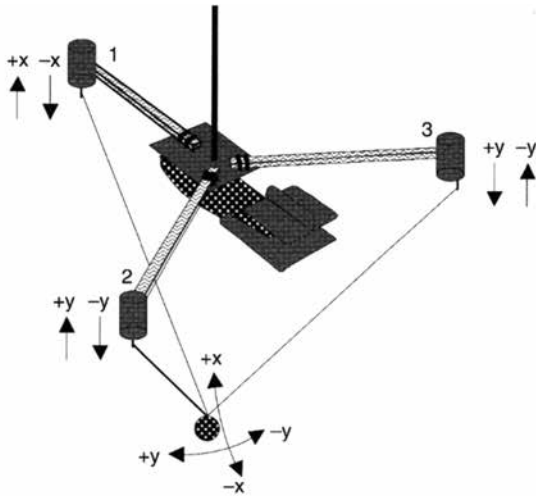


Рис. 13.4. Схема обеспечения регулировки положения цели при калибровке аппаратуры с антенной, установленной на буксируемом носителе

На рис. 13.4 показана схема регулировки положения цели для ситуации расположения антенны в буксируемом теле.

Установочная рама со штырями располагается наверху носителя и вместе с ним погружается в воду. Для установки положения могут применяться дистанционно управляемые двигатели, располагаемые на трех штырях рамы. Номер 1 служит для управления по оси x , а остальные – по оси y .

При гидроакустической аппаратуре с однолепестковой ХН образцовая цель должна устанавливаться строго на акустической оси. Точной установке цели мешают дрейф судна и течения, поэтому измерения выполняют в закрытой бухте – у причала или на рейде; лишь в крайних случаях работу проводят в открытом море.

Если измерения выполняют в закрытой бухте, то используют подкильные концы. Цель устанавливают на определенной глубине; положение и длину концов изменяют таким образом, чтобы получить максимальную величину эхосигналов. Для повышения точности измерения повторяют при расположении цели на других глубинах, причем каждый раз стремятся получить максимальные значения эхосигналов.

Если работу выполняют в открытом море, образцовую цель выводят на акустическую ось эхолота с использованием плавучего буйа. При дрейфе положение судна корректируют так, чтобы буй с целью оказался у борта против места установки антенны. Результаты таких измерений обычно бывают значительно более грубыми, особенно в случае сильного течения.

Применительно к аппаратуре вертикальной локации с однолепестковой характеристикой направленности образцовую цель не всегда удается вывести строго на акустическую ось. Это приводит к занижению значений акустической и электроакустической постоянных аппаратуры.

Образцовая цель должна быть установлена за пределами ближней зоны акустической антенны. Соответствующая дистанция, $r_{\text{опт}}$, определяется по формуле

$$r_{\text{опт}} = 2d^2 f_0 / c,$$

где d – наибольший размер излучающей поверхности антенны; f_0 – рабочая частота аппаратуры; c – скорость звука в воде.

К примеру, при прямоугольной форме излучающей поверхности 45×30 см, частоте 38 кГц и $c = 1500$ м/с, $r_{\text{опт}} = 10,26$ м.

В работе Симмондс и Макленнан [2005] для более качественной калибровки аппаратуры с одной ХН предлагается выполнять перемещение цели под антенной в четырех перпендикулярных плоскостях (рис. 13.5).

В каждой точке энергия эхосигнала определяется как среднее из ряда после-

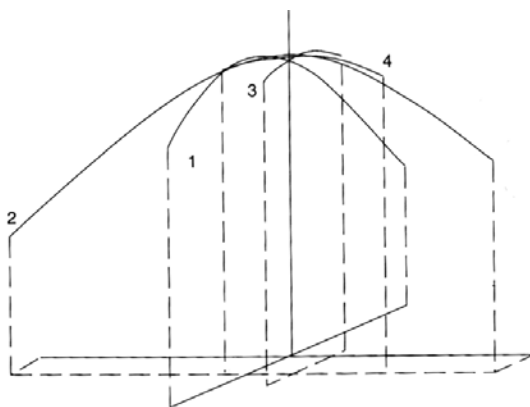


Рис. 13.5. Оценка положения цели на оси антенны с одной характеристикой направленности

довательных циклов излучения – приема, порядка 10–20.

Важное значение имеет возможно более точная оценка расстояния между излучающей поверхностью антенны и целью. В работе [Simmonds and MacLennan, 2005] полагают, что более просто и точно оно может быть определено путем измерения временной задержки между излученным импульсом и эхосигналом. Некоторая небольшая дополнительная задержка при этом имеет место в приемнике, которая должна учитываться при калибровке. На рис. 13.6 приведена схема оценки расстояния до цели.

Задержка эхо t_h измеряется по уровню 0,5 амплитуды огибающей эхосигнала); t_{del} – электронная задержка в приемном тракте. Соответственно, r (расстояние) = $ct_e/2$, где $t_e = t_h - t_{del}$.

Так как образцовая сфера/шар является одиночной целью, то амплитуда эхосигнала зависит от расстояния r_t , поэтому оно должно измеряться независимым способом. Метод измерения времени задержки между импульсом послышки и отраженным от цели представляется более простым и более точным при оценке r_t , чем измерение физической дистанции в воде. Время прихода отраженного сигнала зависит от расстояния до цели и скорости звука в воде, а также от дополнительной задержки в тракте приема. Некоторые эхолотаторы обеспечивают индикацию дистанции, в которой уже компенсирована задержка в приемном тракте, однако другие это не учитывают. Пользователь должен быть уверен в том, что расстояние, определяемое при калибровке, является истинной дистанцией до образцовой цели.

Другой вопрос состоит в том, что принимаемые эхосигналы могут иметь скругленную огибающую и не всегда очевидно, какую точку брать для отсчета времени. В работе Симондс и Макленнан [2005] рекомендуется измерять промежуток времени между началом зондирующего импульса и точкой на переднем фронте огибающей эхосигнала, в которой ее значение равно половине пикового значения (рис. 13.6). Если это время равно t_h и t_{del} – это дополнительная задержка, то дистанция до цели r_t равна

$$r_t = c(t_h - t_{del})/2.$$

Задержка t_{del} определяется из теории формирования эха и характеристик электроники. Ее расчет не является простым, но в некоторых случаях это значение может быть известно из опубликованных данных, как приведено в таблице 13.3 [Simmonds and MacLennan, 2005].

Таблица 13.3. Значения параметра задержки t_{del} для стандартных целей при использовании импульса послышки 1,0 мс, рабочей частоте 38 кГц, ширине полосы пропускания приемного тракта 3,0 кГц и ВАРУ 20logr

Материал цели	Диаметр сферы/шара, мм	Задержка приемника t_{del} , мс
Медь	60,0	0,47
Карбидо-вольфр.	38,1	0,45

Временные задержки автоматически переводятся в значения расстояний, поэтому важным является обеспечение корректности скорости звука в месте калибровки. Если при последующей съемке будет другая скорость звука, аппаратура должна соответственно регулироваться.

Пусть E_t – это измеренная энергия эхосигнала, когда сфера находится на акустической оси. При этом необходимо знать TS_t – силу цели образцовой цели в дБ (табл. 13). Тогда показатель чувствительности при калибровке C_a может быть определен как:

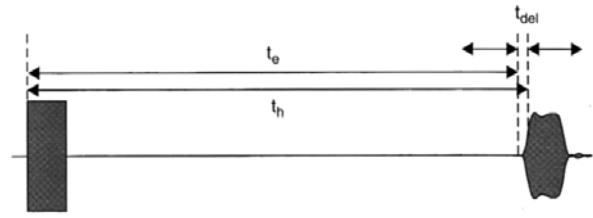


Рис. 13.6. Определение дистанции до цели

$$C_a = E_l r_l^2 / 10^{(TS/10)}.$$

Если во время съемки должен применяться другой эхоинтегратор, или в эхолокаторе установлены усиление приемного тракта или уровень излучаемой мощности генератора, отличающиеся от использовавшихся при калибровке, тогда необходимы дополнительные электрические измерения для обеспечения корректного значения C_a . Поэтому предпочтительнее выполнять калибровку при тех же значениях установок параметров аппаратуры, которые будут использоваться во время съемки. Если необходимо работать при других значениях вышеуказанных параметров, то если аппаратура должна использоваться для подсчета эха от отдельных рыб, то применяется ВАРУ $40 \log r$. E_l в этом случае это эхоинтеграл или квадрат пиковой амплитуды эхосигналов в зависимости от работы эхосчетчика и формула для C_a будет иметь вид:

$$C_a = E_l / 10^{(TS/10)}.$$

В работе [Simmonds and MakLennan, 2005] приводится расчет возможных корректировок при непостоянной скорости звука в пространстве между акустической антенной и рыбой.

Калибровка обычно производится в каком-то месте, где скорость звука, к примеру, равна c_0 (предполагаемая или измеренная). Если установки параметров аппаратуры согласованы с c_0 , то калибровку можно считать выполненной корректно. Однако скорость звука в районе или в процессе съемки может быть различной и могут быть необходимы некоторые дополнительные корректировки в общем уравнении эхоинтегратора, предполагающем пропорциональность выходного значения E интегратора количеству рыб на единицу поверхности, F , т. е.

$$F = [C_a \bar{g} / \varphi(\sigma_{bs})] E.$$

Для вывода формул с целью дополнительной корректировки авторы вводят уравнение для P_r :

$$P_r = P_0 G_T r^2 10^{-2\alpha r/10} / \varphi(c\tau/2) n(\sigma_{bs}) G_E,$$

где P_r – мощность, принимаемая эхоинтегратором (без ВАРУ) от распределенных целей на расстоянии r ; P_0 – мощность генератора; α – коэффициент затухания (дБ м⁻¹); c – скорость звука; τ – длительность импульса; n – количество рыб на единицу объема; G_T и G_E – коэффициенты передачи антенны (на оси) при передаче и приеме, соответственно; φ – эквивалентный угол характеристики направленности.

Если скорость звука увеличивается (она больше c_0), длина волны и, соответственно, задержка эха уменьшаются. Кажущееся расстояние r уменьшается, т. к. оно было согласовано с c_0 . Изменения c вызывают изменения φ , G_T и G_E , $c\tau/2$ и др.

Авторы выводят формулы для определения соответствующих коэффициентов коррекции при эхоинтегрировании и эхосчете исходя из средних значений скорости звука между акустической антенной и рыбой.

Они указывают, что если эхолокатор должен использоваться при количественной оценке в районах, где имеются существенные различия в скоростях звука между антенной и концентрациями рыбы, следует пользоваться коррекциями, рассчитываемыми по приведенным ими формулам. В работе не приводятся примеры конкретных расчетов и значений корректировок для реальных условий применения аппаратуры при съемках.

Процедура установки образцового шара и, соответственно, калибровки в общем выполняется проще для аппаратуры с так называемым «расщепленным лучом», в которой компенсируется влияние характеристики направленности антенны на результаты измерений. Технология «расщепленного луча» была реализована на основе антенны, разделенной на четыре квадранта [Carlson and Jackson, 1980]. Ультразвуковой импульс излучается одновременно всеми квадрантами антенны. Прием эхосигнала осуществляется каждым квадрантом отдельно. Сфера с известным значением TS для данной частоты

эхолокатора перемещается под антенной. «Расщепленный луч» антенны позволяет определять пространственное местоположение сферы-шара для каждого отраженного от нее сигнала в пределах диаграммы направленности антенны в пределах $7-10^\circ$. При проведении калибровки измеряются значения TS и S_V отраженного сигнала [Ona et al., 2009].

Для каждого квадранта антенны определяются два регулируемых параметра, основанных на выделенном эхосигнале от сферы: усиление на акустической оси антенны и эффективная длительность импульса эхосигнала. Перед началом процесса калибровки необходимо установить слой, в пределах которого будет находиться сфера и пороговые значения для TS и S_V эхосигналов. В пределах этих значений выполняются все вычисления. Если по какой-либо причине сфера выйдет за пределы слоя калибровки, программа калибровки должна остановить процесс сбора данных и автоматически продолжить его после возврата сферы в пределы установленного слоя.

Первый калибруемый параметр, называемый «регулировка усиления», необходим для измерения TS . Для каждого эхосигнала TS вычисляется по формуле:

$$TS = 10 \log \frac{16\pi^2 P_r r^4 10^{\alpha_a r/5}}{p_t g_0^2 R_0^2 \lambda^2} - 20 \log \frac{g(\alpha, \beta)}{g_0}, \quad (13.10)$$

где P_r – мощность эхосигнала, Вт:

$$P_r = i_a a_r(\alpha, \beta) = I_a \frac{\lambda^2}{4\pi} g(\alpha, \beta); \quad (13.11)$$

I_a – акустическая интенсивность эхосигнала, Вт/м²:

$$I_a = \frac{Pt}{4\pi r_0^2} \cdot 10^{-\alpha r/10}; \quad (13.12)$$

$a_r(\alpha, \beta)$ – эффективная площадь приема антенны, м²; P_t – электрическая мощность, подводимая к антенне, Вт; α_a – коэффициент затухания, дБ/м; r – дистанция до сферы, м; $g(\alpha, \beta)$ – усиление акустического сигнала в направлении от антенны к сфере – безразмерная; углы α и β определяют направление к цели по отношению к акустической оси антенны в продольной и поперечной осях судна, соответственно; g_0 – максимальное усиление антенны (вдоль акустической оси диаграммы направленности); R_0 – радиус сферы, равный 1 м; λ – акустическая длина волны излучаемого сигнала, м:

$$\lambda = \frac{c}{f};$$

c – скорость звука в воде, м/сек; f – частота, Гц.

Каждое рассчитанное значение TS сравнивается с паспортным значением TS_{sphere} сферы. После чего вычисляется Δg_0 :

$$\Delta g_0 = \text{mean}TS - TS_{\text{sphere}}, \quad (13.13)$$

где

$$\text{mean}TS = 10 \log_0(\text{mean}(10^{(TS/10)})), \quad (13.14)$$

После вычисления Δg_0 новая величина g_0 должна быть скорректирована:

$$g_0 = g_0 \delta g_0, \quad (13.15)$$

где

$$\delta g_0 = 10^{(\Delta G_0/10)}. \quad (13.16)$$

Второй параметр калибровки – $S_{\text{аcorr}}$ (поправочный коэффициент поверхностного обратного рассеяния, дБ), который корректирует измеренные значения силы объемного обратного рассеяния (S_v , дБ) и коэффициента поверхностного обратного рассеяния (s_a , м²/м² или м²/миля² или кг/га).

Сила объемного обратного рассеяния определяется по формуле:

$$S_v = 10 \log \frac{32\pi^2 P_r r^2 10^{\alpha_a r/}}{P_t g_0^2 R_0^2 \lambda^2 c \tau_{\text{эфф}} \Psi}, \quad (13.17)$$

где $\tau_{\text{эфф}}$ – эффективная длительность импульса зондирования, сек; Ψ – эквивалентный двойной телесный угол (equalent two-way solid beam angle) антенны, стерadians.

Для каждой выборки отраженного сигнала от сферы рассчитывается сила цели без компенсации (TS_{unc}), связанной с расположением сферы вне акустической оси:

$$TS_{\text{unc}} = \frac{16\pi P_r r^4 10^{\alpha_a r/}}{P_t g_0^2 r_0^2 l^2}. \quad (13.18)$$

Далее из массива выборок эхосигнала выбирается максимальное значение силы цели TS_0 . Значения TS_{unc} для каждой выборки эхосигнала можно выразить через TS_0 :

$$TS_{\text{unc}}(t) = TS_0 k(t), \quad (13.19)$$

где $k(t)$ – безразмерный коэффициент формы акустического импульса, связанный с изменением формы огибающей эхосигнала от сферы и показывающий ее отличие от огибающей импульса локации, как правило, близкой к прямоугольной форме ($k_{\text{max}}=1$).

Значение $\tau_{\text{эфф}}$ рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{эфф}} = \int \frac{TS_{\text{unc}}(t)}{TS_0} dt = \int k(t) dt. \quad (13.20)$$

Значение коэффициента поверхностного обратного рассеяния в размерности м²/миля² рассчитывается по формуле:

$$S_a = 4\pi 1852^2 \sum_{i=1}^n S_v(i) \frac{c\Delta t}{2}, \quad (13.21)$$

где n – количество выборок эхосигнала; Δt – временной интервал между выборками.

$$S_v(I) = \frac{2TS_{\text{unc}}(i)}{cr^2 \psi \tau_{\text{эффном}}}, \quad (13.22)$$

где $\tau_{\text{эфф.ном}}$ – паспортное значение эффективной длительности импульса.

$$s_a \approx 4\pi 1852^2 \frac{TS_0}{r^2 \psi} \frac{\tau_{\text{эфф}}}{\tau_{\text{эффном}}}. \quad (13.23)$$

Далее вычисленное значение S_a сравнивается с его теоретическим значением:

$$S_{a\text{теор}} = 4\pi 1852^2 \frac{TS_0}{r^2 \psi}. \quad (13.24)$$

Значение $S_{\text{аcorr}}$ определяется по формуле:

$$S_{acorr} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^m S_a(l)}{\sum_{i=1}^m S_{атеоф}(l)}, \quad (13.25)$$

где m – количество эхосигналов от шара-сферы.

Оно также может быть определено и через значение $\tau_{эфф}$:

$$S_{acorr} = 10 \log \left(\frac{\sum_{l=1}^m TS_0(l) / r^2(l) \frac{\tau_{эфф}(l)}{\tau_{эффном}}}{\sum_{l=1}^m TS_0(l) / r^2(l)} \right), \quad (13.26)$$

где r – расстояние от излучателя до шара-сферы.

При оценке S_{acorr} рекомендуется использовать отраженные эхосигналы от сферы при ее расположении непосредственно на акустической оси или на близком от нее расстоянии. В этом случае результаты будут более точными.

Для калибровки аппаратуры с «двойным лучом» и «расщепленным лучом» [MacLennan and Svelling, 1989] был предложен метод деления поперечного сечения ХН на семь зон равной площади с кругом в центре и шестью сегментами по краям. Цель перемещалась таким образом, чтобы обеспечить получение примерно одинакового количества измерений в каждой из площадей сечения. По предложенным формулам определялось среднее значение чувствительности. В их работе предлагался и упрощенный способ проведения калибровки аппаратуры с «расщепленным лучом»: цель подвешивается под антенной на одном тросе и, соответственно, свободно смещается относительно нее. Набор статистики позволяет получить своего рода планшет калибровки.

На рис. 13.7 приведен пример результатов калибровки акустической аппаратуры с так называемым «двойным лучом». Одна и та же цель перемещается в различных направлениях поперек характеристик направленности.

Рис. 13.8 представляет пример результатов калибровки аппаратуры с так называемым «расщепленным лучом».

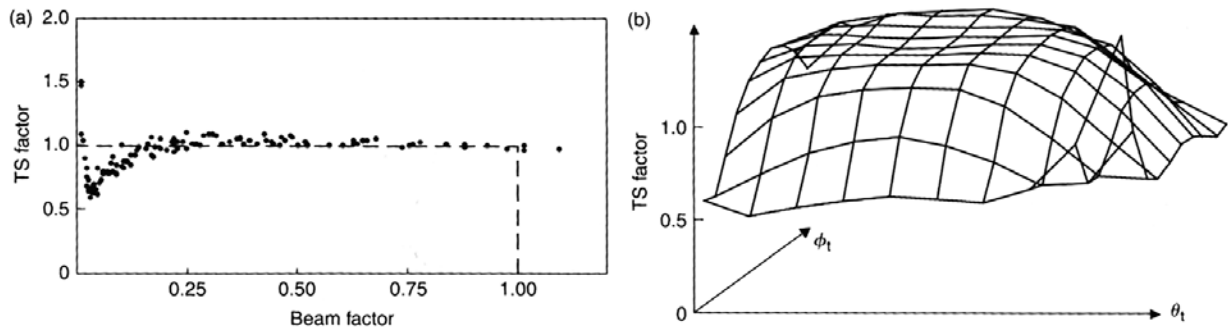


Рис. 13.7. Пример результатов калибровки аппаратуры с двойным лучом:

a – измерения одной и той же цели в различных направлениях; b – планшет коэффициента $TS_{коэф.}$ относительно углов положения цели по отношению к акустической оси в продольном и поперечном направлениях. $TS_{коэф.}$ это $I_{шир.}^2 / I_{узк.}^2$ пропорционален $\sigma_{обр.расс.}$ поперечному сечению обратного рассеяния стандартной цели, и, по существу, является постоянным, если Beam factor, отношение $I_{узк.} / I_{шир.}$ (I – интенсивность), является достаточно большим. К Beam factor применяется порог с целью исключения эхосигналов, для которых $I_{узк.} / I_{шир.}$ был меньше, чем примерно 0,3 [Simmonds and MacLennan, 2005].

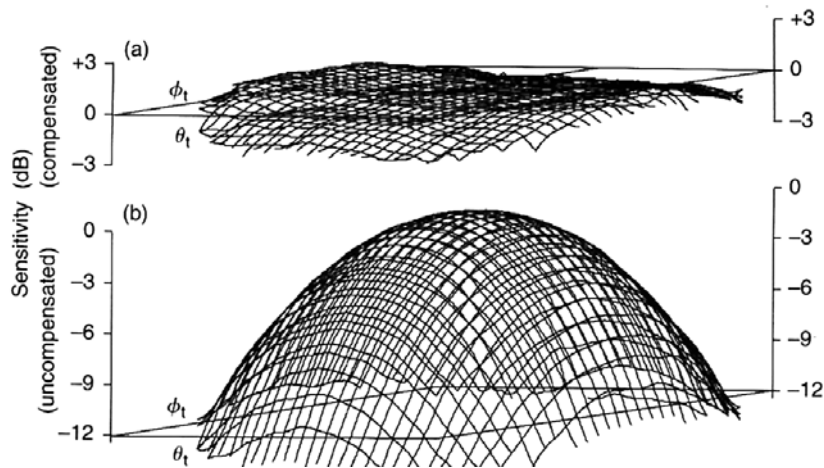


Рис. 13.8. Пример результатов калибровки аппаратуры с «расщепленным лучом»:

a – планшет результатов измерения с компенсацией характеристики, *b* – без компенсации характеристики, нормированной относительно максимума (на оси характеристики направленности). Углы φ_t и θ_t , соответственно, в продольном и поперечном направлениях относительно акустической оси антенны [Simmonds and MacLennan, 2005]

13.3. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Гидроакустическая количественная оценка состояния биоресурсов выполняется посредством выполнения гидроакустических съемок. Целью сбора и первичной обработки гидроакустических данных является получение статистически достоверных выборок средних значений. Судно с гидроакустической аппаратурой и эхоинтегратором выполняет сетку (серию) галсов в намеченном районе. Производится интегрирование принимаемых эхосигналов (суммирование энергий эхосигналов) от биологических объектов (рыб) при вертикальной локации в пределах выбранного слоя или ряда слоев и последующее усреднение в горизонтальном направлении вдоль галса судна (в мелководных водоемах в последнее время все более широко используется и горизонтальная локация). По показаниям интегратора рассчитывают средние значения плотности, значения мильного коэффициента поверхностного рассеяния S_A , Nautical area scattering coefficient (NASC) [MacLennan, 2002]:

$$S_A = 4\pi(1852)^2 S_a;$$

$$S_a = \int_{r_1}^{r_2} S_v dr;$$

$$S_v = \frac{\sum \sigma_{bs}}{V};$$

$$\sigma_{bs} = 10^{TS/10},$$

где S_a – коэффициент поверхностного обратного рассеяния (area scattering coefficient), $\text{м}^2/\text{м}^2$; S_v – коэффициент объемного обратного рассеяния (*volume backscattering coefficient*), $\text{м}^2/\text{м}^3$; r_2, r_1 – нижняя и верхняя границы слоя интегрирования, м; σ_{bs} – акустическое сечение одиночного объекта (*backscattering cross-section*), м^2 ; V – объем, вносящий вклад в принимаемый эхосигнал, м^3 ; TS – сила цели, дБ, относительно 1 м.

Средняя плотность $\bar{\rho}_m$ распределения биомассы, измеряется в $\text{м}^2/\text{морская миля}^2$ для морских акваторий и в $\text{кг}/\text{га}$ для внутренних водоемов и рассчитывается по формуле $\bar{\rho}_m = S_a / \bar{\sigma}_{kr}(L)$, (S_a – эхоинтенсивность на интервале расчета, $\text{м}^2/\text{га}$; $\bar{\sigma}_{kr}(L)$ – среднее акустическое сечение рассеяния на 1 кг массы рыбы длиной L , $\text{м}^2/\text{кг}$).

Среднее акустическое сечение рассеяния на 1 кг массы рыбы длиной L рассчитывается по формуле $\bar{\sigma}_{\text{кг}}(L) = \bar{\sigma}(L) / \bar{m}$ (\bar{m} – средняя масса одной рыбы).

На рис. 13.9 приведены зависимости акустического сечения обратного рассеяния $\sigma_{\text{кг}}$ на 1 кг массы от длины объекта для основных промысловых рыб Северного бассейна. В таблице 13.4 приводятся рекомендуемые значения $\bar{\sigma}_{\text{кг}}$ и \overline{TS} «in situ» для некоторых гидробионтов Северной Атлантики на частоте 38 кГц [Руководство ПИНРО, 1989]. Также можно пользоваться и табл. 13.5.

Среднее акустическое сечение рассеяния рыбы единичной длины рассчитывается по формуле:

$$\bar{\sigma}(L) = 4\pi 10^{0.1 \overline{TS}(L)},$$

где $\overline{TS}(L)$ – средняя сила цели рыбы для рыбы длиной L , дБ.

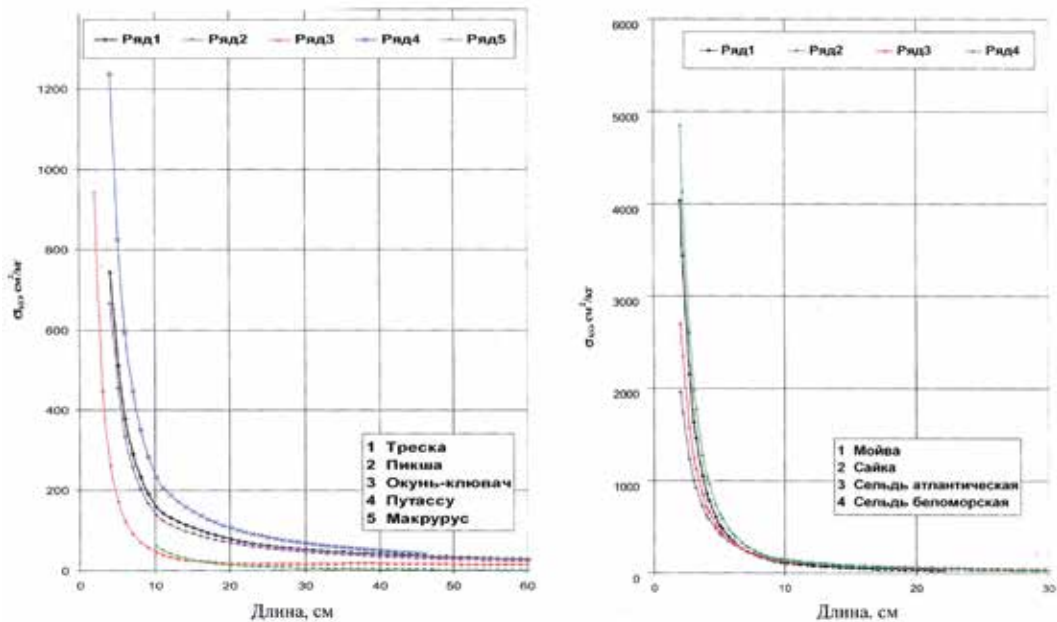


Рис. 13.9. Зависимость акустического сечения обратного рассеяния $\sigma_{\text{кг}}$ на 1 кг массы от длины объекта для основных промысловых рыб Северного бассейна [Методическое пособие..., 2006]

Таблица 13.4. Рекомендуемые значения $\bar{\sigma}_{\text{кг}}$ и \overline{TS} «in situ» для некоторых гидробионтов Северной Атлантики на частоте 38 кГц

Вид	Зоологическая длина L , см	Средняя масса \bar{m} , г	$\bar{\sigma}_{\text{кг}} \cdot 10^{-4}$, м ² /кг	$\overline{TS}(L)$, дБ
Мойва	5–8	1–2	150–125	$\overline{TS} = 19,8 \log L - 74,4$ (для $L > 12$ см) $\overline{TS} = 19,8 \log L - 74,0$ (для $L = 9-13$)
	6–12	2–8	125–66	
	12–16	8–21	66–43	
	16–20	21–40	43–38	
Сайка	3–5	0,5–1,5	400–230	$\overline{TS} = 21,8 \log L - 72,7$ (для $L > 10$ см)
	5–8	1,5–4	230–175	
	8–12	4–11	175–135	
	12–16	11–28	135–100	
Треска	16–20	28–55	100–74	$\overline{TS} = 21,8 \log L - 72,0$ (для $L > 10$ см)
	8–12	10–27	70–59	
	12–20	27–80	59–57	
	20–30	80–255	57–44	
	30–50	255–1140	44–30	
	50–70	1140–2900	30–25	
70–100	2900–8900	25–17		
100–130	8900–23000	17–12		

Окончание табл. 13.4

Вид	Зоологическая длина L , см	Средняя масса \bar{m} , г	$\bar{\sigma}_{кр} \cdot 10^{-4}$, м ² /кг	$\overline{TS}(L)$, дБ
Пикша	8-12	14-30	50-46	$\overline{TS} = 16,9 \log L - 67,9$ (для $L > 10$ см)
	12-16	30-53	46-42	
	16-20	53-95	42-34	
	20-30	95-240	34-27	
	30-50	240-1240	27-12	
	50-70	1240-3440	12-8	
	70-90	3440-6260	8-7	
Окунь	5-8	1,5-6	135-50	$\overline{TS} = 28,2 \log L - 84,5$ (для $L = 15-53$ см) $\overline{TS} = 15,7 \log L - 69,8$ (для $L = 5-15$ см)
	8-12	6-21	50-28	
	12-16	21-57	28-21	
	16-20	57-113	21-18,5	
	20-50	113-1430	18,5	
Путассу	12-16	13-25	115-112	$\overline{TS} = 21,8 \log L - 72,7$
	16-20	25-46	112-100	
	20-25	46-100	100-75	
	25-30	100-160	75-70	
	30-35	160-230	70-68	
	35-40	230-350	68-60	
Сельдь	8-12	3-10	160-90	$\overline{TS} = 21,7 \log L - 75,5$ (для $L > 12$ см) $\overline{TS} = 11,3 \log L - 63,7$ (для $L = 4-13$ см)
	12-16	10-23	90-60	
	16-20	23-50	60-48	
	20-25	50-120	48-33	
	25-30	120-220	33-27	
Креветка	2-3	0,05-0,1	200-150	$\overline{TS} = 20 \log L - 78,3$ $\overline{TS} = 25,2 \log L - 75,0$
Эффаузииды	3-5	0,1-1	150-60	
	5-8	1-5	60-30	
	8-12	5-10	30	
Песчанка	16-23	10-30	50±10	
Миктофиды	4-7	1,5-4	105±25	
Медуза	Ø10-30	200-700	1,9±0,7	
Кальмары	30-40	500-1500	6±2	
Паралеписы	20-30	15-50	76±10	
Скумбрия	30-40	350-720	1,2-0,4	
Сайда	36-62	460-2040	36-24	
	62-79	2040-5000	24-18	
Аргентина	24-44	110-700	50±10	
	20	30	16,5±7	
Макрорус	30	120	6,2±1,6	
	40-70	300-2200	4,0±1,0	

Примечание. В большинстве случаев линейные зависимости силы цели от длины рыб вида $\overline{TS} = a \log L + b$ являются приближенными и справедливы лишь для ограниченного размерного ряда. Зависимости $\overline{TS}(L)$ для всего размерного ряда рыб определенного вида являются нелинейными и их удобнее выражать графически, чем с помощью приближенных линейных уравнений. Приведенные в табл. 13.5 данные о $\bar{\sigma}_{кр}(L)$ по видам гидробионтов получены именно из таких графических экспериментальных зависимостей $\overline{TS}(L)$ [Руководство ПИНРО, 1989].

Таблица 13.5. Приближенные значения $\sigma_{кр}$ и $TS_{кр}$ для различных гидробионтов Северной Атлантики [Методическое пособие..., 2006]

Вид	Длина, см	$\sigma_{кр}$, см ² /кг	$TS_{кр}$, дБ/кг
Паралеписы, угри, гоноостомовые и т. п.	$l_{ab} = 5-50$	50	-34,0
	$l_{ab} < 5$	100	-31,0
	$l_{ab} > 15$	35	-35,6
Песчанки, миноги	$l_{ab} = 10-15$	55	-33,6
	$l_{ab} < 10$	110	-30,6
Зубатки	$l_{ab} \sim 12$	5	-44,0
	$l_{ab} < 12$	25	-37,0
	$l_{ab} > 12$	15	-39,2

Окончание табл. 13.5

Вид	Длина, см	$\sigma_{кр}$, см ² /кг	TS _{кр} , дБ/кг
Люмпенусы, лептоклинусы	$l_{ab} = 8-12$	46	-34,4
	$l_{ab} < 8$	100	-31,0
	$l_{ab} = 10-20$	20	-38,0
Липарисы	$l_{ab} = 6-10$	50	-34,0
	$l_{ab} < 6$	100	-31,0
Миктофиды	$l_{ab} = 7-16$	75	-32,2
	$l_{ab} = 4-7$	105	-30,8
Пинагоры, круглоперы и т. п.	$l_{ab} \sim 8$	5	-44,0
	$l_{ab} < 8$	10	-41,0
	$l_{ab} = 35-90$	4	-45,0
Макрурусы	$l_{ab} = 25-35$	6	-43,2
	$l_{ab} = 20-25$	13	-39,9
	$l_{ab} < 20$	30	-36,2
	$l_{ab} > 30$	6	-43,2
Скумбрия	$l_{ab} = 20-30$	12	-40,2
	$l_{ab} = 10-20$	25	-37,0
	$l_{ab} < 10$	50	-34,0
	$l_{ab} = 4U-50$	25	-37,0
Аргентина	$l_{ab} = 30-40$	35	-35,6
	$l_{ab} = 20-30$	50	-34,0
	$l_{ab} = 10-20$	100	-31,0
Камбаловые, скаты, палтус и т. п.	$l_{ab} < 10$	200	-28,0
	$l_{ab} \sim 12$	10	-41,0
	$l_{ab} < 12$	50	-34,0
Ликоды, лисички, бычки и т. п. (беспузырные рыбы)	$l_{ab} = 8-20$	10	-41,0
	$l_{ab} < 12$	25	-37,0
	$l_{ab} = 50-150$	24	-37,2
Хек, налим, менек, тригла, мольва, ставрида (пузырные рыбы)	$l_{ab} = 25-50$	50	-34,0
	$l_{ab} = 12-25$	80	-32,0
Акулы	$l_{ab} < 12$	200	-28,0
	$l_{ab} \sim 50$	2	-48,0
Лосось	$l_{ab} < 50$	10	-41,0
	$l_{ab} > 30$	15	-39,2
Колюшка трехиглая	$l_{ab} = 10-30$	50	-34,0
	$l_{ab} = 4-6$	210	-27,8
Креветка, криль	$l_{ab} = 2-12$	60	-33,2
	Диаметр=15-70	3-1	-(46,2-51,0)
Медузы, гребневники	Диаметр=8-15	5-3	-(44,0-46,2)
	Диаметр=3-8	10-5	-(41,0-44,0)
	Диаметр<3	10	-41,0
Кальмары, осьминоги и т. п.	Мантия> 10	6	-43,2
	Мантия< 10	20	-38,0
Микрокомпоненты ЗРС	$L < 2$	10	-41,0

Программа в EchoView выдает результаты эхоинтегрирования гидроакустических регистраций в виде величины морского коэффициента обратного рассеяния единиц площади акватории NASC (Nautical Area Scattering Coefficient), применяемого для открытых водоемов и измеряемого в м²/морская миля². Перевод величины NASC в величину S_a выполняется по формуле:

$$S_a = (100^2/1852^2) \text{ NASC}.$$

При выборе сетки галсов основное внимание обращают на участки обследуемого района, наиболее благоприятные для образования скоплений. Галсы гидроакустической съемки должны проходить поперек фронтальных и градиентных зон, пересекать вихревые образования, очаги апвеллингов и т. д.

В общем случае рациональное планирование сетки галсов гидроакустической съемки зависит от множества факторов, в т. ч. сроков проведения съемки и границ обследуемого района. При определении основных параметров съемки должны быть учтены и априорные сведения об объекте, районе, среде, в т. ч.:

- характер и границы распределения обследуемых объектов по акватории и по глубине;
- биологическое состояние объекта в период съемки (нерест, нагул и т. д.);
- поведение объектов съемки: миграции (вертикальные и горизонтальные), реакция на судно, особенности регистрации в разное время суток и др.;
- доступность скоплений обследованию: близость к берегу, удаление от дна и поверхности;
- характеристики района или водоема: соотношение мелководных и глубоководных участков, изрезанность береговых линий);
- возможные погодные условия в период съемки.

Важным условием планирования съемки является хорошее знание изучаемого объекта, среды его обитания.

При прокладке галсов необходимо учитывать характер пространственного распределения объекта исследования. Это важно также и при обработке данных съемки, поскольку сами методы используют определенные предположения об этих данных. Наиболее распространены зигзаг и параллельные галсы. Регулярная сетка в виде зигзага считается наиболее эффективной с точки зрения затрат времени на съемку при низкой интенсивности выборок. Также при планировании (обычно при проведении ГАС на морских акваториях) используют параллельные галсы, если межгалсовое расстояние мало в сравнении с длиной галсов. Если галсы короткие или проходят вблизи берега, то чаще используется зигзаг. Например, зигзаг планируют в прибрежной зоне или в узком заливе, в реке, на водохранилищах. Основным ограничением такой сетки галсов является то, что в местах поворотов интенсивность выборок выше, чем в других местах галсов. Регулярные параллельные галсы равномерно накладывают на обследуемую акваторию. Длина галсов должна превышать межгалсовое расстояние.

Для оценки степени покрытия акваторий съемок галсами пользуются следующим простым уравнением [см. Simmonds and MacLennan, 2005]:

$$d = \frac{D_r}{\sqrt{A_r}}, \quad (13.27)$$

где A_r – площадь акватории, m^2 ; D_r – общая протяженность галсов, m .

Критерием достаточности покрытия считается значение $d \geq 4$.

На рис. 13.10 приведены типичные сетки галсов гидроакустических съемок.

На рис. 13.11 показаны варианты галсов при съемках в открытом море вокруг островов.

Пример сетки галсов при гидроакустической съемке в мелководном водоеме с одновременным использованием как вертикальной, так и траверзной эхолокации показан на рис. 13.12.

На рис. 13.13 показан пример эхограммы с линией одновременного накопления данных интегратора. Подобное наглядное комбинированное отображение на экране совокупностей эхосигналов и данных эхоинтегрирования может быть полезным и при промысле для относительной количественной оценки облавливаемых скоплений и возможного улова (тем более с проверкой результатов по уловам). Введение в промысловые эхолокаторы режима интегрирования в настоящее время не представляет какой-либо сложности. В научных эхолокаторах имеются и режимы цифрового отображения данных о характеристиках обнаруженных объектов и их скоплений.

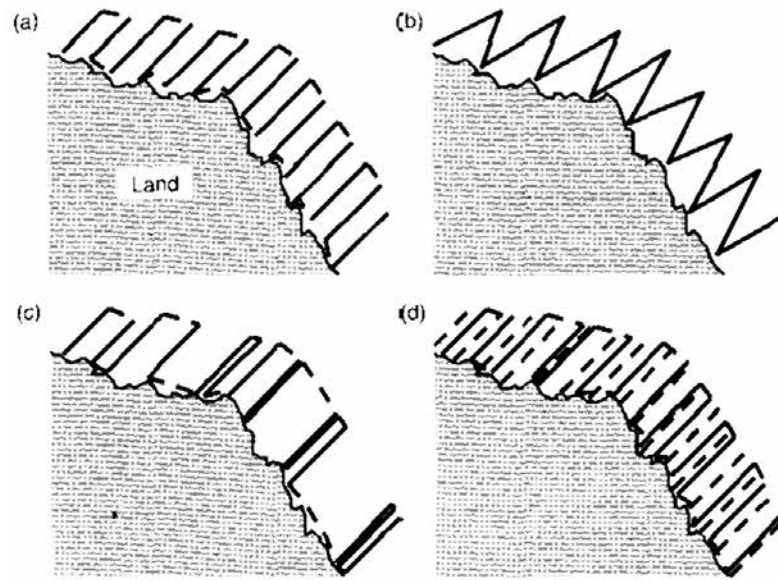


Рис. 13.10. Типичные формы галсов гидроакустических съемок:

a - параллельные галсы; *b* - в форме зигзага; *c* - с полностью случайным расположением параллельных галсов; *d* - один галс располагается случайным образом в пределах галсов с равными интервалами

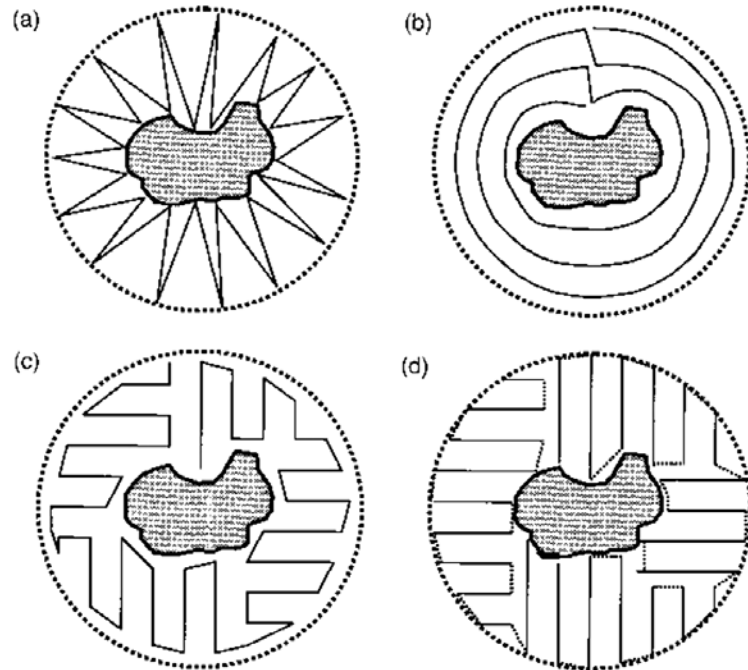


Рис. 13.11. Примеры галсов при съемках вокруг островов: *a* - треугольные с большей интенсивностью акустических выборок вблизи берегов; *b* - в виде кругов; *c* - прямоугольные с использованием всех выборок (по всем галсам); *d* - параллельные (данные с участков, обозначенных точками, не учитываются)

Современные научно-исследовательские эхолоты позволяют в режиме реального времени выполнять первичную обработку отраженных акустических сигналов и отображать на экране значения силы цели TS в дБ или значения силы объемного обратного рассеяния S_V , дБ в выбранных слоях водной среды. В результате первичной обработки эхосигналов формируются два массива TS и S_V , с которыми производятся дальнейшие вычисления с использованием так называемых постпроцессинговых систем (ППС).

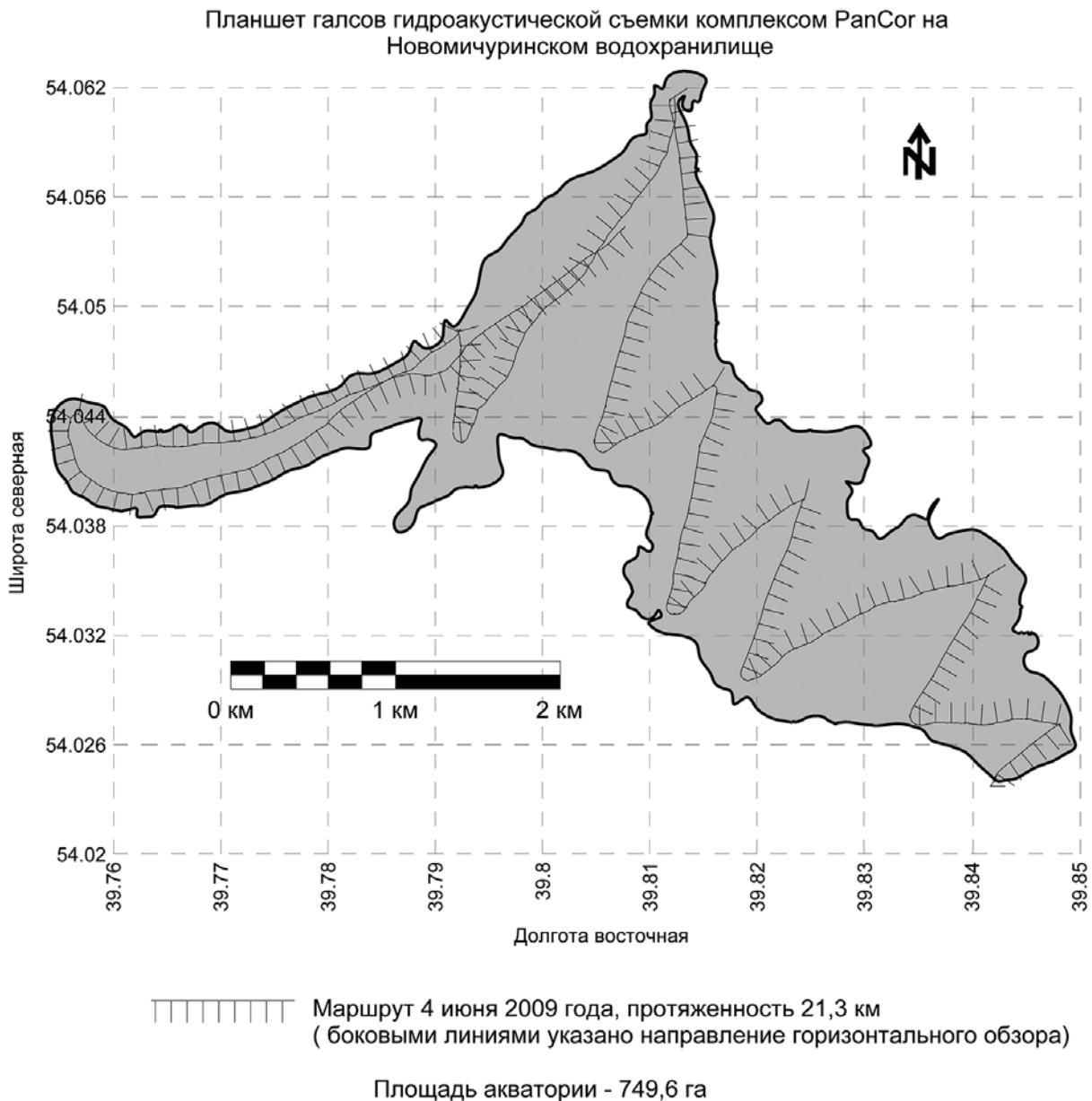


Рис. 13.12. Планшет галсов гидроакустической съемки (с траверзной локацией с одного борта) в Новомичуринском водохранилище (Рязанская область)

На рис. 13.14 показан пример эхограммы научно-исследовательской аппаратуры вертикальной локации ЕК500 (рабочая частота 38 кГц) с цифровой информацией о характеристиках лоцируемых объектов.

Дистанционный акустический мониторинг показал свою эффективность и при количественной оценке запасов водорослей и их состояния. До 80-х гг. оценку запасов водорослей проводили в основном водолазным методом, который трудоемок и затратен по времени и средствам. Поэтому с середины 80-х гг. начали изучать возможности применения гидроакустических приборов, в результате чего на северных морях был разработан метод, включающий начальную акустическую съемку зарослей сублиторальных видов с последующим отбором материала с помощью аквалангистов. Однако с их помощью обеспечивалась лишь качественная оценка водорослей. С развитием программных гидроакустических комплексов количественной оценки рыбных ресурсов встал вопрос о возможности их применения для оценки промысловых и массовых видов морских водорослей.

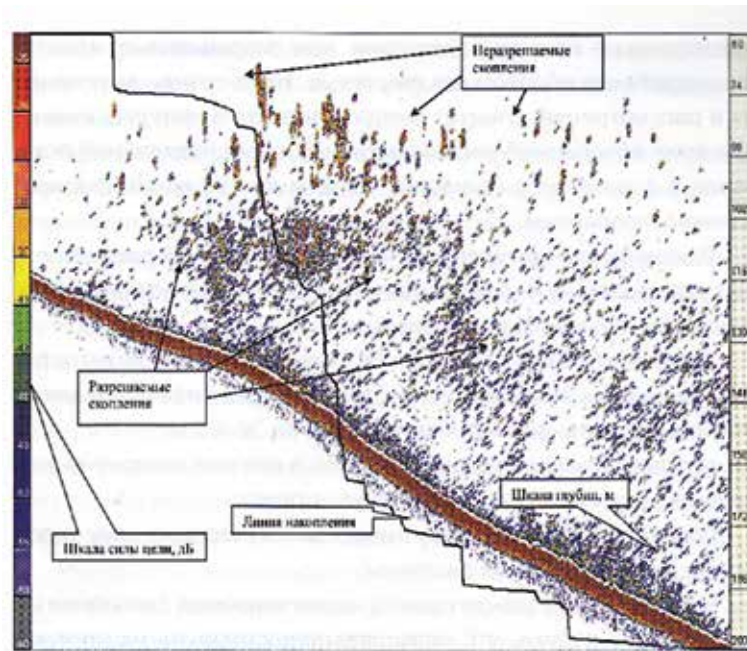


Рис. 13.13. Эхограмма отображения эхосигналов с одновременной информацией эхоинтегратора (темная линия). В средней части можно видеть достаточно резкое увеличение накапливаемой интенсивности при появлении плотных скоплений (оз. Байкал) [Кудрявцев и др., 2005]

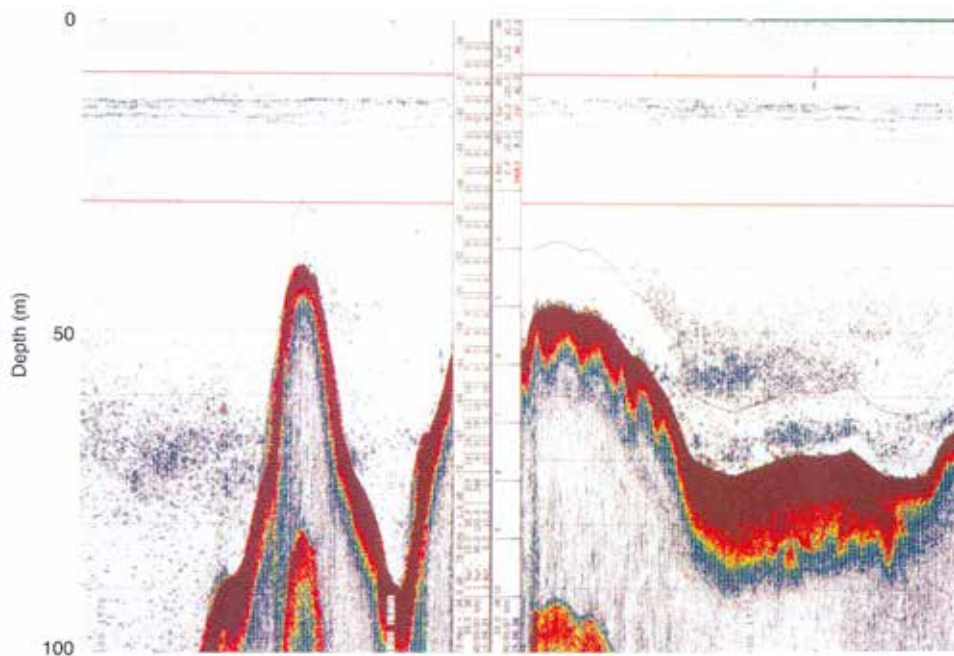


Рис. 13.14. Эхограмма концентрации небольших рыб аппаратурой ЕК500 (частота 38 кГц) с цифровой информацией в табличной форме о силе цели выделенных единичных рыб (левая колонка) и данных интегратора в трех выбранных слоях (при включенном ВАРУ по квазиквадратичному закону $40\log r + 2\alpha r$)

В 2002–2003 гг. СевПИПРО, СевНИИРХ и ВНИРО [Пронина и др., 2004] были проведены опытно-экспериментальные работы по применению комплекса АСКОР-2, объединяющего серийно выпускаемые рыбопоисковые эхолоты вертикального действия, радионавигационные приемники спутниковой радионавигационной системы GPS и электронно-вычислительные устройства, для количественной оценки ламинариевых водорослей Белого моря.

Эксперименты выполнялись на базе СевПИПРО на Соловецком архипелаге, объектом исследований являлись ламинария сахаристая (*Laminaria saccharina* (L) Lamour) и ламинария пальчаторассеченная (*Laminaria digitata* (Huds.) Lamour). Модель проводимых исследований, основывающаяся на принятом базовом положении гидроакустического метода оценки водных биомасс о линейной зависимости между энергией эхосигнала и плотностью рассеивателей, определялась как:

$$10 \log \bar{p} = \bar{S}a + 10 \log C,$$

где: \bar{p} – средняя биомасса водорослей (кг/м²) в интервале усреднения; $\bar{S}a$ – средняя сила поверхностного обратного рассеяния (дБ) в интервале усреднения; C – цена деления перехода от значений акустических характеристик обратного рассеяния к значениям биомассы водорослей (кг/м²).

Средняя сила поверхностного обратного рассеяния в интервале усреднения определялась как

$$\bar{S}a = 10 \log \bar{M} - 10 \log C_{EA} - 10 \log \Psi,$$

где \bar{M} – среднее накопление эхоинтегратора в интервале усреднения; C_{EA} – электроакустическая постоянная системы; Ψ – интегральный фактор направленности антенны.

Электроакустическая постоянная системы определялась калибровкой системы по эталонной цели как:

$$10 \log(C_{EA}) - 20 \log(r) + 10 \log(M_{\max}) - TS_{\text{сферы}},$$

где r – дистанция до сферы (шара); M_{\max} – максимальное накопление интегратора за одну посылку.

При анализе адекватности принятого базового положения гидроакустического метода оценки водных биомасс о линейной зависимости между энергией эхосигнала и плотностью рассеивателей применительно к водорослям, а также для получения значений цены деления перехода от значений акустических характеристик обратного рассеяния к значениям биомассы водорослей использовалась следующая схема эксперимента.

Катер с гидроакустическим комплексом устанавливался неподвижно над скоплением водорослей, и измерялась сила поверхностного обратного рассеяния. Выкашивались и взвешивались водоросли, находящиеся в круге, ограниченном окружностью радиусом 1 м от точки на дне, расположенной вертикально под антенной. Вновь измерялась сила поверхностного обратного рассеяния от оставшихся водорослей. Затем выкашивались и взвешивались водоросли в круге радиусом 2 м от центральной точки. Так, последовательно чередуя измерение силы поверхностного обратного рассеяния и выкашивание, добивались полного прекращения регистрации эхосигналов от водорослей по эхограмме. По границе зоны предельного обнаружения определялись порог регистрации по силе поверхностного обратного рассеяния (S_a) и предельный угол обнаружения. По серии значений S_a , соответствующих значений биомассы водорослей и занимаемым зарослями площадям была оценена адекватность модели линейной зависимости между S_a и биомассой водорослей и определена цена деления перехода от значений силы поверхностного обратного рассеяния (S_a) к биомассе. Эксперименты по описанной схеме проводились с использованием эхолокаторов с рабочей частотой 50 и 200 кГц.

Анализ полученных гидроакустических регистраций позволил сделать вывод о достаточной различимости донного и полезного (от скоплений водорослей) эхосигналов известными алгоритмами поиска дна. В процессе проведения работ была отмечена значительная разница в отражательной способности макрофитов на рабочих частотах 50 и 200 кГц. В связи с высокой отражательной способностью макрофитов на частоте 200 кГц зоны регистрации водорослей на частотах 50 и 200 кГц оказались практически одинаковыми, несмотря на значительную разницу в ширине диаграммы направленности применяемых антенн (46° и 14°), соответственно, на частотах 50 и 200 кГц – на уров-

не – 3 дБ). При применении частоты 200 кГц и узкой характеристики направленности антенны имеют место более низкий уровень помех, меньшее влияние боковых лепестков антенны, меньшая мертвая зона, более надежная селекция дна и достаточно широкая зона регистрации водорослей.

В результате проведенных опытно-экспериментальных работ была показана применимость линейной модели зависимости между акустическими характеристиками обратного рассеяния и биомассой сублиторальных водорослей по уловам; разработаны алгоритмы программной селекции эхосигнала от водорослей и донного эхосигнала; разработано специализированное для макрофитов программное обеспечение системы АСКОР-2, включающее программы сбора информации на съемках в море, камеральной обработки данных эхосъемок и калибровки системы по эталонной цели. Установлено, что пробные съемки по количественной оценке макрофитов гидроакустическим методом на экспериментальном полигоне дали результаты, достаточно близкие к оценкам биомассы водорослей, полученным традиционными водолазными выборками. Показана предпочтительность применения высокочастотных эхолотов с узкими характеристиками направленности (ХН) антенн для количественной оценки макрофитов вследствие значительно меньших помех, меньшего влияния боковых лепестков ХН антенны, меньшей мертвой зоны, более надежного и простого определения положения дна и в то же время достаточно широкой зоны регистрации, что особенно важно при работе на малых глубинах.

Проведенные опытно-экспериментальные работы показали перспективность использования гидроакустического метода оценки биомасс при количественной оценке макрофитов. Эхометрическая съемка позволяет определять границы зарослей, их размеры, плотность покрытия дна водорослями. Разработанная методика позволяет ускорить процесс сбора и обработки получаемых в экспедициях материалов, уменьшить применение водолазного труда, а также оперативно разрешать спорные вопросы, связанные с оценкой запаса и распределением водорослей.

В дальнейшем следует продолжить эксперименты по прямому измерению соотношения акустических характеристик обратного рассеяния и добываемой массы водорослей для разных по плотности распределения категорий зарослей и зарослей с разновидовым составом. Эти работы аналогичны исследованиям соотношения длина – сила цели или силы цели 1 кг рыбных объектов в рыбохозяйственной гидроакустике. Наряду с вышеизложенной схемой измерения указанных соотношений целесообразно применение схемы выкашивания находящихся под катером водорослевых участков круглой формы разных диаметров в различных местах зоны произрастания; их лоцирования, подъема водорослей с данных участков и их взвешивания, что будет способствовать повышению достоверности получаемых данных.

Необходимо проведение теоретических и практических работ по выбору метода интерполяции локализованных значений плотности зарослей при построении планшето-в распределений и расчета по ним площадей, занимаемых зарослями, и абсолютных значений биомассы водорослей. Обеспечение одновременной или квазиодновременной (через цикл лоцирования) двухчастотной гидроакустической регистрации водорослей значительно увеличит информативность, достоверность и удобство использования разработанной методики. При этом желательно использовать современные средства подводного видеонаблюдения.

Подобная градуировка гидроакустической эхолотационной аппаратуры (для определения зависимости коэффициента обратного поверхностного рассеяния s_a от плотности морских водорослей) выполнялась и при исследованиях по гидроакустической оценке ПИНРО запасов макрофитов на Мурманском побережье [Гаврилов, Зубов, 2008]. Работы проводились с помощью научно-исследовательской аппаратуры вертикальной локации EY500 (Симрад, Норвегия) с частотами 70, 120 кГц и программ пост-процессорной обработки гидроакустических данных EP500, FAMAS. С помощью научных эхолотов измерялась усредненная сила объемного обратного рассеяния в пре-

делах выбранного слоя, которая затем пересчитывалась в величину коэффициента поверхностного обратного рассеяния.

При калибровке приборов по эталонным целям использовались металлические шары, изготовленные из электролитической меди. Сила цели шара диаметром 32 мм для частоты 70 кГц, составляет $TS = -39,2$ дБ, а для частоты 120 кГц и шара диаметром 30 мм: $TS = -36,5$ дБ [Foote, 1982]. Процесс градуировки осуществлялся следующим образом. На естественных скоплениях водорослей разной плотности были выбраны экспериментальные полигоны размером 3 на 3 м. Рабочий катер, на котором располагались эхолоты с выносными антеннами, останавливался над зарослями водорослей, и проводились измерения. В одних случаях катер удерживался над зарослями водорослей, в других пересекал полигон в разных направлениях. Весь процесс градуировки предусматривал последовательные измерения величин S_a до и после поочередного выкашивания водорослей с площади полигона.

Выкашивание водорослей осуществлялось водолазом и продолжалось до полного прекращения их регистрации. Каждая выкошенная порция водорослей взвешивалась. Видовая идентификация водорослей в зоне обнаружения проверялась водолазами. Наличие пузырьков воздуха на листьях водорослей не наблюдалось.

При планировании проекта гидроакустической съемки очень важным моментом является определение количества галсов и расстояний между ними на основе объективных критериев, связанных с величиной ожидаемой погрешности в оценке биомассы. Такими критериями являются степень покрытия dc (degrees of coverage) [Simmonds, 1991] гидроакустическими пробами района съемки и требуемый коэффициент вариации оценки средней плотности морских водорослей. Максимальная скорость катера при съемке составляла 4,5 уз. Навигационная информация поступала от GPS Navigator.

Среди ламинариевых водорослей иногда встречались растения – хорда нитевидная (*Chorda filum*). Растения этого вида имеют крупное слоевище, длиной 0,5–2,0 м и толщиной 1–4 мм, суженное у вершины. Внутри слоевища имеются полости, благодаря которым растения обладают хорошими отражательными свойствами и эхосигналы от них четко фиксируются гидроакустическими приборами. На эхограммах растения регистрируются в виде продолговатых «столбов» темно-красного цвета, которые легко отличить от других водорослей. Величина силы обратного объемного рассеяния S_v растений хорда превышает силу обратного объемного рассеяния ламинариевых водорослей на 6–10 дБ. При постпроцессорной обработке эхограмм такие плотные показания не принимались во внимание (вырезались) и не учитывались в расчетах биомассы промысловых водорослей.

13.3.1. Обработка эхосигналов при количественной оценке гидробионтов

Процесс обработки гидроакустических сигналов можно условно разделить на два этапа: первичная и вторичная обработка.

Первичная обработка обычно начинается с визуального анализа эхограмм, когда из измеренных значений S_A исключают шумы, помехи, возможные «захваты грунта», а также учитывают наличие «пропусков» в приеме эхосигналов, вызванных плохой погодой, если они имеют место. Полезным в целом ряде ситуаций представляется расчет количества «пропусков» полезных сигналов при работе эхолокационной аппаратуры и автоматический ввод соответствующих поправок в измеряемые значения S_A с использованием алгоритма, приведенного в работе «Методическое пособие...» [2006, с. 42]. Он основан не на подсчете количества «пропусков», а на энергетическом анализе полезных сигналов, к примеру от ЗРС. Для этого программой отслеживаются и оцениваются величины S_A за каждый цикл лоцирования по установленным в аппаратуре слоям глубины. По эхограмме определяется «опорный» слой, в котором регистрируются наиболее плотные эхозаписи ЗРС. После анализа значений S_A в выбранном слое, измеряемых за каждый цикл локаций, устанавливается пороговая величина S_A , ниже которой цикл идентифи-

цируется как «неинформативный», т. е. с «пропуском». Таким образом, за интервал интегрирования компьютер собирает информацию как по количеству циклов локации с «пропусками», так и без них. По окончании интервала интегрирования на эхограмму выводится коэффициент, отражающий долю «пропусков» в данном интервале (отношение общего количества циклов лоцирования к числу циклов без «пропусков»), на который затем умножаются измеренные значения по слоям.

Задача идентификации эхограмм и разделения суммарных S_A по видам гидробионтов обычно облегчается изменением порога интегрирования $S_{Vпорог}$ при постобработке данных в зависимости от минимальной силы цели ($TS_{порог}$), соответствующей лишь необходимым объектам:

$$S_{Vпорог} = TS_{порог} - 10 \log(\sigma\tau/2) - 10 \log\psi - 20 \log r.$$

Для удобства использования в указанной работе зависимость значений $S_{Vпорог}$ от $TS_{порог}$ и r представлена в виде таблиц 13.6, 13.7 для $\tau = 0,001$ и $0,003$ с.

Таблица 13.6. Зависимость значений $S_{Vпорог}$ от $TS_{порог}$ и r для $t=0,001$ с

$c=1465$ м/с
 $t=0,001$ с
 $10Lg\psi = -21,0$ дБ

$$Sv = f(TS) = TS - 10Lg\frac{\sigma\tau}{2} - 10Lg\psi - 20LgR$$

R\TS	-20	-22	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-58	-60
25	-25,6	-27,6	-29,6	-31,6	-33,6	-35,6	-37,6	-39,6	-41,6	-43,6	-45,6	-47,6	-49,6	-51,6	-53,6	-55,6	-57,6	-59,6	-61,6	-63,6	-65,6
50	-31,6	-33,6	-35,6	-37,6	-39,6	-41,6	-43,6	-45,6	-47,6	-49,6	-51,6	-53,6	-55,6	-57,6	-59,6	-61,6	-63,6	-65,6	-67,6	-69,6	-71,6
100	-37,6	-39,6	-41,6	-43,6	-45,6	-47,6	-49,6	-51,6	-53,6	-55,6	-57,6	-59,6	-61,6	-63,6	-65,6	-67,6	-69,6	-71,6	-73,6	-75,6	-77,6
150	-41,2	-43,2	-45,2	-47,2	-49,2	-51,2	-53,2	-55,2	-57,2	-59,2	-61,2	-63,2	-65,2	-67,2	-69,2	-71,2	-73,2	-75,2	-77,2	-79,2	-81,2
200	-43,7	-45,7	-47,7	-49,7	-51,7	-53,7	-55,7	-57,7	-59,7	-61,7	-63,7	-65,7	-67,7	-69,7	-71,7	-73,7	-75,7	-77,7	-79,7	-81,7	-83,7
250	-45,6	-47,6	-49,6	-51,6	-53,6	-55,6	-57,6	-59,6	-61,6	-63,6	-65,6	-67,6	-69,6	-71,6	-73,6	-75,6	-77,6	-79,6	-81,6	-83,6	-85,6
300	-47,2	-49,2	-51,2	-53,2	-55,2	-57,2	-59,2	-61,2	-63,2	-65,2	-67,2	-69,2	-71,2	-73,2	-75,2	-77,2	-79,2	-81,2	-83,2	-85,2	-87,2
350	-48,5	-50,5	-52,5	-54,5	-56,5	-58,5	-60,5	-62,5	-64,5	-66,5	-68,5	-70,5	-72,5	-74,5	-76,5	-78,5	-80,5	-82,5	-84,5	-86,5	-88,5
400	-49,7	-51,7	-53,7	-55,7	-57,7	-59,7	-61,7	-63,7	-65,7	-67,7	-69,7	-71,7	-73,7	-75,7	-77,7	-79,7	-81,7	-83,7	-85,7	-87,7	-89,7
450	-50,7	-52,7	-54,7	-56,7	-58,7	-60,7	-62,7	-64,7	-66,7	-68,7	-70,7	-72,7	-74,7	-76,7	-78,7	-80,7	-82,7	-84,7	-86,7	-88,7	-90,7
500	-51,6	-53,6	-55,6	-57,6	-59,6	-61,6	-63,6	-65,6	-67,6	-69,6	-71,6	-73,6	-75,6	-77,6	-79,6	-81,6	-83,6	-85,6	-87,6	-89,6	-91,6
550	-52,5	-54,5	-56,5	-58,5	-60,5	-62,5	-64,5	-66,5	-68,5	-70,5	-72,5	-74,5	-76,5	-78,5	-80,5	-82,5	-84,5	-86,5	-88,5	-90,5	-92,5
600	-53,2	-55,2	-57,2	-59,2	-61,2	-63,2	-65,2	-67,2	-69,2	-71,2	-73,2	-75,2	-77,2	-79,2	-81,2	-83,2	-85,2	-87,2	-89,2	-91,2	-93,2
650	-53,9	-55,9	-57,9	-59,9	-61,9	-63,9	-65,9	-67,9	-69,9	-71,9	-73,9	-75,9	-77,9	-79,9	-81,9	-83,9	-85,9	-87,9	-89,9	-91,9	-93,9
700	-54,6	-56,6	-58,6	-60,6	-62,6	-64,6	-66,6	-68,6	-70,6	-72,6	-74,6	-76,6	-78,6	-80,6	-82,6	-84,6	-86,6	-88,6	-90,6	-92,6	-94,6
750	-55,1	-57,1	-59,1	-61,1	-63,1	-65,1	-67,1	-69,1	-71,1	-73,1	-75,1	-77,1	-79,1	-81,1	-83,1	-85,1	-87,1	-89,1	-91,1	-93,1	-95,1
800	-55,7	-57,7	-59,7	-61,7	-63,7	-65,7	-67,7	-69,7	-71,7	-73,7	-75,7	-77,7	-79,7	-81,7	-83,7	-85,7	-87,7	-89,7	-91,7	-93,7	-95,7
850	-56,2	-58,2	-60,2	-62,2	-64,2	-66,2	-68,2	-70,2	-72,2	-74,2	-76,2	-78,2	-80,2	-82,2	-84,2	-86,2	-88,2	-90,2	-92,2	-94,2	-96,2
900	-56,7	-58,7	-60,7	-62,7	-64,7	-66,7	-68,7	-70,7	-72,7	-74,7	-76,7	-78,7	-80,7	-82,7	-84,7	-86,7	-88,7	-90,7	-92,7	-94,7	-96,7
950	-57,2	-59,2	-61,2	-63,2	-65,2	-67,2	-69,2	-71,2	-73,2	-75,2	-77,2	-79,2	-81,2	-83,2	-85,2	-87,2	-89,2	-91,2	-93,2	-95,2	-97,2
1000	-57,6	-59,6	-61,6	-63,6	-65,6	-67,6	-69,6	-71,6	-73,6	-75,6	-77,6	-79,6	-81,6	-83,6	-85,6	-87,6	-89,6	-91,6	-93,6	-95,6	-97,6

Таблица 13.7. Зависимость значений $S_{Vпорог}$ от $TS_{порог}$ и r для $t=0,003$ с

$c=1465$ м/с
 $t=0,003$ с
 $10Lg\psi = -21,0$ дБ

$$Sv = f(TS) = TS - 10Lg\frac{\sigma\tau}{2} - 10Lg\psi - 20LgR$$

R\TS	-20	-22	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50	-52	-54	-56	-58	-60
25	-30,4	-32,4	-34,4	-36,4	-38,4	-40,4	-42,4	-44,4	-46,4	-48,4	-50,4	-52,4	-54,4	-56,4	-58,4	-60,4	-62,4	-64,4	-66,4	-68,4	-70,4
50	-36,4	-38,4	-40,4	-42,4	-44,4	-46,4	-48,4	-50,4	-52,4	-54,4	-56,4	-58,4	-60,4	-62,4	-64,4	-66,4	-68,4	-70,4	-72,4	-74,4	-76,4
100	-42,4	-44,4	-46,4	-48,4	-50,4	-52,4	-54,4	-56,4	-58,4	-60,4	-62,4	-64,4	-66,4	-68,4	-70,4	-72,4	-74,4	-76,4	-78,4	-80,4	-82,4
150	-45,9	-47,9	-49,9	-51,9	-53,9	-55,9	-57,9	-59,9	-61,9	-63,9	-65,9	-67,9	-69,9	-71,9	-73,9	-75,9	-77,9	-79,9	-81,9	-83,9	-85,9
200	-48,4	-50,4	-52,4	-54,4	-56,4	-58,4	-60,4	-62,4	-64,4	-66,4	-68,4	-70,4	-72,4	-74,4	-76,4	-78,4	-80,4	-82,4	-84,4	-86,4	-88,4
250	-50,4	-52,4	-54,4	-56,4	-58,4	-60,4	-62,4	-64,4	-66,4	-68,4	-70,4	-72,4	-74,4	-76,4	-78,4	-80,4	-82,4	-84,4	-86,4	-88,4	-90,4
300	-52,0	-54,0	-56,0	-58,0	-60,0	-62,0	-64,0	-66,0	-68,0	-70,0	-72,0	-74,0	-76,0	-78,0	-80,0	-82,0	-84,0	-86,0	-88,0	-90,0	-92,0
350	-53,3	-55,3	-57,3	-59,3	-61,3	-63,3	-65,3	-67,3	-69,3	-71,3	-73,3	-75,3	-77,3	-79,3	-81,3	-83,3	-85,3	-87,3	-89,3	-91,3	-93,3
400	-54,5	-56,5	-58,5	-60,5	-62,5	-64,5	-66,5	-68,5	-70,5	-72,5	-74,5	-76,5	-78,5	-80,5	-82,5	-84,5	-86,5	-88,5	-90,5	-92,5	-94,5
450	-55,5	-57,5	-59,5	-61,5	-63,5	-65,5	-67,5	-69,5	-71,5	-73,5	-75,5	-77,5	-79,5	-81,5	-83,5	-85,5	-87,5	-89,5	-91,5	-93,5	-95,5
500	-56,4	-58,4	-60,4	-62,4	-64,4	-66,4	-68,4	-70,4	-72,4	-74,4	-76,4	-78,4	-80,4	-82,4	-84,4	-86,4	-88,4	-90,4	-92,4	-94,4	-96,4
550	-57,2	-59,2	-61,2	-63,2	-65,2	-67,2	-69,2	-71,2	-73,2	-75,2	-77,2	-79,2	-81,2	-83,2	-85,2	-87,2	-89,2	-91,2	-92,2	-94,2	-96,2
600	-58,0	-60,0	-62,0	-64,0	-66,0	-68,0	-70,0	-72,0	-74,0	-76,0	-78,0	-80,0	-82,0	-84,0	-86,0	-88,0	-90,0	-92,0	-94,0	-96,0	-98,0
650	-58,7	-60,7	-62,7	-64,7	-66,7	-68,7	-70,7	-72,7	-74,7	-76,7	-78,7	-80,7	-82,7	-84,7	-86,7	-88,7	-90,7	-92,7	-94,7	-96,7	-98,7
700	-59,3	-61,3	-63,3	-65,3	-67,3	-69,3	-71,3	-73,3	-75,3	-77,3	-79,3	-81,3	-83,3	-85,3	-87,3	-89,3	-91,3	-93,3	-95,3	-97,3	-99,3
750	-59,9	-61,9	-63,9	-65,9	-67,9	-69,9	-71,9	-73,9	-75,9	-77,9	-79,9	-81,9	-83,9	-85,9	-87,9	-89,9	-91,9	-93,9	-95,9	-97,9	-99,9
800	-60,5	-62,5	-64,5	-66,5	-68,5	-70,5	-72,5	-74,5	-76,5	-78,5	-80,5	-82,5	-84,5	-86,5	-88,5	-90,5	-92,5	-94,5	-96,5	-98,5	-100,5
850	-61,5	-63,5	-65,5	-67,5	-69,5	-71,5	-73,5	-75,5	-77,5	-79,5	-81,5	-83,5	-85,5	-87,5	-89,5	-91,5	-93,5	-95,5	-97,5	-99,5	-101,5
900	-61,5	-63,5	-65,5	-67,5	-69,5	-71,5	-73,5	-75,5	-77,5	-79,5	-81,5	-83,5	-85,5	-87,5	-89,5	-91,5	-93,5	-95,5	-97,5	-99,5	-101,5
950	-62,0	-64,0	-66,0	-68,0	-70,0	-72,0	-74,0	-76,0	-78,0	-80,0	-82,0	-84,0	-86,0	-88,0	-90,0	-92,0	-94,0	-96,0	-98,0	-100,0	-102,0
1000	-62,4	-64,4	-66,4	-68,4	-70,4	-72,4	-74,4	-76,4	-78,4	-80,4	-82,4	-84,4	-86,4	-88,4	-90,4	-92,4	-94,4	-96,4	-98,4	-100,4	-102,4

В работе «Методическое пособие...» [2006, с. 40] отмечается, что «Практика гидроакустических съемок и особенности поведения и распределения таких рыб, как треска, пикша, окунь, показывают, что пелагическая составляющая рыбных скоплений в большинстве случаев представляет собой численную величину запаса этих рыб более мелкого размера, чем в придонной области. Применяющиеся в настоящее время методические подходы и программные средства позволяют выполнить лишь приближенный расчет численности и биомассы донных и придонных рыб, зарегистрированных в пелагиали, поэтому основной задачей первичной обработки гидроакустических данных является тщательный анализ эхограмм». Указывается, что при этом должен учитываться характер распределения рыбы у грунта и в придонных слоях в зависимости от глубины моря.

Несомненно наиболее рациональным и целесообразным решением данной проблемы, тем более при возможностях современной гидроакустики, средств отображения и обработки данных, представляется практическая реализация и применение буксируемой аппаратуры с n -м количеством высокочастотных эхолокационных датчиков [Кудрявцев, 2002, 2004]. В процессе съемки серия указанных датчиков буксируется перпендикулярно направлению движения судна, последовательно лоцируя широкую придонную зону, одновременно с работой бортовой эхолокационной аппаратуры вертикального действия.

Современные научно-исследовательские эхолокаторы вертикального действия позволяют в режиме реального времени обрабатывать отраженные акустические сигналы и отображать на экране результаты такой обработки в виде цветных эхограмм. В зависимости от выбранного закона ВАРУ (временной автоматической регулировки усиления) на экране отображаются значения TS , дБ или значения силы объемного обратного рассеяния (далее S_v , дБ). ВАРУ используется в эхолокаторах для компенсации потерь энергии акустического сигнала по мере его прохождения по глубине. Для того, чтобы исключить влияние затухания и расширения фронта волны с глубиной, при регистрации одиночных объектов характеристика ВАРУ должна обеспечивать нарастание усиления по квазиквадратичному закону $40 \log R + 2\alpha R$, а для множественных целей – по квазилинейному закону $20 \log r + 2\alpha r$, где r – глубина, м, α – коэффициент пространственного затухания акустической энергии в воде, дБ/м.

Преобразованный антенной отраженный акустический сигнал в электрическую форму в современных научно-исследовательских эхолотах оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с такой частотой квантования, чтобы сохранилась его фазовая структура. В результате такого цифрового преобразования мы имеем последовательные во времени выборки $1, \dots, i, \dots, n$ амплитудных значений сигнала. В ходе первичной обработки эхосигналов определяются основные параметры, характеризующие отражение от одиночных объектов и множественных целей. В основе расчета заложены основные положения гидроакустики.

Для идеального изотропного источника мощностью P_a , излучающего равномерно во всех направлениях, интенсивность излучения на расстоянии r определяется выражением:

$$\frac{P_a}{4\pi r^2}. \quad (13.28)$$

Реальная гидроакустическая антенна характеризуется коэффициентом направленности $D(\alpha, \beta)$ и коэффициентом электроакустического преобразования η . Учитывая также потери в среде (α – коэффициент пространственного затухания акустической энергии в воде, дБ/м), получим реальную интенсивность:

$$P_a D \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2}, \quad (13.29)$$

а с учетом

$$\eta = \frac{P_a}{P_t},$$

где P_t – электрическая мощность, подводимая к антенне, и обозначая $G(\alpha, \beta) = \eta D(\alpha, \beta)$, получаем:

$$P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2}. \quad (13.30)$$

Отражательная способность объекта характеризуется его эффективным сечением обратного рассеяния (effective backscattering cross-section area of target) σ . Рассматривая обратное прохождение звука, получим интенсивность на приемной антенне:

$$P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \sigma \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2}. \quad (13.31)$$

Мощность принимаемого сигнала P_r с выхода приемной антенны получим, умножив данное соотношение на эффективную площадь приемной антенны A , которая, как известно из теории гидроакустических антенн, связана с G соотношением:

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G, \quad (13.32)$$

где λ – длина звуковой волны.

Тогда:

$$P_r = P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \sigma \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G. \quad (13.33)$$

Отсюда выражение для σ :

$$\sigma = \frac{P_r 64\pi^3}{P_t G^2 \lambda^2} r^4 10^{2\alpha r}. \quad (13.34)$$

В гидроакустике более привычным является выражение отражательных свойств одиночного объекта (или одиночной цели) через его силу обратного рассеяния (point backscattering strength):

$$S_p = \frac{\sigma}{4\pi r_0^2} = \frac{P_r 16\pi^2}{P_t G^2 r_0^2 \lambda^2} r^4 10^{2\alpha r}, \quad (13.35)$$

где $r_0 = 1$ м – расстояние относительно одиночного объекта.

Логарифмическая версия данного соотношения, которая и используется в процессе первичной обработки эхосигналов в эхолокаторе вертикального действия, выражается как:

$$10 \lg(S_p) = TS = 10 \lg(P_r) + 10 \lg(r^4 10^{2\alpha r}) - 10 \lg\left(\frac{P_t G^2 r_0^2 \lambda^2}{16\pi^2}\right). \quad (13.36)$$

Параметр TS называется силой цели одиночного объекта. Таким образом, TS складывается из мощности принимаемого сигнала (сигнала, оцифруемого приемным трактом эхолокатора), параметра, зависящего от расстояния r , $VARU 40 \log r = (40 \log r + 2\alpha r)$, и величины, являющейся константой для эхолокатора (Const TS), определяемой его техническими характеристиками. Переходя к выборкам, окончательно получаем:

$$TS_i = P_i + TVG 40 \log r_i - \text{const } TS. \quad (13.37)$$

Отражение звука от однородного звукорассеивающего слоя характеризуется эффективной площадью обратного рассеяния на единицу объема $\partial\sigma/\partial V$. В этом случае выражение для мощности принимаемого сигнала принимает вид:

$$P_r = \int_V P_t G \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \frac{\partial\sigma}{\partial V} \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G dV, \quad (13.38)$$

где $\partial\sigma/\partial V dV$ – сечение обратного рассеяния элементарного объема dV , а интегрирование ведется по всему объему V , вносящему вклад в мгновенное значение принимаемого сигнала. Для излучателя с импульсным зондированием объем V определяется сферой толщиной $c\tau/2$, где c – скорость звука в воде, τ – длительность излучаемого импульса. Тогда интегрирование по всему объему V можно заменить интегрированием по полному телесному углу 4π ($dV=1/2c\tau r^2 d\Omega$):

$$P_r = P_t \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \frac{\partial\sigma}{\partial V} \frac{10^{-\alpha r}}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{c\tau}{2} r^2 \int_{4\pi} G^2 d\Omega. \quad (13.39)$$

$$\int_{4\pi} G^2 d\Omega = G_0^2 \Psi, \quad (13.40)$$

где G_0 – максимальное усиление антенны, Ψ – эквивалентный двойной телесный угол, являющийся ключевым параметром антенны.

Вводя коэффициент обратного объемного рассеяния (volume backscattering coefficient) s_V , получаем:

$$s_V = \frac{\partial\sigma/\partial V}{4\pi r_0^2} = \frac{P_r 32\pi^2}{P_t G_0^2 r_0^2 \lambda^2 c\tau \Psi} r^2 10^{2\alpha r}. \quad (13.41)$$

13.3.2. Постпроцессинговые системы (ППС)

Постпроцессинговые системы (ППС) являются важным инструментом количественного анализа гидроакустических сигналов и используются при гидроакустических съемках для решения целого ряда рыбохозяйственных задач: обработка эхосигналов, записанных во время съемки с целью оценки биомассы гидробионтов, исследование особенностей распределения гидробионтов и, в первую очередь, рыбных скоплений и косяков в толще водной среды, распределение их плотности в разное время суток и в зависимости от параметров среды и др.

Постпроцессинговые системы – это специально разработанные программы, устанавливаемые в компьютер и работающие в режиме отложенного времени с файлами, записанными в процессе работы гидроакустического прибора. Структуры файлов с данными зависят от типа гидроакустической аппаратуры. Как правило, ППС ориентирована на эхолотаторы, выпускаемые конкретной фирмой, но имеются и системы, например ППС EchoView, работающие с данными, зарегистрированными аппаратурой разных фирм.

ППС дополняет и существенно повышает возможности количественного анализа эхосигналов и вместе с гидроакустическим прибором представляет гидроакустический исследовательский комплекс. Как указывалось, современные научные гидроакустические эхолотационные приборы в процессе работы также проводят вычисления и, некоторые из них представляют результаты обработки эхосигналов на экране дисплея или на эхограммах, например, в табличном виде – в эхолотаторах EK500 и EY500, но вычисления производятся в пределах временных границ и слоев, предварительно устанавливаемых оператором в меню эхолотационной аппаратуры. Если возникает необходимость в повторной обработке, в пределах других границ, без ППС это сделать невозможно. Также при помощи ППС можно создавать базы данных эхограмм и гидроакустических съемок и при необходимости вернуться к ретроспективным данным и провести их обработку.

В настоящее время многими зарубежными компаниями и научно-исследовательскими институтами разработан целый ряд таких систем обработки и продолжается их совершенствование. Бергенским институтом морских исследований для обработки гидроакустических данных научно-исследовательских эхолотаторов EK500 и EY500 была разработана ППС BEI [Foote et al., 1991] и чуть позже появилась коммерческая версия этой программы BI 500. Для нового поколения эхолотаторов EK60 и EY60 в 1998 г. в IFREMER (Франция) была разработана ППС «Movies+», которая постоянно обновляется по мере развития технических возможностей научных эхолотаторов и дополнения знаний об объектах исследований [Berger et al., 2003]. Эта ППС используется и некоторыми научно-исследовательскими институтами других стран для сбора и обработки данных ГАС. Наряду с возможностями по выполнению количественной оценки здесь возможен анализ отдельных рыбных косяков. Система автоматически определяет пространственные и статистические параметры и характеристики каждого косяка (общее число параметров – 40). На основании этих вычислений оценивается вид регистрируемых рыб и рассчитывается рыбная биомасса. Данная ППС постоянно развивается и к настоящему времени уже разработано несколько версий этой программы.

Широкое применение в мире получила ППС EchoView [Higginbottom et al., 2000, 2002], разработанная частной австралийской компанией Sonar Data Pty Ltd. Разработка этой системы началась в 1995 г., а первая ее коммерческая версия появилась в 1998 г. Одним из главных достоинств этой системы является ее совместимость с научными эхолотаторами самых разных производителей. Например, в отличие от EP500 и BI500, работающих только с эхолотаторами фирмы Симрад, EchoView может работать с файлами, записанными эхолотаторами таких фирм, как: Simrad (Норвегия), Micrel (Франция), BioSonics и HTI (США), Kaijo и Furuno (Япония). Файлы в формате ППС Movies+ (Франция) также доступны для EchoView. В 2000 г. и в России в ТИНРО была разработана собственная ППС FAMAS [Николаев и др., 2000].

ППС Visual Analyzer американской фирмы BioSonics (США) поддерживает работу с файлами, записанными только на эхолотаторах серии DT, выпускаемых этой фирмой. Поскольку в аппаратуре DT предусмотрен специальный разъем для подключения спутниковой радионавигационной системы определения местоположения (GPS), то при ее использовании данные спутниковой системы записываются в файл одновременно с эхосигналами и в дальнейшем, при работе с ППС, отображаются на экране компьютера.

При загрузке файла в программу в левой половине экрана отображается эхограмма, а в правой части – эхосигналы, принятые в цикле лоцирования. По окончании загрузки файла вся эхограмма будет отображена на экране, а в правой части – эхосигналы последнего цикла локации. По цветовой шкале (левая часть экрана) можно оценить относительную интенсивность отраженных сигналов. Цветовая шкала задается в дБ по умолчанию в пределах 16 градаций, но ее диапазон, а соответственно и размер каждой градации могут быть установлены оператором как и цветовая палитра. При передвижении курсора по эхограмме в нижней части экрана меняются показания глубины и номер цикла локации, соответствующие его положению. Там же отображаются параметры эхограммы (пороговое значение, закон ВАРУ), коэффициент затухания для данной частоты излучения, а при наличии в файле данных от GPS, текущие координаты.

В верхней части экрана показаны все основные режимы программы: File, View, Display, Zooming, Analyze, Configure. В опции File происходит загрузка файлов и просмотр сопутствующей информации, при которой производилась запись эхосигналов в файл: параметры антенны эхолотатора, среды, приемного тракта и диапазона записи эхосигналов. В режимах View и Display производятся настройки интерфейса и эхограммы, отображение эхограммы с новыми параметрами. С помощью курсора можно выделить любой фрагмент эхограммы и заново его отобразить в режиме Zooming.

При запуске режима Analyze включается режим числового анализа и на экране появляется окно с размерами участка, в пределах которого производится обработка сигналов (рис. 13.15). Этот участок можно выделить при помощи «мыши» или ввести в ре-

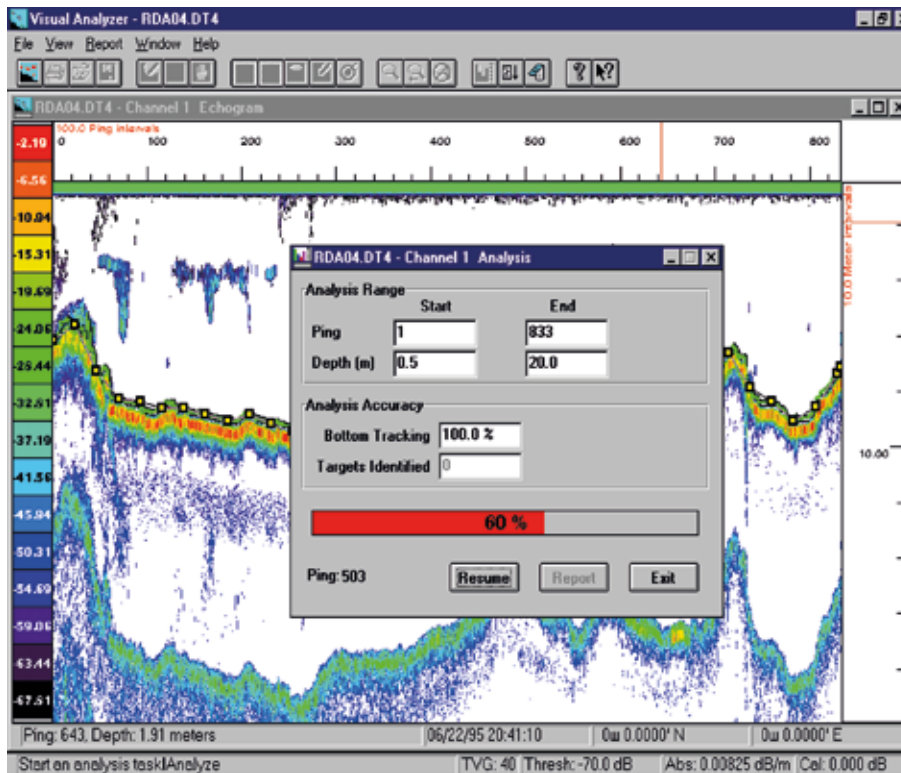


Рис. 13.15. Окно режима числового анализа данных (опция Analyze) в ППС VisualAnalyzer

жиме «Сofigure». В горизонтальном направлении границы участка вводятся через номер цикла лоцирования (Ping), в вертикальном – через глубину (Depth). В этом же окне отображается течение процесса обработки (красная полоса в окне) и порядковый номер обрабатываемого цикла. Все необходимые параметры для количественного анализа могут быть введены в режиме «Конфигурация (Configure)» и сделать это необходимо до запуска числового анализа. Следует также ввести критерии для распознавания донного эхосигнала, одиночной цели, пространственные границы анализируемой области (в пределах всей эхограммы или ее фрагмента).

Для обработки данных гидроакустической съемки с целью построения планшетов распределения рыбной биомассы и ее количественной оценки предусмотрена возможность автоматического разбиения эхограммы на одинаковые участки как по длине (интервалы интегрирования), так и по глубине (слои интегрирования). Для каждого выделенного участка рассчитываются средние значения объемного обратного рассеяния Sv (dB), объемной плотности и распределение силы цели TS (dB).

Для расчета объемной плотности необходимо ввести среднее значение длины рыбы, полученной по результатам контрольного облова или эффективной площади обратного рассеяния, пересчитанной из средней длины через силу цели. Если для пересчета была использована формула силы цели в размерности dB/кг, то в итоге будут получены значения средней объемной плотности в слое на интервале интегрирования в размерности кг/м³, если размерность силы цели была в dB, то объемная плотность будет получена в экземплярах в м³. Поверхностная плотность (экз/м² или кг/м²) определяется как произведение объемной плотности на ширину слоя интегрирования.

Важным этапом обработки является правильный выбор параметров, определяющих выделение донного сигнала, поскольку при ошибочном определении этих параметров возможен частичный захват донного эхосигнала, что приведет к значительному завышению значений плотности или к срабатыванию донной блокировки от плотных придонных скоплений рыб, что, в свою очередь, приведет к недооценке биомассы. При включении режима отображения распознанных донных сигналов на эхограмме вдоль

линии дна появляются квадратики, соединенные линией (рис. 13.14). Если оператор считает, что эти метки не соответствуют истинному положению дна, то он должен ввести иные параметры для его распознавания или провести ручную корректировку дна, подводя курсор к соответствующему квадрату и перемещая его в нужное положение. После этого скорректированная линия дна должна быть сохранена в исходном файле. Результаты анализа сохраняются в файле в текстовом формате, в табличной форме и для дальнейшей обработки могут быть введены в другие программы, например, Excel, Surfer и т. д.

ППС EP500 (Simrad KONGSBERG Company, Norway) была разработана для работы с научными эхолотами фирмы Симрад EY500 и EK500. Во многих странах эта аппаратура используется при проведении гидроакустических съемок и является стандартизованным инструментом для такого рода работ, поэтому EP500 нашла широкое применение при решении задач количественной оценки. При работе с эхолотом EK500 запись данных в файлы осуществляется под непосредственным управлением этой ППС. Формат файлов не зависит от типа эхолота (EK500 или EY500). В EY500 файлы могут быть созданы и без использования EP500 посредством непосредственной записи данных на твердый диск компьютера.

После установки и запуска программы на экране компьютера появится заставка (рис. 13.16), где отображена эхограмма в пределах всего диапазона, эхограмма придонного слоя, в верхней части экрана – главное меню ППС, в нижней части – некоторые параметры, читаемые ППС из файла и устанавливаемые при переводе файла в формат EP500. В левой нижней части экрана показаны данные, читаемые из файла: дата и время записи, пороговое значение определения силы цели в эхолоте (MinTS), общее количество циклов локации в файле, его размер в байтах, перечень установленных в эхолоте телеграмм (см. ниже); в правой нижней части экрана указываются параметры, вводимые вручную в ППС: название района работ, номер галса, тип используемой в эхолоте антенны, порог силы объемного обратного рассеяния (Sv threshold) для интегрирования эхосигналов, минимальное значение TS (TS threshold) при построении гистограмм распределения силы цели, пороговые значения TS и Sv для отображения эхограмм. При загрузке собственного файла именно такие справочные данные по-

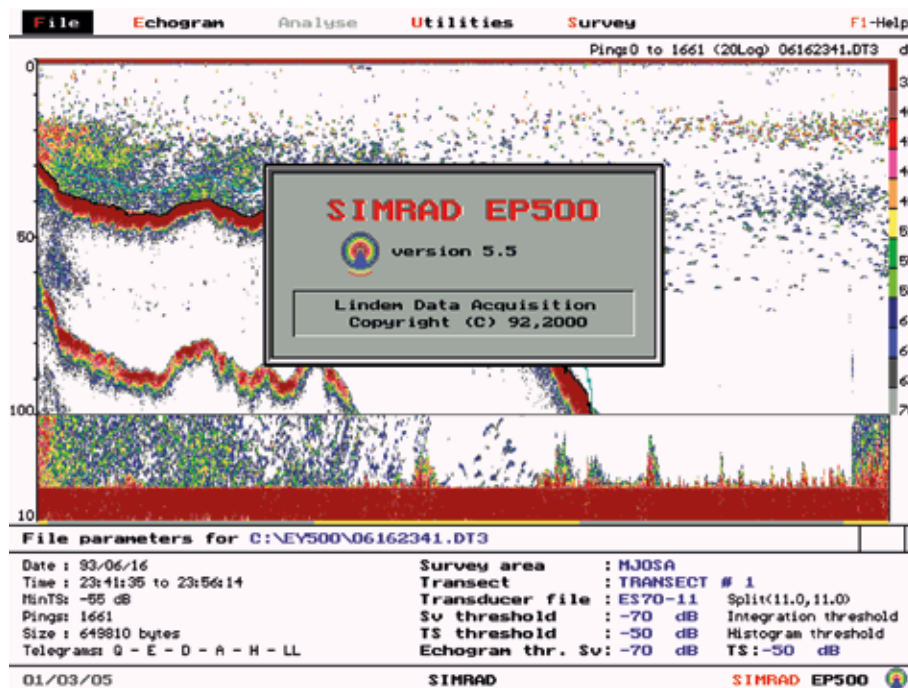


Рис. 13.16. Пример отображения данных постпроцессинговой системы EP500

явятся на экране компьютера. После этого можно переходить к анализу данных, содержащихся в файле, но предварительно необходимо конвертировать файлы из формата эхолокатора (dg-формат) в формат EP 500 (dt-формат). Объем данных, представленных в файле *.dg (файл эхолокатора) зависит от выбранных «телеграмм» в меню эхолокатора (ЕК500 или ЕУ500). Вся передаваемая информация от эхолокатора к другим устройствам, в том числе и в компьютер с EP500, разделена на отдельные фрагменты – «телеграммы». Чтобы направить данные на другое устройство, совершенно необязательно устанавливать весь перечень «телеграмм», а только те, которые действительно необходимы данному устройству. Минимальное количество телеграмм для EP500 – три (Q1, E1, S1 – см. описание работы эхолокаторов ЕК500 и ЕУ500).

Перед конвертированием следует установить некоторые рабочие параметры эхолокатора, при которых проводилась запись отраженных сигналов, в т. ч. ввести файл с рассчитанными характеристиками антенны. Такой файл может быть создан через специальный режим в меню EP500. ППС работает с данными, полученными от антенн с «расщепленным лучом» и однолучевых антенн. В зависимости от типа антенн используются различные алгоритмы эхосчета и компенсации силы цели одиночных объектов, связанных с неоднородностью диаграммы направленности. Для антенн с одной ХН используется метод Крейга и Форбса [Craig and Forbes, 1969], а для антенн с «расщепленным лучом» положение цели внутри луча определяется через фазовые сдвиги для каждого из четырех сегментов, после чего корректируется сила цели.

После конвертирования файла на экране появится эхограмма в пределах всех записанных циклов лоцирования. Эхограмма может быть отображена по одному из двух законов ВАРУ $20 \log r$ – для множественных целей и $40 \log r$ – для одиночных. Кроме этого можно изменить масштаб эхограммы в горизонтальном направлении и отобразить на экране любые 600 циклов локации эхолокатора, что бывает необходимо для визуального анализа (выделения «рыбных» записей на фоне других). В случае ошибочного определения дна, например, при регистрации придонных рыбных скоплений высокой плотности можно вручную на эхограмме (как и в ППС VisualAnalyzer, BioSonics) откорректировать линию дна.

В процессе работы эхолокатор выполняет интегрирование эхосигналов и расчет распределения силы целей одиночных объектов в выбранных слоях для каждого интервала интегрирования. Эти данные могут быть распечатаны не только на принтере эхолокатора, но и при установке соответствующих телеграмм, записаны в файл, затем просмотрены в EP500 и сохранены в формате текстового файла для работы с другими программами (например, с программами статистического анализа).

ППС позволяет проанализировать отдельно выбранный на эхограмме участок-сегмент или набор сегментов (рис. 13.16). Максимально возможное количество сегментов 100 (десять по вертикали и десять по горизонтали). При выборе слоя в вертикальном направлении отображается текущая глубина в метрах с привязкой к поверхности или к дну (в зависимости от выбора пользователя).

Результатами вычислений в каждом сегменте являются значения коэффициента поверхностного обратного рассеяния s_a ($\text{м}^2/\text{миля}^2$ или $\text{м}^2/\text{гектар}$), сила объемного обратного рассеяния Sv (dB), средние значения поверхностной (экз/миля² или экз/гектар) и объемной плотностей (экз/1000 м³), гистограмма распределения силы целей одиночных объектов (в т. ч. и рыб) TS (dB). Для каждого поддиапазона гистограммы (ширина каждого поддиапазона 3 dB при общей ширине гистограммы в 36 dB) рассчитывается количество распознанных одиночных целей, их объемная и поверхностная плотности. Также на экране показываются геометрические размеры сегмента (порядковый номер начального и конечного анализируемого цикла лоцирования, начальная и конечная глубина слоя) (рис. 13.17). Все результаты обработки могут быть сохранены в файле в текстовом формате.

При использовании аппаратуры с так называемым «расщепленным лучом» можно проанализировать положение цели внутри характеристики направленности антенны.

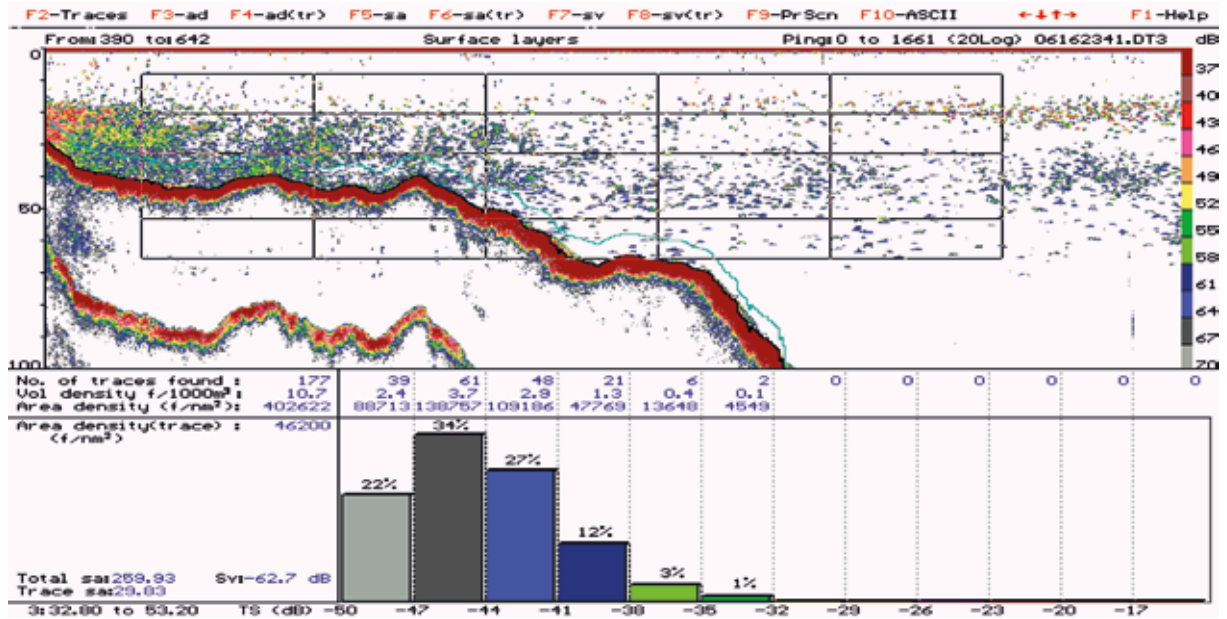


Рис. 13.17. Результат обработки в одном из двадцати сегментов

Перед началом такого анализа необходимо с помощью стрелочных клавиш выделить участок. В границах этого участка для каждой распознанной одиночной цели будет определена скорость движения рыбы относительно антенны и отображена траектория движения в горизонтальной плоскости в пределах диаграммы направленности.

В зависимости от ширины зоны действия эхолотатора и глубины одна и та же цель может регистрироваться в ней несколько раз. Пока цель находится в границах зоны действия для каждого отраженного сигнала отображается его порядковый номер, глубина до цели, TS и углы относительно акустической оси антенны в прямом и перпендикулярном направлениях. Все результаты обработки могут быть сохранены в файле в текстовом формате.

Существенным отличием от предыдущей ППС является специальный режим «Survey», позволяющий систематизировать файлы эхосъемки, отобразить траекторию движения судна на карте района работ и оперативно просмотреть и проанализировать нужную эхограмму. Использовать режим «Survey» можно при условии, что во время эхосъемки к эхолотатору была подключена спутниковая радионавигационная система GPS и в меню эхолотатора установлена соответствующая телеграмма для записи координат в файл.

Некоторые современные эхолотаторы, как например, ES60, по результатам вычислений TS отображают и гистограмму размерного ряда, поскольку в программу введена формула для пересчета TS рыбы в длину.

Как и EP500, программа BI500 (Simrad KONGSBERG Company, Norway) ориентирована на научно-исследовательские эхолотаторы фирмы Симрад EK500, EY500 и последнюю разработку EK60. BI500 работает вместе с эхолотаторами EK500 и EK60 и под ее непосредственным управлением производится запись данных в файлы. В эхолотаторах EK500 и EK60 можно работать одновременно с тремя или четырьмя различными частотами излучения, поэтому для каждой частоты одновременно будут создаваться четыре файла. С помощью «мыши» на эхограмме следует выбрать участок или слой для анализа. На выбранном участке или в слое результаты эхоинтегрирования представляются в значениях эффективной площади обратного рассеяния S_a , м²/миля², а эхосчета — в виде гистограммы распределения силы целей одиночных объектов с минимальным шагом 0,375 дБ. Гистограмма отображается в отдельном окне.

Эхограмма может быть разделена на отдельные участки и по каждому участку рассчитаны значения S_a и поверхностной плотности в размерности тонн/миля², поскольку

ку при настройке системы предусмотрен ввод зависимостей силы цели TS от длины для разных видов рыб. Результаты вычислений сохраняются в текстовом файле.

ППС SonarX_Pro (Simrad KONGSBERG Company, Norway) была разработана для проведения гидроакустических съемок на внутренних водоемах в условиях мелководья. Данная ППС относится к числу самых современных. SonarX_Pro обладает большим набором современных математических алгоритмов, позволяющих реализовывать и наглядно представлять на экране компьютера результаты обработки эхосигналов в двух- и трехмерных проекциях. Все опции EP500 реализованы и в этой ППС, но, помимо этого, здесь для селекции рыбных эхосигналов предусмотрено использование многочастотного метода. В программе имеется база данных уравнений TS для разных видов пресноводных рыб при горизонтальном излучении ультразвуковых сигналов. Это позволяет при горизонтальной локации рассчитывать размерные распределения рыб, попадающих в зону ультразвукового озвучивания. С высокой точностью определяется положение отдельных рыб в пределах диаграммы направленности антенны, что значительно повышает точность оценки их TS, а, следовательно, и размеров. Результаты обработки представляются на экране компьютера в многооконном режиме.

Программа EchoView (Myriax Echoview and Eonfusion, Australia) предназначена для обработки данных морских гидроакустических съемок и отличается большим разнообразием поддержки научной эхолокационной аппаратуры (вертикальной и горизонтальной локации), выпускаемой разными фирмами. Данная ППС постоянно совершенствуется и обновляется с учетом последних достижений развития научной гидроакустической аппаратуры. Последние версии программы поддерживают форматы файлов многоканальных эхолокаторов, формирующих множество характеристик направленности, в частности, эхолокатора ME70, что позволяет отображать трехмерные проекции дна и объемные формы рыбных косяков. Отличительной особенностью этой ППС является модульная структура (рис. 13.18) программы. В табл. 13.8 приведено краткое описание основных модулей ППС EchoView. В зависимости от потребностей пользователя можно выбрать при покупке только те модули, которые соответствуют целям исследований и имеющейся в наличии аппаратуры. Это существенно снизит стоимость покупки. В дальнейшем, по мере приобретения новой техники и расширения диапазона решаемых задач необходимые модули могут быть приобретены в дополнение к имеющимся.

ППС The Large Scale Survey System, LSSS (Marec, Norway) была разработана Бергенским институтом морских исследований [Korneliussen et al., 2006]. В LSSS сохранены все возможности ранее созданных ППС BI500 и BI60, но реализованы на более

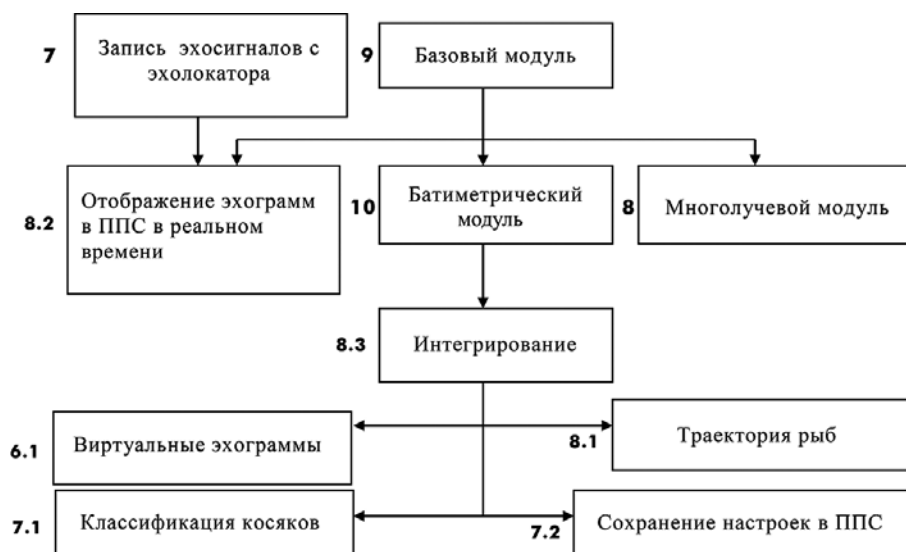


Рис. 13.18. Структурная схема модулей ППС EchoView

Таблица 13.8. Краткое описание основных модулей ППС EchoView

Модуль	Описание
Базовый	Чтение и отображение файлов, записанных эхолотом
Батиметрический	Определение и выделение контура дна. Создание объемной (трехмерной) модели донной поверхности и ее отображение в картографических проекциях
Анализ, экспорт	Проверка вводимых данных, проведение числового анализа (эхоинтегрирование, распознавание и счет одиночных объектов, определение их TS и т. д.). Экспорт результатов расчетов в файлы формата Excel для использования в других программах
Просмотр в реальном времени	Отображение эхограмм и траектории движения судна в реальном времени для эхолотов фирмы Симрад (Норвегия)
Виртуальные эхограммы	Создание новых синтезированных эхограмм по исходным разночастотным эхограммам с использованием математических операторов (многочастотный метод)
Распознавание рыбных косяков	Распознавание и анализ рыбных косяков на эхограммах
Траектория рыб	Определение и анализ траекторий движения отдельных рыб. Подсчет рыб и анализ их поведения
Стационарный гидролокатор	Определение и отображение траекторий отдельных рыб или рыбных косяков по данным многоканального гидролокатора Didson (http://www.lfv-westfalen.de/content/hydroakustik/didson_sonar.php)
2D гидролокатор	Определение и отображение траекторий отдельных рыб или рыбных косяков по данным гидролокаторов со многими характеристиками направленности в двухмерной проекции
3D гидролокатор	Объемное отображение рыбных косяков или других подводных объектов

современной платформе Windows. Главным достоинством этой системы является многочастотный режим (см. 13.1.3.2). Манипулируя с эхограммами можно выделять одни объекты на фоне других, а в отношении рыб проводить видовую селекцию. В LSSS представлен удобный и наглядный механизм, позволяющий с помощью выбора математических функций из соответствующей библиотеки ППС моделировать алгоритм видового распознавания. На рис. 13.19 представлен пример отображения видового распознавания рыбных косяков сельди и скумбрии.

Кроме этого, в последней версии программы реализована возможность трехмерного отображения косяков для самых современных многолучевых эхолотов ME70 и MS70, а также алгоритмы количественной оценки для этих систем.

В отношении использования гидроакустической аппаратуры при количественной оценке состояния запасов промысловых объектов следует иметь в виду, что основной задачей и в то же время проблемой соответствующей техники является получение максимально репрезентативных измерений плотностей эхолоцируемых в процессе съемки концентраций, их размерного и видового состава, нередко с учетом дополнительной информации от других источников. Ввиду определенной дискретности акустических измерений дальнейшее построение распределения плотностей и соответствующих планшетов выполняется статистическими методами, т. к. получаемая в процессе гидроакустических съемок информация относится к пространственно распределенной по окружающей среде. Статистическое моделирование пространственных явлений позволяет обобщить имеющиеся измерения и получить модель их распределения в пространстве. Наиболее распространенной проблемой при работе с пространственными данными является получение пространственной оценки [Демьянов, Савельев, 2010].

При работе с пространственными данными обычно имеется некоторое количество измерений изучаемой переменной в различных точках, число которых ограничено.

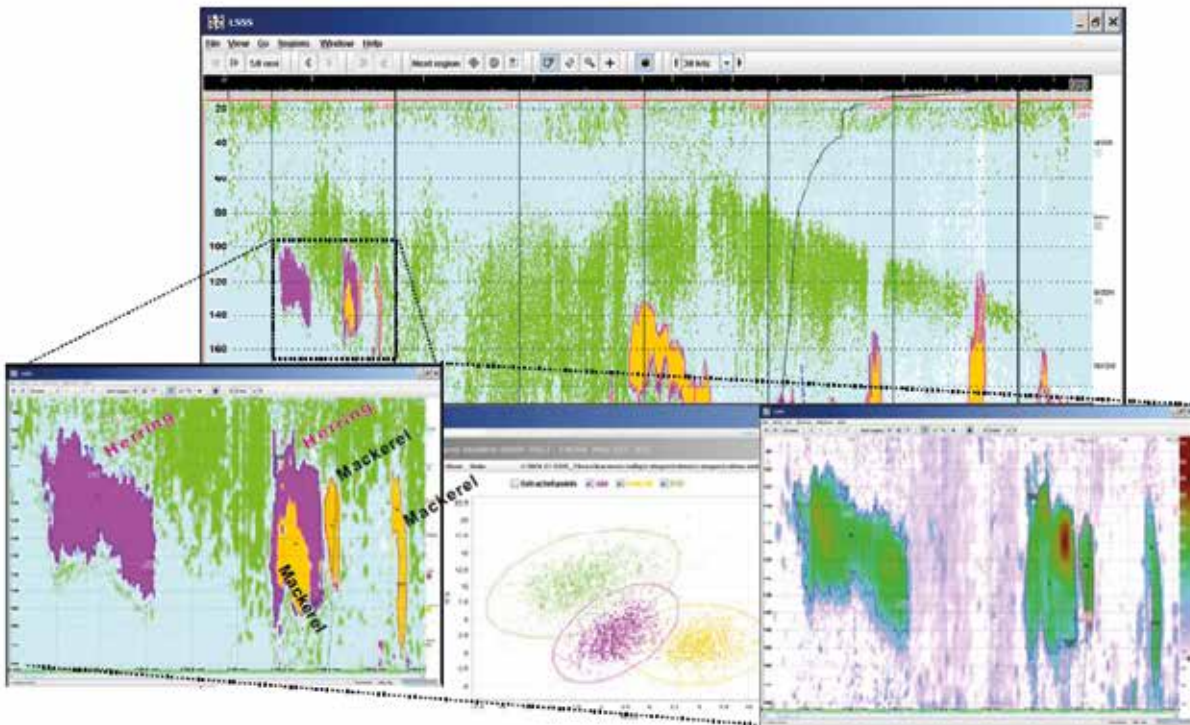


Рис. 13.19. Результаты видового распознавания рыбных косяков сельди и скумбрии

Данные измерений, как правило, дискретны и пространственно неоднородно распределены. Анализ данных и его результаты зависят от качества и количества исходных данных, от методов и моделей обработки данных.

Итак, есть область, из которой проведен ряд измерений некоторой величины z . Эти измерения проведены в произвольно распределенном по области наборе точек (x, y) . Но есть и участки области, не покрытые измерениями, о значениях величины z в которых хотелось бы получить информацию. Наиболее часто требуется оценить значение наблюдаемой величины в непромеренной точке X на основе имеющихся данных, т. е. решить задачу интерполяции.

Для решения таких задач в последнее время все более широко применяются методы геостатистики. Геостатистические методы позволяют выполнить обработку данных съемок, учитывая специфику пространственного распределения поля плотности. В этом случае имеется возможность восстановить поле плотности, получая дополнительные оценки в точках пространства, ближайших к точке наблюдения, основываясь на наличии корреляции (получить оценки плотности между галсами и за пределами галсов).

Пространственная структура акустического поля плотности изучается с помощью вариограмм, используя экспериментальные вариограммы и их теоретические модели. Вариограмма измеряет среднюю изменчивость (непостоянство) между двумя точками x и $x+h$ как функцию дистанции h (расстояния) между ними. Наиболее распространенными теоретическими моделями, которые позволяют описать поведение экспериментальной вариограммы, являются экспоненциальная, сферическая, гауссовская, линейная, степенная вариограммы и некоторые их комбинации.

Для получения наилучшей в статистическом смысле пространственной оценки используются модели из семейства кригинга – наилучшего линейного несмещенного оценителя. Его оценка (в статистическом смысле) обладает минимальной вариацией ошибки.

Знание вариограммы поля дает возможность решить ряд практических задач:
– оценить значение в точке, где измерения не проводились;

- вычислить среднее значение поля на каком-то локальном участке;
- вычислить среднее значение или интеграл от измеряемой величины в целом по квадрату, слою, подрайону;
- нарисовать (построить) карту, построить изолинии (определить значения по плотной сетке);
- оценить ошибку интерполяционной оценки.

Примеры вариограмм приведены на рис. 13.52.

Возможность вычислить значение поля в любой точке пространства с помощью кригинга позволяет реализовать следующую схему обработки данных: разбить страт (или любой выбранный полигон, слой) на мелкие участки, вычислить значение в средней точке каждого участка и затем усреднить их.

Целесообразность и полезность применения геостатистики к рыбохозяйственным данным первоначально были продемонстрированы на рабочей встрече ИКЕС, проведенной в Лондоне в 1985 г. Методы, которые были разработаны для оценки минеральных ресурсов [Matheron, 1971; Cressie, 1993] были рекомендованы к морским биологическим ресурсам. Далее ИКЕС провело три рабочие встречи (семинара): две в Бресте (первая в 1989, вторая в 1990). Третий семинар был проведен в Рейкьявике в сентябре 1991. В работах [Petingas, 1993; Rivoirard et al., 2000] приводится ряд конкретных примеров применения.

13.4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Одновременно с расширением применения гидроакустического метода количественной оценки гидробионтов проводились обширные исследовательские работы по его совершенствованию. В первую очередь это относилось к исследованиям по оценке и определению силы цели рыб и других водных биологических объектов (см. разд. 1) [Simmonds and MacLennan, 2005].

Большое количество работ было выполнено по размерной гидроакустической оценке гидробионтов в процессе поиска.

13.5. ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ РЫБ И ДРУГИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Много исследований было проведено по гидроакустической размерной классификации гидробионтов «in situ», т. е. непосредственно в процессе их обнаружения с применением как косвенных, так и прямых методов. Все они основаны на определении силы цели отдельно разрешаемых объектов по измеренным значениям амплитуды отраженных от них сигналов и последующим пересчетом в длину рыб по эмпирическим формулам [Urlick, 1967, 1983; Craig, Forbes, 1969; Love, 1972]. Указанные способы базируются на приведении амплитуд принимаемых от объектов эхосигналов к оси диаграммы направленности приемоизлучающей акустической антенны эхолокационной аппаратуры (для устранения влияния ХН антенны на распределение эхосигналов от отдельных объектов).

Косвенные методы [Craig, Forbes, 1969; Robinson, 1982, 1983] основаны на решениях сложной системы уравнений, выполняемых по специальным компьютерным программам. Принимается ряд допущений на характер распределения объектов в скоплении, в т. ч. предполагается равномерное распределение гидробионтов в озвученном объеме. Так как любые допущения являются только определенным приближением к реальным ситуациям, то они неизбежно приводят к погрешностям оценок. Для получения удовлетворительных результатов необходима большая статистика принимаемых эхосигналов от отдельно разрешаемых рыб, т. е. длительное время измерений.

Кроме косвенных методов разработан ряд прямых методов дистанционной размерной классификации концентраций гидробионтов.

Метод «двойного луча – double beam». Первым из примененных в практической рыбопоисковой акустической аппаратуре вертикальной локации прямых способов размерной классификации гидробионтов был разработан так называемый метод «двойного луча – double beam» [Ehrenberg, 1974]. В нем акустическая одночастотная антенна имеет одну узкую характеристику направленности при излучении и две приемные ХН – узкую и широкую, пространственно фиксированные в вертикальном направлении (рис. 13.20). Кроме акустической системы данное устройство имеет два приемных тракта, блок обработки, включающий тракт выделения эхосигналов от одних и тех же рыб, принятых одновременно широкой и узкой ХН акустической системы, и схему определения интенсивности принятого широкой характеристикой эхосигнала от данной рыбы (соответственно, ее силы цели). Сила цели для данного вида рыб связана с длиной рыбы (для целого ряда рыб уже получены соответствующие соотношения).

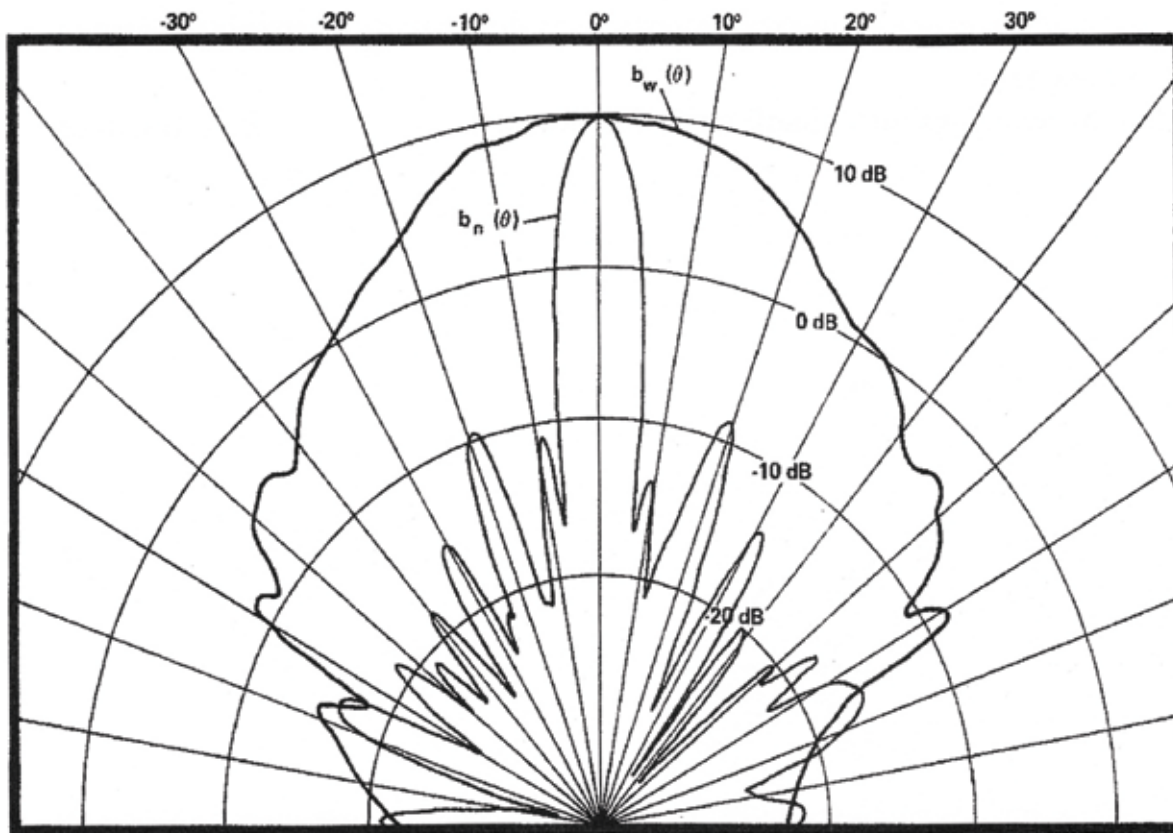


Рис. 13.20. Близкие к оптимальным характеристики направленности акустических антенн, применяемые фирмой Биосонис при практической реализации метода «double beam»

Так как блок обработки осуществляет измерение силы цели рыб, связанной с их длиной, лишь для эхосигналов, принятых обеими ХН, то оценка размеров возможна только для рыб, находящихся вблизи оси акустической системы, а именно, в пределах зоны действия узкой приемной ХН. Измерение интенсивности эхо производится трактом, подключенным к части общей антенны (с широкой ХН).

Метод «расщепленного луча – split beam». Другим в настоящее время широко применяемым на практике методом оценки размерного состава является так называемый метод «расщепленного луча – split beam» с акустической антенной, имеющей одну узкую ХН в излучении-приеме и четыре более широкие приемные характеристики, реализуемые путем разделения общей антенны с круглой апертурой на четыре одинаковых сегмента. Вначале определяется расположение объекта в пределах общей ХН путем измерения раз-

ности фаз у сигналов, принятых разными частями антенны. Затем на основании указанных данных амплитуда эхосигнала от объекта «приводится» к оси ХН антенны с помощью двух пар широких приемных ХН и определяется сила цели по интенсивности эха от рыбы, принятой узкой приемной ХН. Далее производится перерасчет силы цели в длину рыбы [Ehrgenberg, 1982].

Рабочая диаграмма направленности системы не может быть достаточно широкой. Ограничение на ее ширину обусловлено тем, что максимальные значения получаемой разности фаз не должны превышать длину волны излучаемых колебаний. Так, в реальной рыбопоисковой аппаратуре EK60 норвежской фирмы «Simrad» ширина характеристики равна 10° на уровне 6 дБ [Foote, 1984]. Точность результатов определяется точностью измерения разности фаз эхосигналов, снимаемых с различных частей антенны. В реальных условиях применения вследствие влияния качки судна будут иметь место флюктуации фазовых соотношений, что будет ухудшать точность оценки [Ehrgenberg, 1974; Foote, 1984].

Метод использования антенны с квазиплоской вершиной характеристики направленности. Японскими специалистами был разработан метод размерной оценки рыб на основе реализации характеристики направленности акустической антенны с примерно плоской вершиной (благодаря использованию неравномерного распределения по элементам антенны [Sasakura и Endo, 1987; Sasakura et al., 1987; Hamano et al., 1996] (рис. 13.21), который применяется в научно-исследовательской эхолокационной аппаратуре вертикальной локации типа FQ, разработанной фирмой Фуруно, на японских рыболовных НИС.

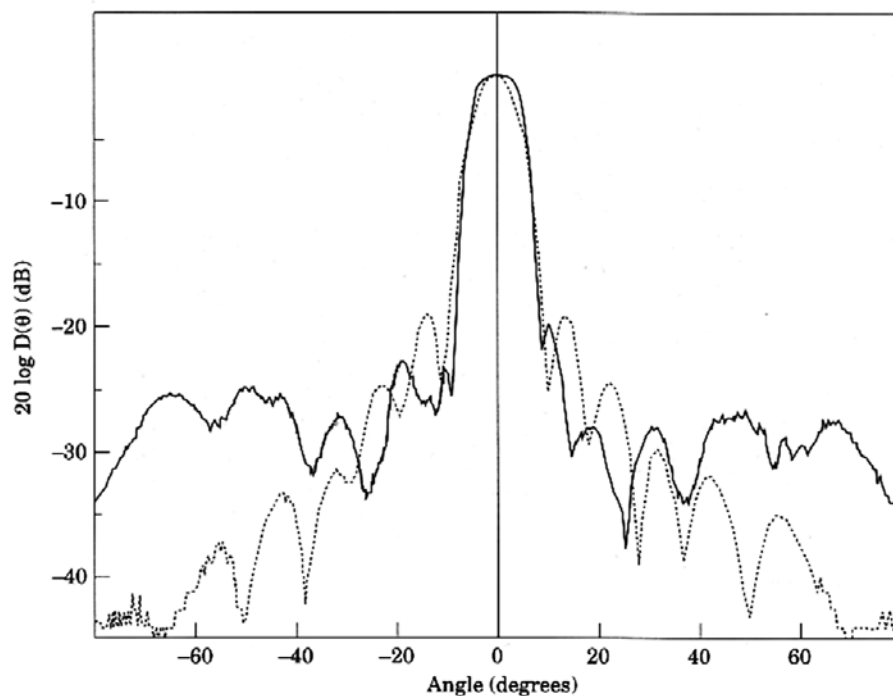


Рис. 13.21. Характеристики направленности гидроакустической антенны с квазиплоской вершиной в поперечной и продольной плоскостях [Hamano et al., 1996]

Метод использования гидролокатора секторного сканирования. В мелководных районах более целесообразным представляется метод акустической размерной классификации с использованием высокочастотной эхолокационной аппаратуры со сканированием ХН антенны в поперечной плоскости [Борисенко, 2008; Кудрявцев, Борисенко, 2008]. В устройстве, реализованном в соответствии с указанным методом, блок обработки выполнен в виде нескольких субблоков (трактов) [Кудрявцев, Борисенко 2008, Кудрявцев, 2013]:

– субблок выделения и накопления трасс последовательностей эхосигналов от рыб при перемещении приемной ХН в плоскости, перпендикулярной курсу судна (с фиксированным курсом судна).

сацией направления прихода эхосигнала и дистанции до него), и при движении судна (по правилу-алгоритму наличия в трассе, например, более двух смежных эхо);

– субблок (тракт) тракта селекции трасс от одиночных рыб (по правилу – алгоритму отсутствия смежных эхо в направлениях, перпендикулярных линии трассы);

– субблок (тракт) селекции формы линии трассы (примерно прямолинейной или выпуклой);

– субблок (тракт) определения (селекции) максимумов интенсивностей (уровней) эхосигналов в каждой из отселектированных трасс (с фиксацией направления прихода максимального эхосигнала и дистанции до него);

– субблок (тракт) накопления и хранения выделенных максимумов.

Кроме акустической системы данное устройство имеет два приемных тракта, блок обработки, включающий тракт выделения эхосигналов от одних и тех же рыб, принятых одновременно широкой и узкой ХН акустической системы, и схему определения интенсивности принятого широкой характеристикой эхосигнала от данной рыбы (соответственно ее силы цели). Сила цели для данного вида рыб связана с длиной рыбы (для целого ряда рыб уже получены соответствующие соотношения).

Основное ограничение методов гидроакустической размерной классификации обусловлено необходимостью обеспечения разрешаемой регистрации водных объектов.

Если в отношении гидроакустической размерной классификации задачу можно полагать в основном решенной и целесообразно лишь проведение исследований по повышению точности и достоверности получаемых результатов оценки, то проблема гидроакустической дистанционной видовой классификации оказалась более сложной.

13.6. ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ВИДОВАЯ ОЦЕНКА РЫБ И ДРУГИХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Видовая оценка обнаруживаемых концентраций рыб и других водных объектов часто является весьма важной задачей средств рыбохозяйственной гидроакустики. Длительное время практически единственным способом оценки видового состава скоплений рыб эхолокационной аппаратурой оставался анализ характера акустических показаний, получаемых при поиске и последующем облове обнаруженных концентраций. Анализ собираемых опытными судоводителями и гидроакустиком эхограмм с соответствующими обловами основывался также с учетом знания особенностей распределения в водной среде концентраций рыб разных видов, различий в форме и структуре их стай и скоплений, плотности концентрации в разное время суток и года в каждом конкретном районе. Ими собирались банки данных или своеобразные библиотеки характерных эхограмм с результатами и составами полученных уловов [Кудрявцев, 1979].

Параллельно проводились исследования методов непосредственного приборного определения видового состава рыбных скоплений с помощью гидроакустической аппаратуры, в частности с использованием эффекта Доплера, приборов для определения вида по резонансу плавательных пузырей [Holliday, 1972, 1974 et al.].

В работе «Рыбохозяйственная и планктонная акустика: прошлое, настоящее и будущее», представленной на международном симпозиуме 1995 г. в Абердине (Великобритания) [MacLennan and Holliday, 1996], отмечали, что видовая идентификация является главной проблемой рыбной и планктонной акустики. Об этом говорилось и в работе Хорна [2000].

С использованием активной и пассивной акустической локации проводились также исследования по видовой классификации, включающие тренировку и тестирование искусственных нейронных сетей (ANN), для автоматического распознавания и классификации цифровых регистраций эха от косяков в Юго-Западной Атлантике, а также звуков крабов (при пассивной локации) на Дальнем Востоке [Cabreira et al., 2009; Алифанов, Осипов, Стародубцев, 2009]. В работе [Cabreira et al., 2009] энергетические, морфологические и батиметрические описатели косяка выделялись из регистраций эха

и служили в качестве входов для ANN. Ими были рассмотрены несколько пелагических и придонных видов рыб, нередко формирующих косяки, включая анчоус, шпрот и др. Была получена корректная классификация до 96% в зависимости от видов, типа нейронной сети и числа используемых описателей косяков. Авторы полагают необходимым дальнейшее развитие этого метода как полезного средства для анализа эхограмм.

В последние годы большое внимание уделяется исследованиям по совершенствованию многочастотных гидроакустических методов автоматического видового распознавания биологических объектов в смешанных концентрациях с целью получения более качественных первичных данных при количественной оценке состояния запасов и распределения с помощью акустических съемок.

К началу применения методов многочастотной акустической видовой идентификации водных биологических объектов можно отнести работы в отношении зоопланктона [Greenlaw, 1979; Greenlaw and Johnson, 1983], где были разработаны модели отношения силы цели к частоте для простых структур. Эта концепция была применена [Holliday, Pieper and Kleppel, 1989] с использованием 21-й частоты в диапазоне 0,1 до 10 МГц. Эти работы проводились с применением буксируемых систем с небольшой дальностью действия (лишь до нескольких метров в связи с большим затуханием акустических колебаний на высоких частотах, особенно вблизи 10 МГц) и были нацелены специально на зоопланктон. Для различения водных биологических объектов применяются и более простые методы одновременного их озвучивания на двух частотах.

Так в работе [Everson et al., 2007] рассматриваются результаты серии из восьми повторяющихся акустических съемок, четырех днем и четырех ночью в Gullmarsfjord (Швеция). Они были выполнены в течение 24-часового периода 8 и 10 сентября 2003 г. с использованием калиброванного эхолокатора EK60, работающего на частотах 120 и 38 кГц. Разность в коэффициентах объемного рассеяния (ΔS_v) использовалась для различения норвежского криля от других рассеивателей. На рис. 13.22 представлены примеры эхограмм, полученных до и после использования ΔS_v в дневное и ночное время.

Авторы отмечают перспективность метода и анализируют условия обеспечения его большей эффективности.

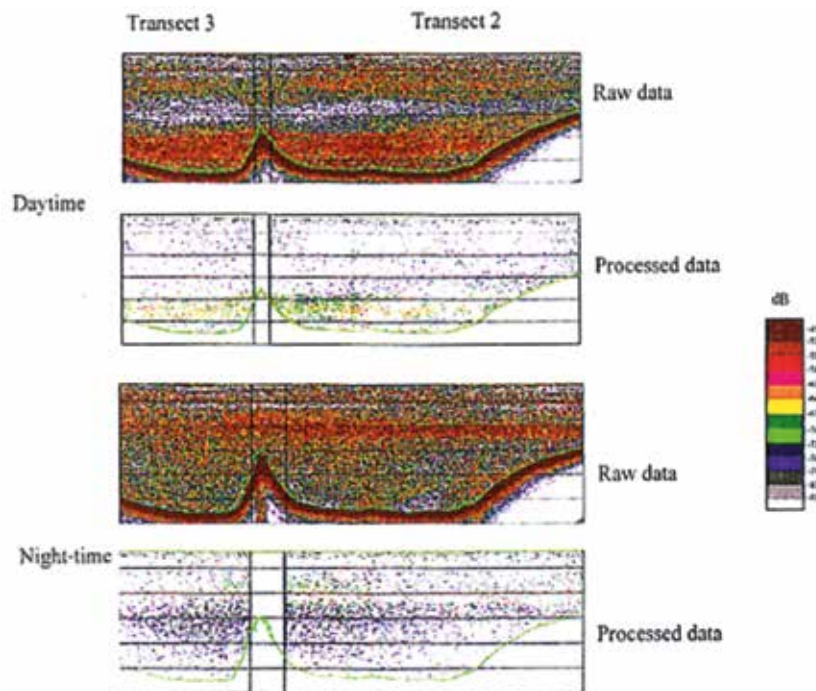


Рис. 13.22. Эхограммы EK60, полученные 10 сентября 2003 г. на частоте 38 кГц, показывающие эффект обработки «сырых» данных. Фильтрация указанных данных выполнялась с использованием ΔS_v в пределах 6–12 дБ. Порог был установлен равным 85 дБ

В работе [Korneliussen and Ona, 2002] рассматривается система для оперативного (примерно в реальном времени) анализа, обработки и визуализации многочастотных гидроакустических данных. В системе используются определенные комбинации калиброванных и оцифрованных данных нескольких дискретных эхолокационных частот для разделения и последующего выделения акустических рассеивателей и их категорий от зоопланктона и рыбы в смешанных концентрациях. Разработанный метод также полезен для количественной оценки относительного вклада каждой частоты в общее акустическое обратное рассеяние при анализе крупномасштабных акустических съемок. Во время исследований системы применялся специальный вариант эхолокационной системы EK500 при работе на частотах 18, 38, 120 и 200 кГц. Описываются методы формирования синтезированных, комбинированно-частотных, $c(f)$ эхограмм.

При обработке данных определяются относительные частотные отклики $r(f)$ для оценки частотной зависимости обратного акустического рассеяния:

$$r(f) = s_v(f) / s_{v,38},$$

где s_v – коэффициент обратного объемного рассеяния; f – акустическая частота; $s_{v,38 \text{ кГц}}$ – s_v на 38 кГц.

При определении акустических категорий применяется несколько математических операций, используется коэффициент обратного объемного рассеяния s_v , ближайшие соседние значения и, особенно, $r(f)$. s_v непосредственно относится к поперечному сечению обратного рассеяния объекта, $\sigma_{\text{обр.рас.}}$ и объему V .

$$s_v = \sum \sigma_{\text{обр.рас.}} / V.$$

Выполняется объединение в группы объемных сегментов рассеивателей в категории акустического рассеяния. Определение s_v требует ряда измерений для получения более стабильных результатов, сравнимых со средними обратными рассеяниями, рассчитанных из моделей.

В табл. 13.9 авторами приводятся обобщенные данные о категориях акустического рассеяния водными биологическими объектами.

Лишь одна акустическая категория относится к определенному объемному сегменту. Термины «малый» и «большой» относятся к размеру цели относительно длины акустической волны. Данные, приведенные в табл. 13.9, частично основываются на характеристиках моделей рассеяния, например, зоопланктона и молоди рыб с плавательным пузырем, и частично на эмпирических данных, к примеру, для атлантической скумбрии.

Испытания системы были проведены в Северном море и в Balsfjorden (Северная Норвегия). На рис. 13.23 и 13.24 приведены примеры работы системы в указанных районах.

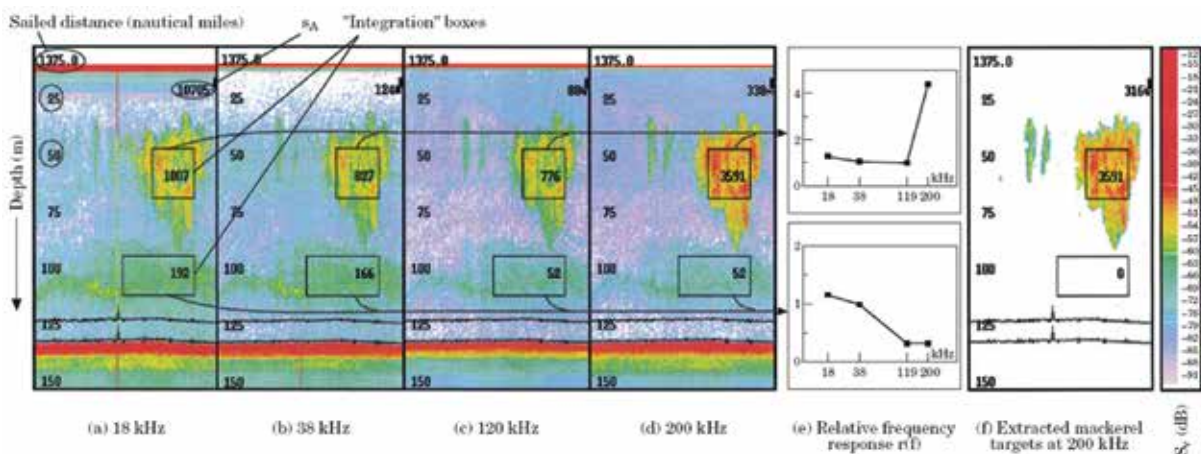


Рис. 13.23. Эхограммы, одновременно записанные на частотах 18, 38, 120, 200 кГц. На графиках в относительных единицах представлены интенсивности эхосигналов в зависимости от частоты, для выделенных участков

Таблица 13.9. Существующие категории акустического рассеяния в диапазоне частот 18–200 кГц

Акустическая категория, название и пример цели	Модель	Диам. экв. шара – сферы, мм	s_v и его частотная зависимость $r(f)$
0 – нет цели	–	–	На любой частоте нет измерений выше шумов
I/II «Планктон» PL – жидкообразный зоопланктон I – мелкий PL II – крупный PL (крыль)	Сфера, заполненная жидкостью, или изогнутый цилиндр	0–2	
III – «РЕАК18»: молодь рыб, зоопланктон с газовыми включениями	Газонаполненная резонансная сфера	4–10	$s_{v,18} < s_{v,120}/3$ $dr(f)/dr$ увеличится в диапазоне частот от 18 до 200 кГц
IV – «РЕАК18_38»; неизвестные ³		0,5–2 ²	$s_{v,18} < s_{v,38}$
V – «Рыба»: треска, сельдь, сайда; рыба с плавательным пузырем	Газонаполненный удлиненный сфероид	>20	$s_{v,38} < s_{v,200}$ $dr(f)/dr$ увеличится в диапазоне частот от 18 до 120 кГц $s_{v,18} < t^1 dr(f)/dr$ увеличится в диапазоне частот от 120 до 200 кГц
VI – «Дно»	Эмпирическая	–	s_v имеет пиковое значение на 18 кГц (или 38 кГц) $s_{v,18} > 2s_{v,120}; s_{v,38} > 2s_{v,200}$
VII – «Скумбрия»; атлантическая – скумбрия – рыба без плавательного пузыря	–	–	Слабый или слабо увеличивающийся s_v с увеличением частоты ⁴ В деталях не исследован
	–	–	s_v в основном существенно независим в диапазоне 18–120 кГц с пиковым значением на 200 кГц ⁵

¹ t – наибольшее значение s_v на 18 кГц, принятое для зоопланктона.

² $6500(1+0,1z)^{0,5}/f$ для воздухонаполненной сферы, z – глубина (м) и f – частота (Гц).

³ Часто имеет место в реальных акустических данных. Может быть обусловлено, например, резонансом между частотами 18 и 38 кГц или наклоном рыбы.

⁴ Действительно для «чистого» обратного рассеяния от рыбы с нормальным углом наклона.

⁵ Базируется на измерениях нескольких сотен косяков атлантической скумбрии.

На рис. 13.23 представлены эхограммы, записанные при одновременном излучении сигналов с четырех антенн: 18, 38, 120, 200 кГц. На графике представлен отклик эхосиг-

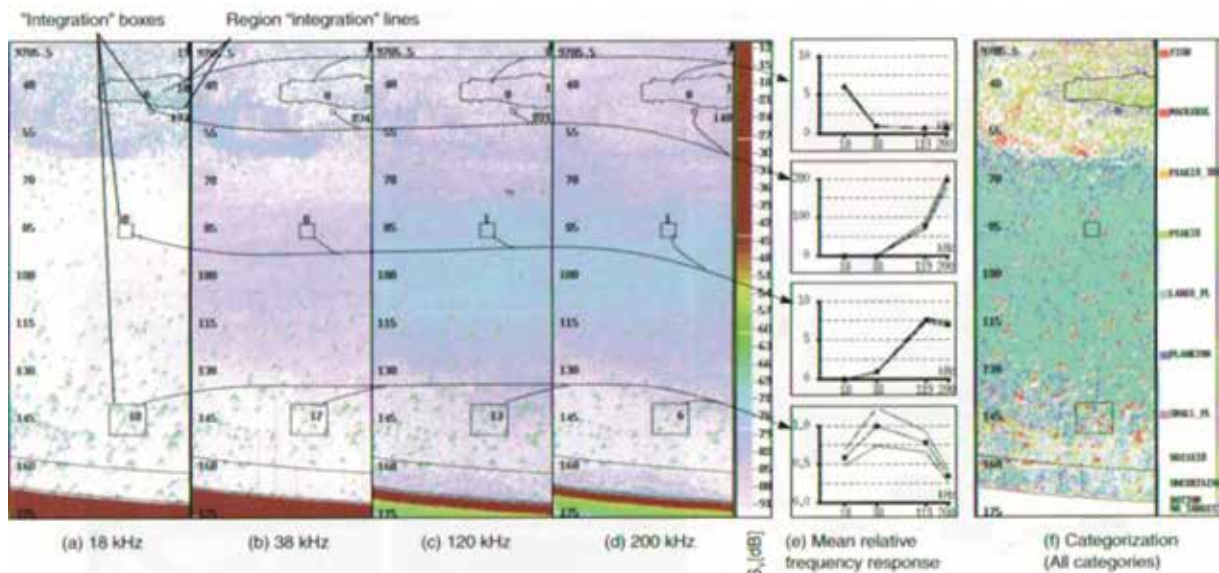


Рис. 13.24. Оригинальные («сырые») и синтезированная многоцветные эхограммы, полученные с помощью аппаратуры ЕК500 в Balsfjorden (перекрывающие 0,5 морских миль и собранные в течение 700 с) на частотах 18, 38, 120 и 200 кГц после удаления помех (а – д)

налов для каждой из четырех частот в относительных единицах для двух разных выделенных участков (прямоугольники разной формы).

На рис. 13.24, е показаны графики измеренных относительных частотных откликов $r(f)$, для скумбрии и норвежского поута (для выделенных участков). Соответствующая цветная шкала S_v представлена справа.

Цветная шкала, представленная справа, показывает соответствие между цветами и S_v . Частотные отклики $r(f)$, показанные на рис. 13.24 е для выделенных участков, важны для системы категоризации; (f) – синтезированная эхограмма, созданная системой категорирования с использованием скорректированных относительно помех данных в качестве входных, также со сглаженными флуктуациями и с их оригинальной разрешающей способностью по вертикали. Цветная шкала на (f) показывает соответствие между акустическими категориями и цветом.

В работе Ермольчева [2016] отмечается, что зарубежными исследователями получены положительные результаты по идентификации трех видов рыб (большоголов, солнечник и южная путассу) у берегов Австралии с помощью двухчастотной (38 и 120 кГц) технологии; трех видов рыб (минтай, мойва и окунь) в Беринговом море с помощью четырехчастотной (18, 38, 120 и 200 кГц) технологии; трех видов рыб (треска, сайда и тресочка Эсмарка) в районе Лофотенских островов с использованием пятичастотной (18, 38, 70, 120 и 200 кГц) технологии [De Robertis at al. 2010]. Выполненные работы показали, что $r(f)$ и $\Delta TS(f)$ рыб наиболее корректно определять, когда рыбы регистрируются эхолотом в виде одиночных эхотрасс, используя программы пост-обработки аку-

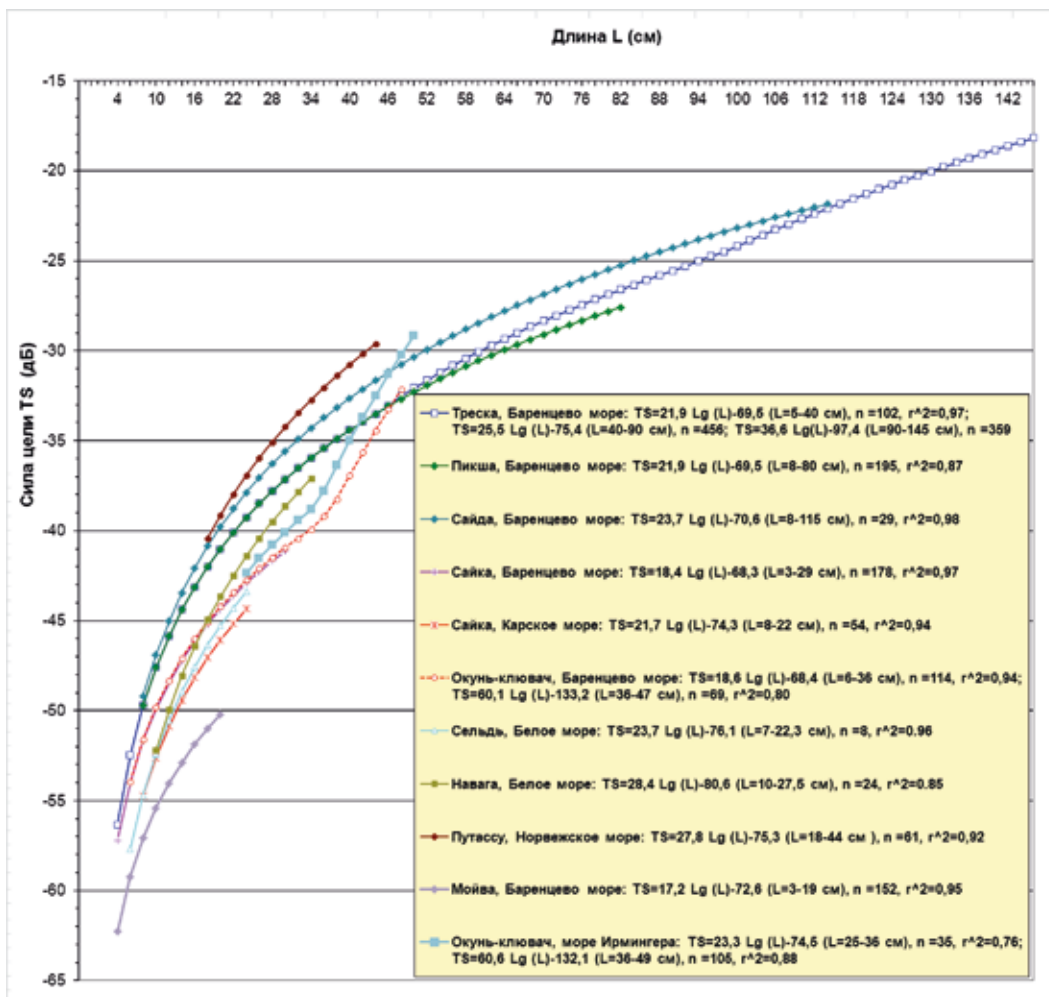


Рис. 13.25. Зависимости силы цели TS от длины L (TS - L зависимости) основных видов рыб в северных морях на частоте 38 кГц [Ермольчев, 2013].

стических данных, собранных эхолотом одновременно на всех частотах. «ПИНРО» использует двухчастотный эхолот Simrad EK60 (38 и 120 кГц), базу акустических данных, собранных в северных морях в 2004–2015 гг., и программы пост-обработки: норвежские Simrad BI60 и LSSS, а также российскую SALTSE [Ермольчев и Убарчук, 2015]. Были определены TS и их зависимости от длины $l(TS-l)$ для основных видов рыб в северных морях на частоте 38 кГц [Ермольчев, 2013], которые представлены на рис. 13.25. В 2015–2016 гг. определили частотные характеристики $r(f)$ и разницы сил цели $\Delta TS(f)$ основных видов рыб в северных морях на частотах 38 и 120 кГц, используя российскую программу пост-обработки SALTSE эхограмм и базу акустических данных, собранных эхолотом Simrad EK60 (38 и 120 кГц) в 2004–2015 гг. В качестве опорной приняли частоту 38 кГц, на которой выполняются все тралово-акустические съемки (ТАС) по оценке запасов рыб в северных морях. На рис. 13.25 представлены зависимости силы цели TS от длины L ряда рыб.

Результаты определения частотных характеристик $r(f)$ и разниц сил цели $\Delta TS(f)$ основных видов рыб в северных морях на частотах 38 и 120 кГц представлены на рис. 13.26 и рис. 13.27, из которых видно, что семь видов рыб по отличиям между собой частотных характеристик $r(f)$ и разниц сил цели $\Delta TS(f)$ можно разделить на две группы:

первая группа – мойва, треска и сайда, сила цели которых на частоте 120 кГц оказалась примерно в 2 раз меньше, чем на частоте 38 кГц, и разница сил цели на частотах 120 и 38 кГц имеет отрицательный знак;

вторая группа – сайка, путассу, окунь-клювач и пикша, сила цели которых на частоте 120 кГц оказалась примерно в 2 раз больше, чем на частоте 38 кГц, и разница сил цели на частотах 120 и 38 кГц имеет положительный знак.

Выявленные отличия частотных характеристик рыб соответствуют критериям успешной идентификации двухчастотной технологией (38 и 120 кГц), когда скопление состоит из рыб с частотными характеристиками противоположного характера. Так, поочередная пост-обработка эхотрасс на частотах 38 и 120 кГц позволяет отделить эхотрассы трески от эхотрасс пикши, эхотрассы мойвы от эхотрасс сайки. Эхотрассы мойвы и сайки можно отделить от эхотрасс крупных рыб других видов, используя разницы в абсолютных значениях сил цели на частоте 38 кГц в соответствии с рис. 13.28

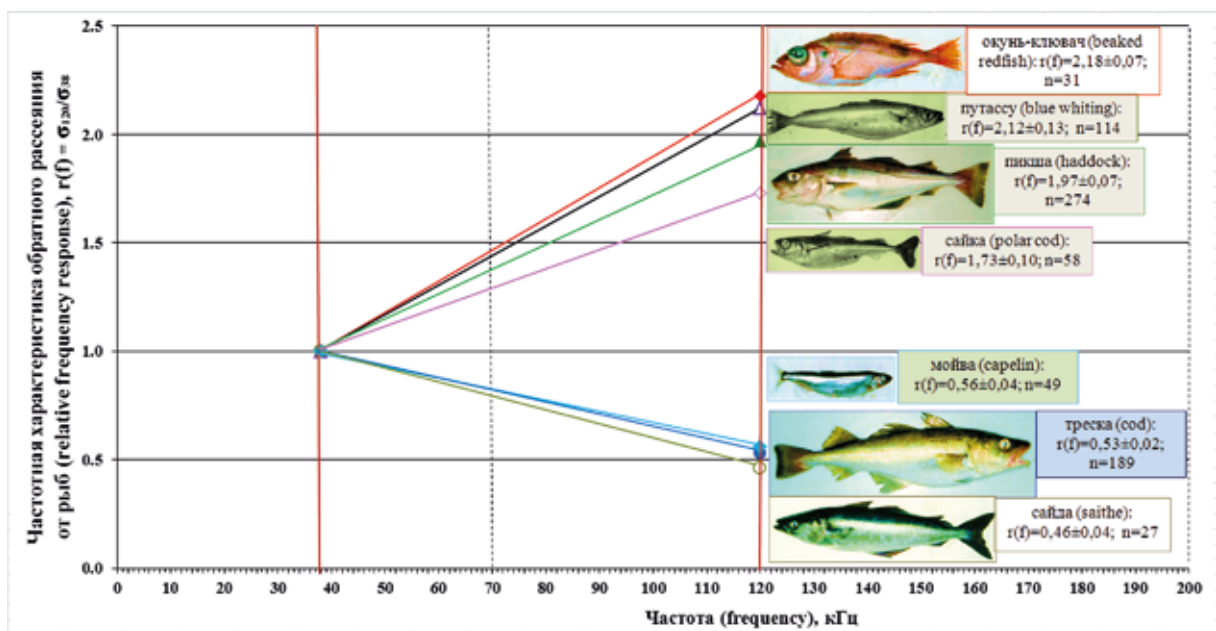


Рис. 13.26. Частотные характеристики $r(f)$ обратного рассеяния основных видов рыб в северных морях на частотах 38 и 120 кГц

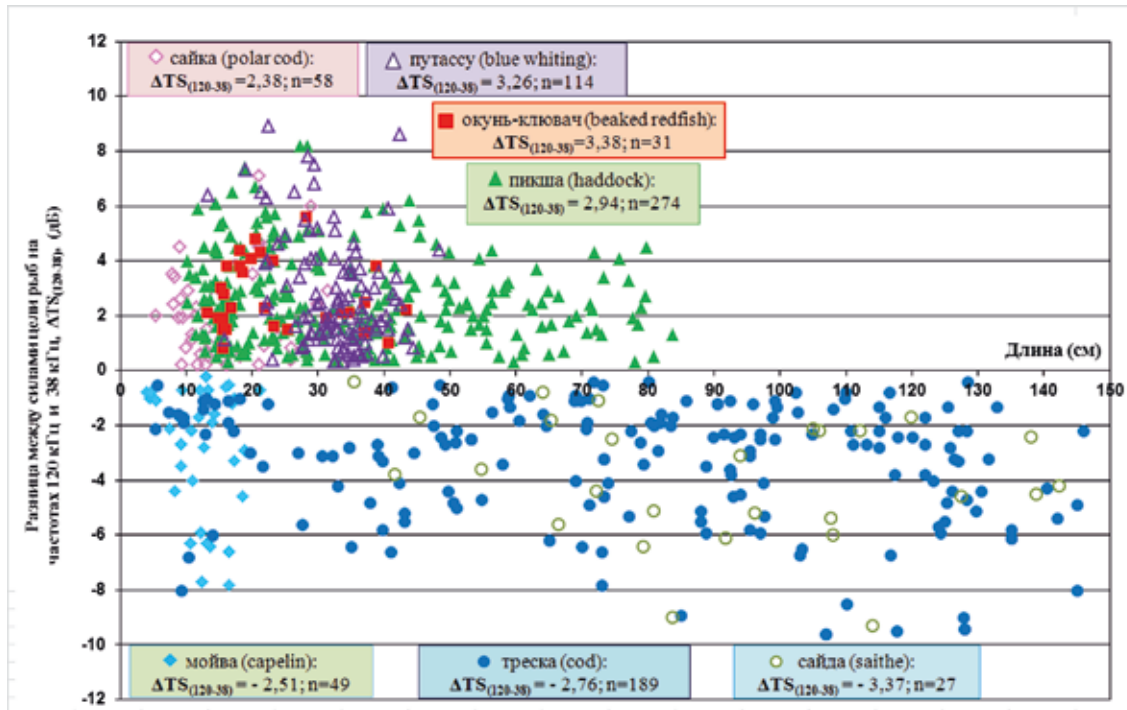


Рис. 13.27. Разницы сил цели $TS(f)$ основных видов рыб в северных морях на частотах 38 и 120 кГц.

Полученные частотные характеристики основных видов рыб в северных морях на частотах 38 и 120 кГц подтвердили перспективность применения многочастотных технологий для повышения эффективности ТАС по оценке запасов рыб и их видовой идентификации. Полученные частотные характеристики основных видов рыб в северных морях на частотах 38 и 120 кГц подтвердили перспективность применения многочастотных технологий для повышения эффективности ТАС по оценке запасов рыб и их видовой идентификации. Однако, можно полагать, согласиться с американскими исследователями, которые считают [De Robertis et al. 2010], что «объективная оценка эффективности многочастотного метода видовой идентификации в реальных условиях остается проблемой, так как лишь небольшая часть акустических измерений может быть проверена с помощью других методов сбора проб.

Оценка рыбных запасов ГА-методом на основе эхо-интегрирования требует правильной идентификации эхограмм, знаний акустической силы цели TS и ее зависимостей от длины L рыб для каждого вида. Однако идентификация в настоящее время, как и 50 лет назад, производится методом траловых проб, которые обладают селективностью, выполняются с большой дискретностью, небольшой протяженностью и небольшим охватом скоплений по вертикали и горизонтали. Поэтому траловые пробы не обеспечивают информацией о видах и размерах рыб в пространственных и временных масштабах, охватываемых гидроакустикой. Совершенствование ГА-метода оценок запасов рыб требует дальнейшего развития ГА-способов размерно-видовой идентификации.

В этой связи разрабатываются ГА-технологии на основе использования многолучевых эхолокаторов вертикальной локации, гидролокаторов и широкополосных эхолокаторов с расщепленным лучом. Подобные системы позволят оценить численность и структуру скоплений водных биологических объектов у поверхности. Применение высоких частот с помощью широкополосной технологии повысит пространственно-временное разрешение вплоть до 1 см и 1 с и повысит точность идентификации видов и их раздельной оценки. Расширение диапазона в сторону низких частот позволит изучать численность организмов и их коллективное поведение на расстояниях до 100 км. Предложено создание морской эко-системной акустики – МЭА. Концепция МЭА основа-

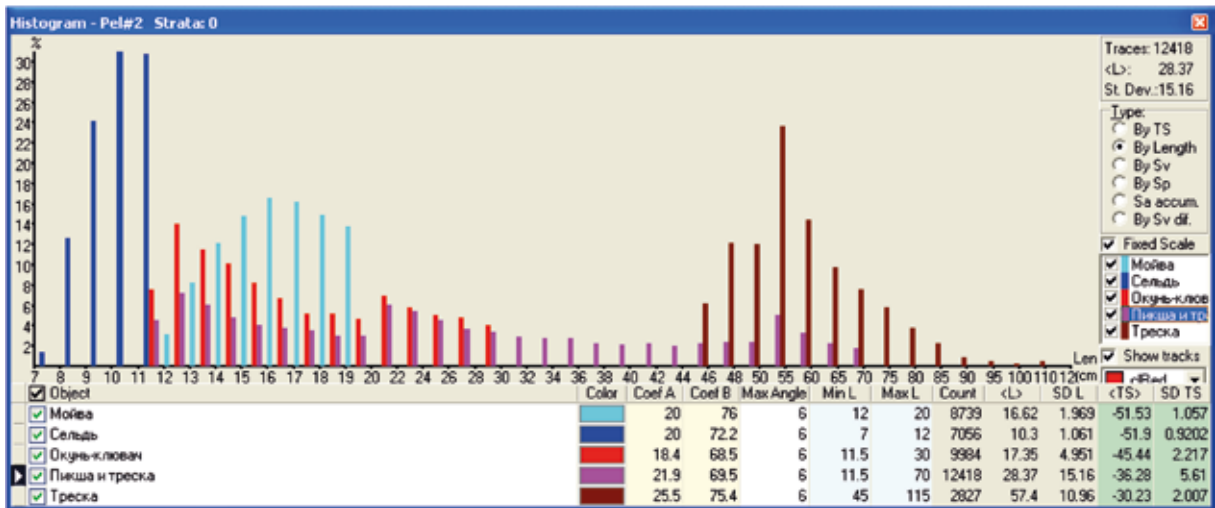
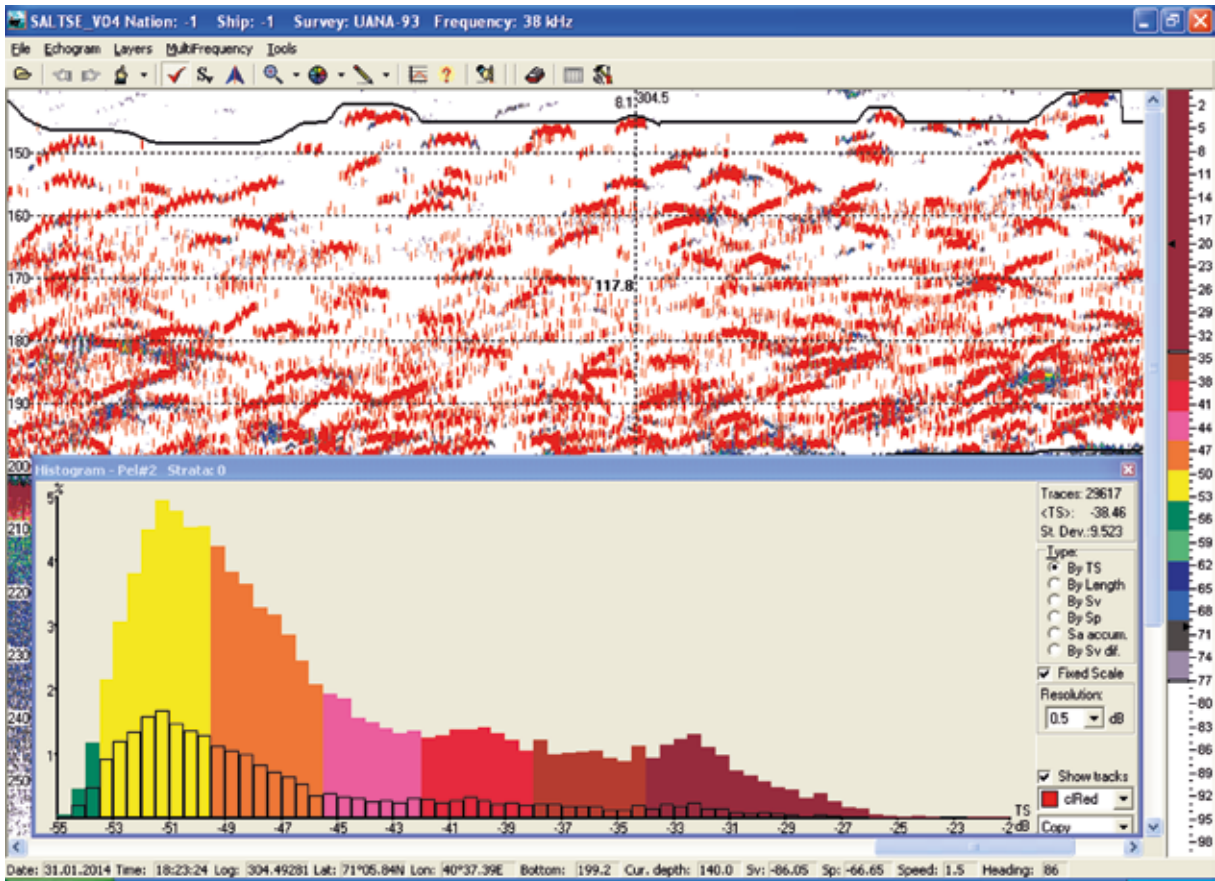
на на базовой способности акустики обнаруживать, классифицировать и количественно оценивать организмы, биологические и физические неоднородности в толще воды. Концепция МЭА объединит в себе самые современные акустические технологии, оперативные возможности и элементы моделирования, интегрированные в гибкий инструмент эко-системных исследований и мониторинга. Поток данных, производимый МЭА, обеспечит репрезентативное представление о популяционных характеристиках (идентификация, размер, количество, биомасса, поведение) основных компонентов морских экосистем.

В ПИНРО и ТИНРО-Центре многовидовые тралово-акустические съемки (МВТАС) для оценки запасов рыб ГА-методом проводятся при помощи норвежских научных эхолотов Simrad EK60 на частотах 38 и 120 кГц с подкильной антенной с расщепленным лучом и программ пост-обработки акустических данных: норвежской, Simrad BI60 и российской Famas [Nikolayev and Ubarchuk]; размерно-видовая идентификация эхограмм осуществляется методом траловых проб. Разработаны ГА-способ определения размерных составов рыб в многовидовых скоплениях [Ермольчев, 2005], Программа пост-обработки SALTSE (Area Scattering Coefficient, Length and Target Strength Estimation), с реализованным в ней ГА-способом, который основан на формировании гистограмм распределения длины l рыб в стандартных l -интервалах в линейном масштабе (в см) путем рассортировки измеряемых эхолотом сил цели TS (в дБ) по TS-интервалам, соответствующим стандартным l -интервалам, одновременно для всех видов рыб в скоплении в соответствии с TS- l зависимостями для каждого вида. Программа пост-обработки SALTSE обрабатывает собираемые эхолотом Simrad EK60 эхограммы скоплений морских организмов (RAW-файлы), определяет коэффициенты рассеяния s_A звука скоплениями рыб и других организмов в выбранных слоях по глубине, определяет одиночные цели, отображает их на эхограмме и выводит гистограмму распределения силы цели TS (TS-распределение) в выбранном слое в стандартных TS-интервалах (в дБ) и гистограммы распределения длины l рыб (l -распределения) в стандартных l -интервалах (в см), пересчитанные из TS-распределения одновременно для нескольких видов рыб в соответствии с TS- l зависимостями для каждого вида и ограничениями по длине. При помощи ГА-способа определения размерных составов рыб в скоплениях и программы пост-обработки определены силы цели TS и TS- l зависимости для основных видов промысловых рыб в Северных морях [Ермольчев, 2013].

На рисунках 13.28–13.30 представлены примеры определения ГА-способом и программой SALTSE коэффициентов рассеяния s_A , TS-распределений, \overline{TS} одиночных рыб, l -распределений, l рыб и TS- l зависимостей рыб в многовидовых скоплениях в Баренцевом, Охотском и Каспийском морях.

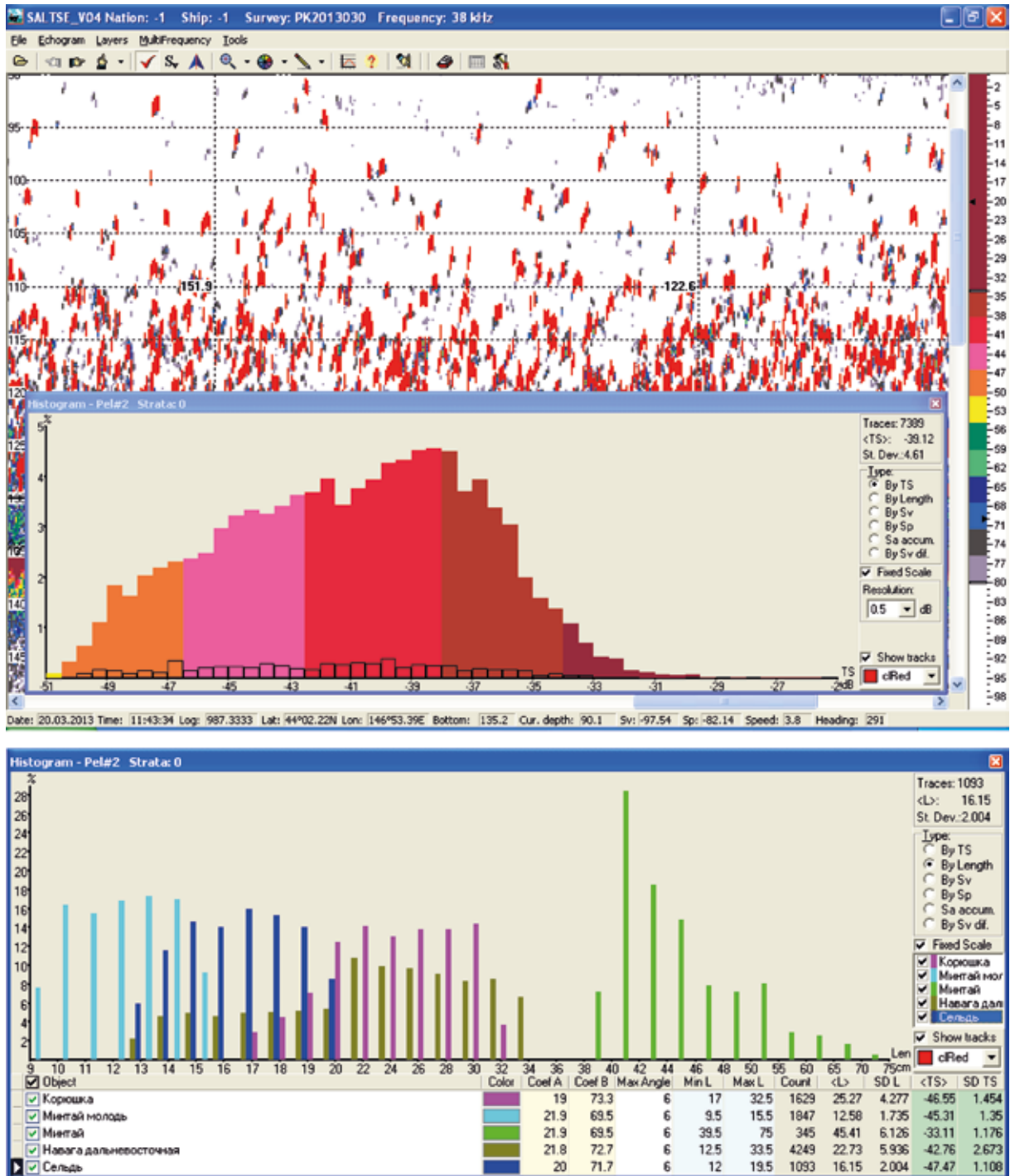
Разработанные и применяемые ГА-способ и программа SALTSE могут стать одними из элементов морской экосистемной акустики – МЭА, создание которой предлагается в [Godo et al., 2014].

В работе Ермольчева, и Убарчука [2015] приводятся результаты использования что в т ГА-методом проводятся при помощи норвежских научных эхолотов Simrad EK60 на частотах 38 и 120 кГц с подкильной антенной с расщепленным лучом и программ пост-обработки акустических данных: норвежской Simrad BI60 и российской Famas [Nikolayev and Ubarchuk, 2013]; размерно-видовая идентификация эхограмм осуществляется методом траловых проб. Разработаны ГА-способ определения размерных составов рыб в многовидовых скоплениях [Ермольчев, 2004] и новая программа пост-обработки SALTSE (Area Scattering Coefficient, Length and Target Strength Estimation), с реализованным в ней ГА-способом, который основан на формировании гистограмм распределения длины L рыб в стандартных L -интервалах в линейном масштабе (в см) путем рассортировки измеряемых эхолотом сил цели TS (в дБ) по TS-интервалам, соответствующим стандартным L -интервалам, одновременно для всех видов рыб в скоплении в соответствии с TS- L зависимостями для каждого вида. Программа пост-обработки SALTSE обрабатывает собираемые эхолотом Simrad EK60 эхограммы скоплений мор-



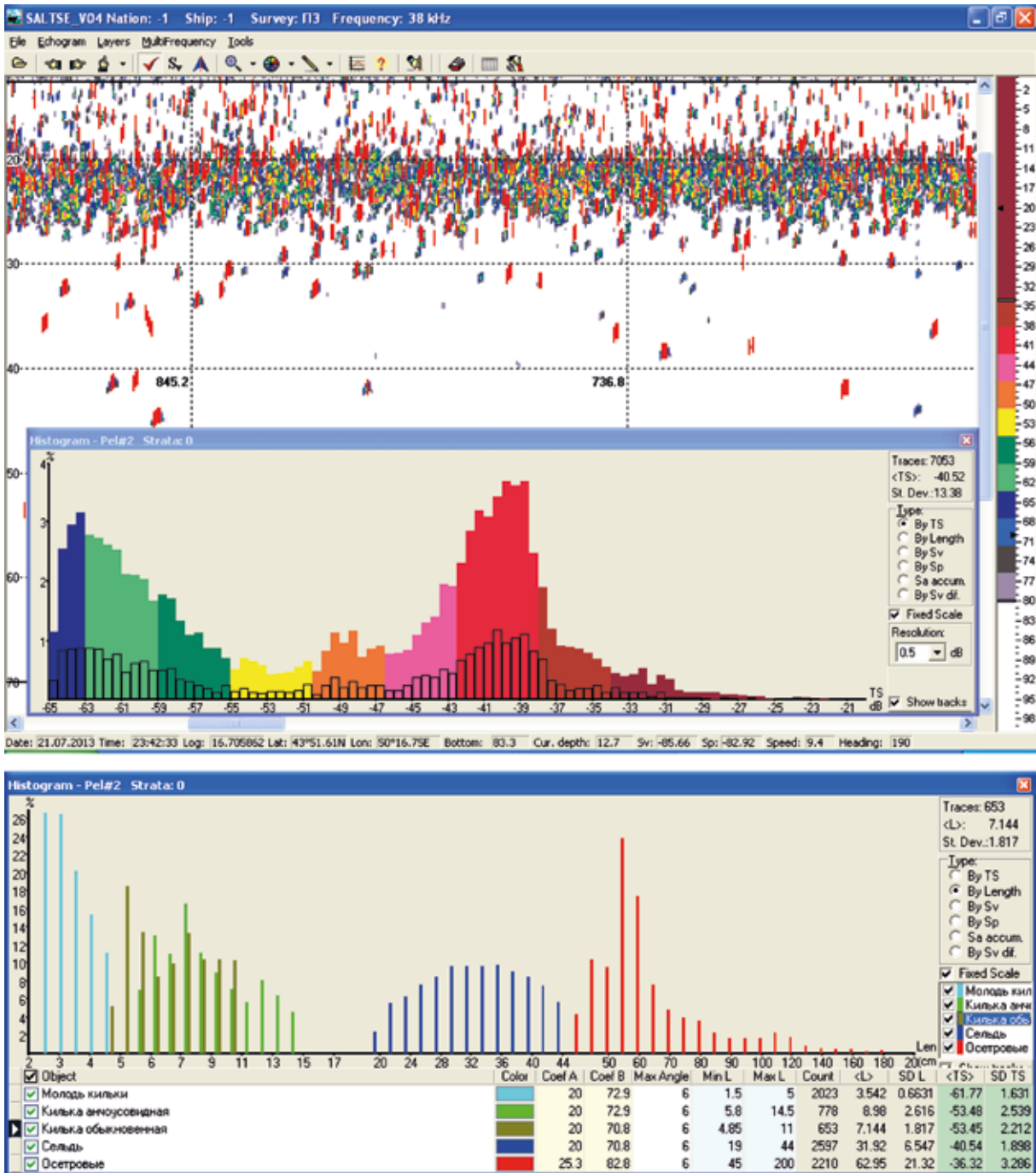
НИС «Фридьоф Нансен», Баренцево море, рейс 93, Трал 11, 02.2014; улов: мойва, $C_i=48$ экз, $l=12-18$ см, $\bar{l}=16,7$ см; сельдь, $C_i=70$ экз, $l=12$ см, $l=10,3$ см; окунь-клювач, $C_i=60$ экз, $l=12-27$ см, $\bar{l}=19,1$ см; пикша и треска, $C_i=276$ экз, $l=12-66$ см, $l=30,2$ см; треска, $C_i=109$ экз, $l=45-103$ см, $\bar{l}=57,8$ см

Рис. 13.28. Виды и размеры рыб в улове и результаты определения коэффициентов рассеяния s_A , TS -распределений, TS одиночных рыб, L -распределений и \bar{L} рыб пяти видов рыб в пяти-видовом скоплении ГА-способом и программой SALTSE.



НИС «Профессор Кагановский», Охотское море, Трал 1, 03.2013 г. Улов: корюшка зуб., $C_i=248$ экз, $l=18-31$; $\bar{l}=25,2$ см, минтай-молодь, $C_i=13$ экз, $l=11-14$ см, $\bar{l}=12,0$; минтай, $C_i=19$ экз, $l=40-69$, $\bar{l}=52,8$ см; навага, $C_i=750$ экз, $l=14-33$, $\bar{l}=20,4$ см; сельдь, $C_i=386$ экз, $l=13-19$ см, $\bar{l}=15,7$ см

Рис. 13. 29. Виды и размеры рыб в улове и результаты определения коэффициентов рассеяния s_A , TS -распределений, TS одиночных рыб, L -распределений и \bar{L} рыб пяти видов рыб в пяти-видовом скоплении ГА-способом и программой SALTSE.



НИС «Исследователь Каспия», Каспийское море, 07.2013 г. Улов: килка-молсморь, $l = 4-5$ см, $\bar{l} = 4,5$ см; килька анчоусовидная, $l = 10-15$, $\bar{l} = 12$ см; килька обыкновенная, $l = 7-12,5$ см, $\bar{l} = 8,3$ см; сельдь, $l = 25-40$ см, $\bar{l} = 37$; осетровые, $l = 55-111$ см; $\bar{l} = 73,7$ см

Рис. 13.30. Виды и размеры рыб в улове и результаты определения коэффициентов рассеяния σ_A , TS -распределений, TS одиночных рыб, L -распределений и \bar{L} рыб пяти видов рыб в пяти-видовом скоплении ГА-способом и программой SALTSE.

ских организмов (RAW-файлы), определяет коэффициенты рассеяния σ_A звука скоплениями рыб и других организмов в выбранных слоях по глубине, определяет одиночные цели, отображает их на эхограмме и выводит гистограмму распределения силы цели TS (TS-распределение) в выбранном слое в стандартных TS-интервалах (в дБ) и гистограммы распределения длины L рыб (L -распределения) в стандартных l -интервалах (в см), пересчитанные из TS-распределения одновременно для нескольких видов рыб в соответствии с TS- l -зависимостями для каждого вида и ограничениями по длине. При помощи ГА-способа определения размерных составов рыб в скоплениях и программы пост-обработки SALTSE определены силы цели TS и TS- l -зависимости для основных видов промысловых рыб в Северных морях [Ермольчев, 2013].

Большой объем натуральных морских исследований по многочастотной гидроакустической видовой идентификации рыб был выполнен в рамках проекта SIMFAMI. Целью проекта SIMFAMI были:

- разработка способов различения совокупностей эхотрасс, формируемых при вертикальной эхолокации важных пелагических косячных видов рыб, используя дискретную многочастотную акустику;
- анализ параметров классификации комбинаций эхотрасс европейских пелагических рыб;
- разработка многочастотных алгоритмов, позволяющих выполнять идентификацию видов акустическими методами в форме, которая непосредственно совместима с существующими съемками и методами анализа, используемыми в настоящее время;
- разработка комбинированных алгоритмов для идентификации видов рыб, рассматриваемых в этом проекте. Виды рыб, рассматриваемых в проекте, были: анчоус, сельдь, ставрида, скумбрия, сардина и норвежский поут. Кроме того, рассматривались и планктонообразные.

При акустической категоризации биологических объектов также использовались обобщенные характеристики обратного акустического рассеяния гидробионтов (рис. 13.31).

На рис. 13.32 представлены приведенные в проекте СИФАМИ характеристики частотных откликов $r(f)$, S_v и TS ряда стайных пелагических рыб и некоторых других водных биологических объектов.

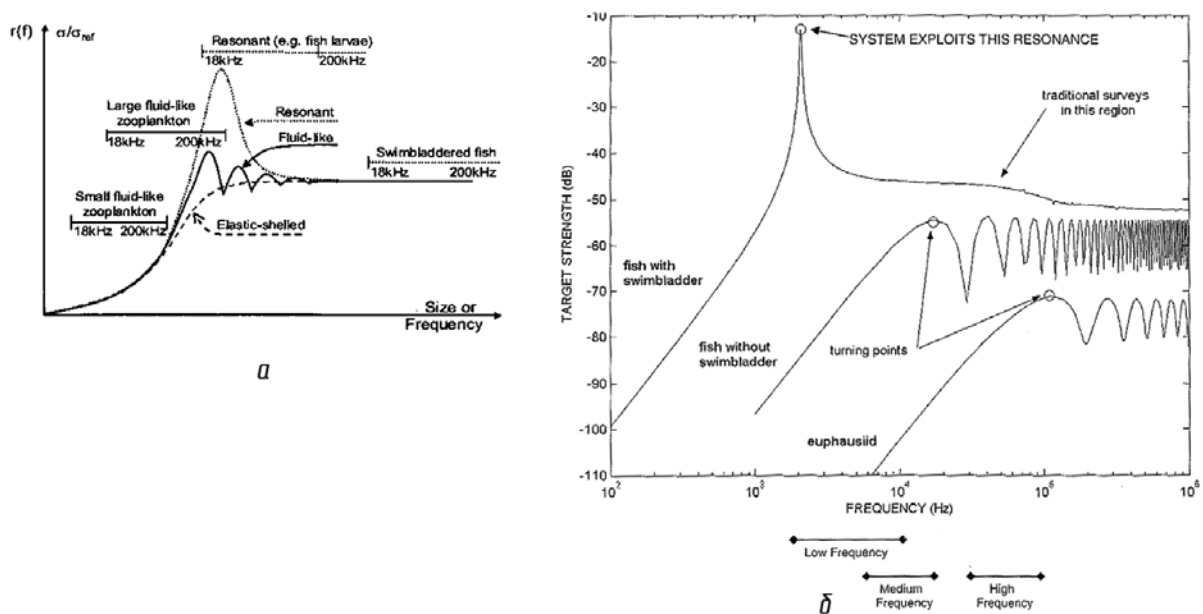
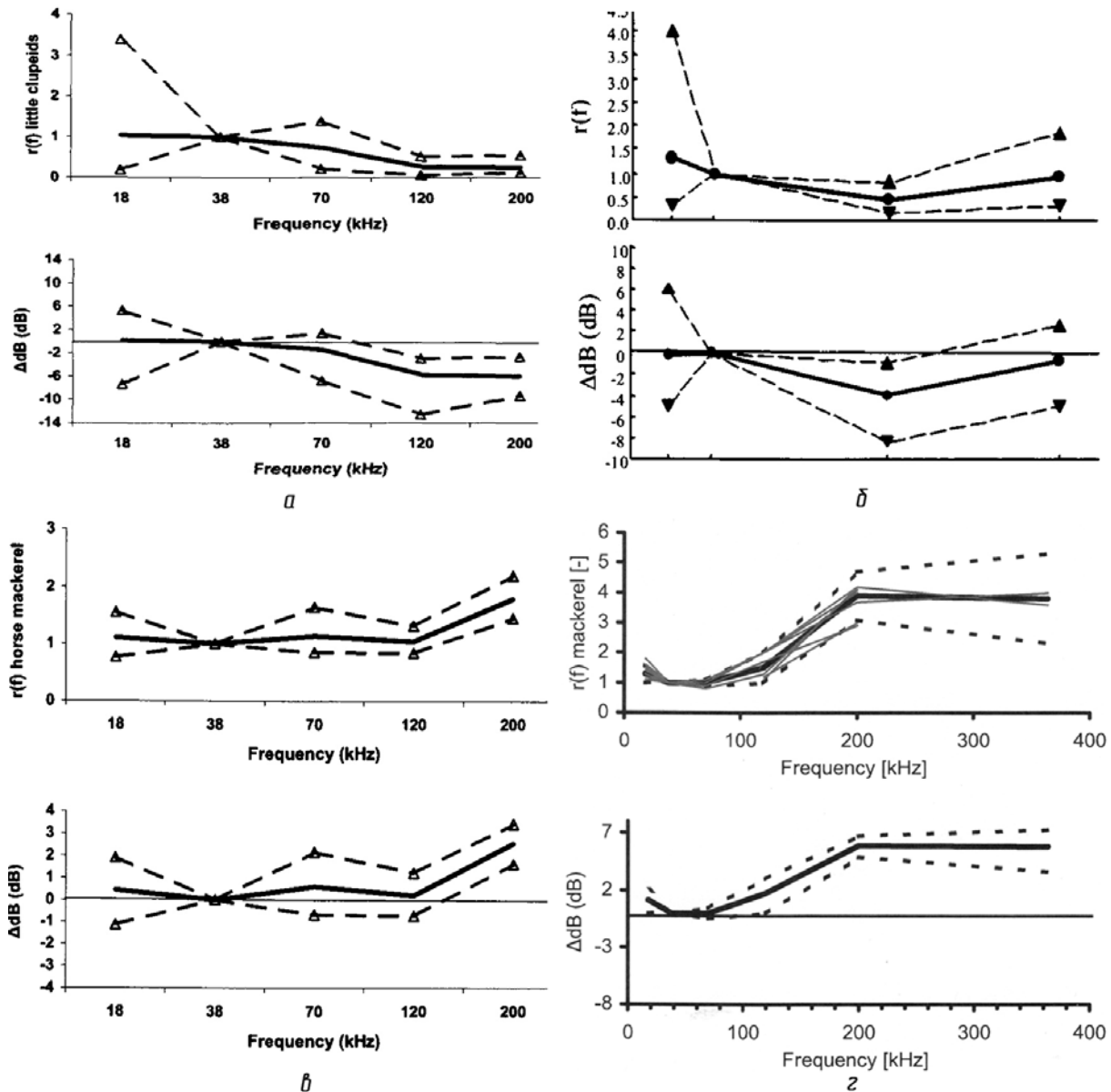


Рис. 13.31. Примеры обобщенных характеристик обратного акустического рассеяния гидробионтов



Был разработан ряд алгоритмов, в т. ч. комбинированных, позволяющих повысить качество и эффективность акустической видовой категоризации, получены некоторые положительные результаты по акустической видовой категоризации некоторых видов рыб без плавательных пузырей, планктона и др.

По результатам проведенных исследований в работе [Korneliussen et al., 2008] выполнен анализ влияния различных факторов на качество получаемых эхолокационных данных многочастотных систем и представлены предложения по обеспечению возможно меньшего воздействия на получаемые показания. Хотя полная непосредственная сравнимость эхолокационных данных — показаний на различных излучающих зондирующих частотах во всех аспектах невозможна, предлагаемые предложения направлены на обеспечение получения возможно более сравнимых комбинаций эхосигналов от различных частот с высокой пространственной и временной разрешающей способностью. Акустические данные от нескольких излучаемых частот авторами полагаются в этом контексте как «идеальные», если они могут использоваться для получения комбинированных частотных данных при одной и той же разрешающей способности, как на любой из отдельных эхолокационных частот. Термин «комбинированные частотные

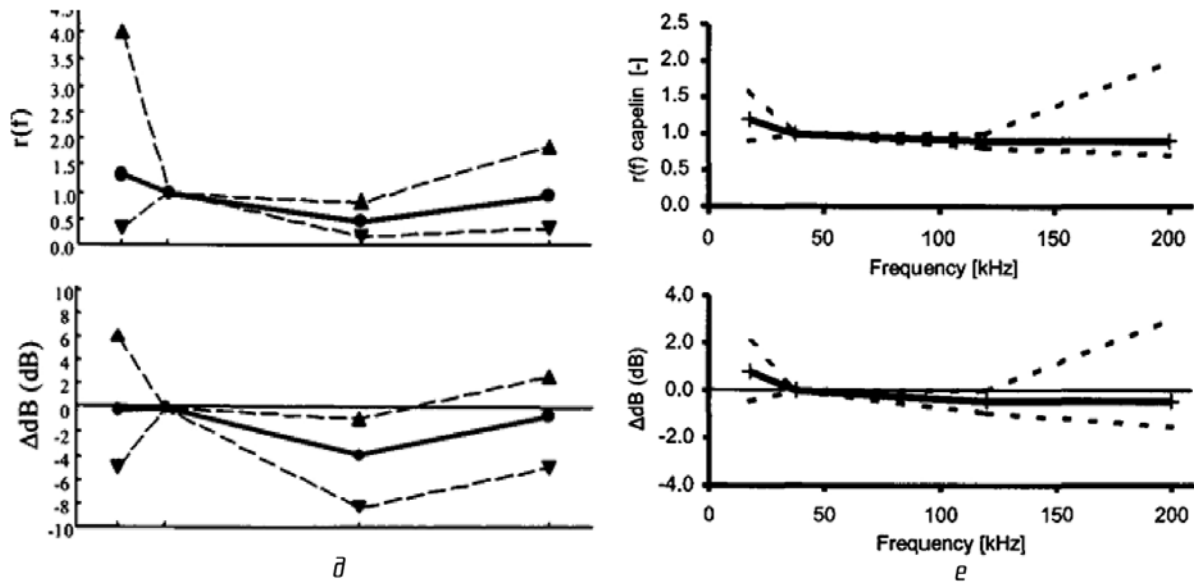


Рис. 13.32. Графики $r(f)$ и некоторые акустические характеристики ряда массовых промысловых рыб и планктонообразных:

a – анчоус (Северо-Восточная Атлантика), S_v (дБ отн. 1 м^{-1}) (типичный, максимальный, минимальный) – $-48,27$ – $-42,86$, $-53,5$ дБ и $TS=20 \log L - 71,2$; *b* – сельдь Северного моря; S_v (средний, минимальный, максимальный) – -45 , -56 , -31 дБ, горизонтальная шкала – 18, 38, 120 и 200 кГц; *в* – ставрида (северо-восточный шельф Атлантики от Норвегии до Северной Африки), S_v (типичный, максимальный, минимальный): $-49,08$, $-42,70$, $-54,25$ дБ и $TS=20 \log L - 68,7$; *г* – атлантическая скумбрия, $TS=20 \log L - 86,0$; *д* – сардина (Атлантика, Северная Испания); S_v (типичный, максимальный, минимальный): -45 , -28 , -63 дБ и $TS=20 \log L - 72,6$, горизонтальная шкала – 18, 38, 120 и 200 кГц; *e* – мойва (Северо-Восточная Атлантика), S_v (дБ отн. 1 м^{-1}) (типичный, максимальный, минимальный): -66 , -58 , -58 дБ и $TS=20 \log L - 72,0$ [SIFAMI final report, 2008]

данные» авторы относят к новым «искусственным данным, получаемым от нескольких одночастотных эхолокационных приборов». Это требует сравнимых, совместимых физических измерений, получаемых одновременно от различных объемов выборки, ограниченных лишь дальностями действия на наиболее высоких частотах.

Желательно поддерживать пространственную разрешающую возможность акустических данных возможно более высокой, чтобы разделять рассеивающие объекты, однако также целесообразно уменьшать акустическую вариабельность для достижения более точной категоризации акустических возвратов. Эти два требования являются достаточно противоречивыми, т. к. усреднение, используемое для снижения вариабельности, также приводит к сокращению пространственной разрешающей способности. Акустическое рассеяние имеет стохастический характер, поэтому имеется необходимость в усреднении многих акустических измерений. Некоторые естественные стохастические вариации могут быть уменьшены при применении аппаратуры вертикальной локации, позволяющей иметь высокую частоту повторения излучаемых импульсов и быстрые выборки эха за счет усреднения выборок от одного и того же небольшого элементарного объема, однако могут иметь место некоторые стохастические вариации, обусловленные характеристиками направленности при излучении, наклоном и распределением рассеивателей в измеряемом объеме. Так как часто не ясно, какое усреднение необходимо для удаления стохастической вариации в таких измерениях, то авторы считают, что целесообразно, по меньшей мере, при исходных измерениях, собирать комбинированные акустические эхолокационные данные при максимально возможной разрешающей возможности.

Указанными авторами анализируются и обосновываются следующие предложения по обеспечению физической сравнимости получаемых данных:

1. Измерения акустического рассеяния на одной частоте от рыбы или планктона должны быть сравнимы между аппаратурой, изготовленной любыми производителями, при условии, что они также пространственно сравнимы. Физические измерения отно-

сятся к выходам эхолокаторов вертикального действия, таким, как s_v , s_A , сила цели (TS) и им подобные, и, соответственно, к тем, которые применяются, чтобы рассчитать их, например, напряжение эхосигнала, затухание и скорость звука. Затухание и скорость звука являются компонентами зависящего от расстояния усиления, используемого для расчета s_v , s_A , и TS.

2. Эхолокационная система должна работать так, чтобы были применимы линейные уравнения, что типично реализуется в рыбохозяйственной гидроакустике с помощью ВАРУ. Хотя нелинейные эффекты при распространении акустических колебаний в водной среде всегда присутствуют, они большей частью намного меньше по сравнению с линейным звуком, особенно когда выходная мощность акустической антенны снижается. Нелинейные эффекты в толще воды и их величина зависят от интенсивности звука и частоты [Tichy et al., 2003], и ими определяется достижение незначительного влияния нелинейных эффектов по сравнению с уровнем линейного распространения линейных акустических колебаний. Авторы приводят пример с 38-килогерцовой акустической антенной Simrad ES38D, для которой в указанном аспекте приемлема выходная мощность 15 кВт на квадратный метр или менее. При 60%-ной эффективности (к. п. д.) гидроакустической антенны это дает 25 кВт на квадратный метр входной мощности или менее, которая имеет место при установке максимальной мощности генератора эхолокационной системы 2500 Вт. Максимальная мощность генератора для других антенн фирмы Симрад приведена в табл. 13.10. Чем выше рабочая частота, тем ниже должна быть электрическая мощность, подаваемая на антенну, для того, чтобы избежать появления нелинейных эффектов.

Таблица 13.10. Максимальная мощность генератора для антенн

Параметр	Максимальная входная мощность для антенн различных частот, кГц							
	18	38	70	70	120	200	333	400
Примерная площадь активной поверхности антенны, 10^{-3} м^2	200	100	30	12	10	4,4	1,6	1,1
Примерная ширина характеристики направленности на уровне 3 дБ, град.	11	7	7	11	7	7	7	7
Рекомендуемый максимум входной мощности для 60%-ного к.п.д., Вт	5000	2500	750	300	250	110	40	28

В примерах, приведенных в табл. 13.10, для большинства гидроакустических антенн реализуется амплитудное распределение подаваемых импульсов излучения для снижения уровня боковых лепестков, когда на их внешние элементы подается меньшая мощность, чем на центральные. Использование слишком большого уровня электрической мощности для излучения звука приводит к существенной генерации акустических колебаний на более высоких частотах вследствие нелинейных эффектов. В результате, кроме потерь, это приводит к снижению уровня излучения на основной частоте. Для снижения дополнительных потерь (связанных с нелинейными эффектами), кроме обусловленных затуханием звука и геометрическим расширением фронта акустических колебаний, некоторые из указанных потерь могут быть скомпенсированы при калибровке [Pedersen, 2006], обычно целесообразно уменьшать мощность до уровней, приведенных в табл. 13.10.

3. Все эхолокационные системы и антенны должны быть калиброваны.

В работах [Foote, 1982, 1989; Foote et al., 1987] описан общепринятый метод калибровки эхолокаторов вертикального действия. При надлежащей калибровке общая погрешность этого метода не должна быть более чем 4%, т. е. неопределенность в измерениях s_A (мильного коэффициента поверхностного рассеяния), связанная с калибровкой, составляет $\sim 4\%$. Она определяется погрешностью определения ширины эквивалентной ХН ($\Delta\Psi$, 1,6%), погрешностью ВАРУ (ΔTVG , 1,1%), погрешностью определе-

ния дистанции до цели (Δr , 2,1%) и точностью силы цели, калибровочного шара (ΔTS , 2,2%). Эти составляющие возводятся в квадрат и суммируются, что дает общую погрешность 4%: $\Delta Cal = (\Delta \Psi)^2 + (\Delta TVG)^2 + (\Delta r)^2 + (\Delta TS)^2 \sim 4\%$. [Foote et al., 1987] полагают, что реально уменьшить погрешность калибровки до $\sim 3\%$ на 38 кГц при использовании океанографических измерений в калибровочной зоне для достижения более точной оценки расстояния до цели, т. е. снижения ΔTVG и Δr .

В идеале должны бы выполняться две калибровки при каждой основной съемке, одна перед началом и вторая в конце. Нежелательно калибровать эхолотаторы вертикального действия и их гидроакустические антенны далеко от района калибровки. Следует также учитывать, что калибровка эхолотаторов в принципе должна проводиться при нахождении их антенн на той же глубине, на которой они будут находиться и во время съемки. Указанное условие большей частью выполняется при фиксированной установке антенн. В случае расположения антенн в подъемно-опускных устройствах при калибровке эхолокационной аппаратуры она должна находиться на той же глубине, что и при съемке. При расположении антенны в буксируемом устройстве, которое при конкретной съемке будет перемещаться на различных горизонтах, целесообразно выполнять калибровку на нескольких глубинах.

Должна приниматься во внимание задержка излучаемых импульсов, чтобы получить как корректную величину расстояния до калибровочного шара, так и корректную задержку начала работы ВАРУ [Fernandes and Simmonds, 1996]. Независимо от этого калибровочные шары должны быть возможно большего размера для увеличения их TS и массы, чтобы уменьшить их колебания и интерференцию от рыбы, а также для обеспечения их погружения от антенны на возможно большую глубину.

В научно-исследовательском эхолотаторе ЕК500 все диапазоны рассчитываются относительно запускающего импульса генератора в электронной схеме, т. е. глубины не корректируются с учетом общей задержки в системе ни на эхограмме (силы среднего объемного обратного рассеяния), ни в отношении данных о силе цели. Регистрируемые диапазоны среднего объемного обратного рассеяния поэтому должны корректироваться с учетом общей задержки в системе, как будет далее показано. Глубины, на которых выполняются измерения силы цели, корректировать сложнее, так как первый обнаруженный сигнал определяет глубину.

ВАРУ в ЕК500 первоначально рассчитывалась от положения («глубины») фронта импульса излучения без учета общей задержки в системе. В версии 5.30 задержка ВАРУ компенсируется с помощью стандартного программного обеспечения. В новой аппаратуре ЕК60 для каждого импульса рассчитывается «центр тяжести», поэтому начало импульса должно быть на половину длительности импульса излучения прежде «центра тяжести». ВАРУ рассчитывается для каждой выборки, прежде использования в любых расчетах. Общая задержка в системе в настоящее время не учитывается в ЕК60. Это означает, что расстояние от антенны до сегмента объема измеряемого обратного рассеяния является несколько большим (ВАРУ, используемая при этих измерениях, когда рассчитывается s_v , также (не) является не совсем корректным). Как будет указано ниже, задержка должна учитываться для коррекции дистанции, чтобы улучшить пространственное перекрытие. При коротких расстояниях s_v также должно корректироваться. Симрад указывает, что «центр тяжести» используется для расчета расстояния до отдельных целей и что общая задержка в системе не принимается во внимание.

4. Шумовые помехи в системе эхолотатора не должны быть значительными.

В общем случае под шумами понимаются все посторонние сигналы, включая акустические колебания, принимаемые при обратном рассеянии от вызываемых ветром воздушных пузырьков. Однако сложно разделить отражения от свободных воздушных пузырьков и от плавательных пузырей небольших рыб или от пузырьков, имеющих место в связи с жизнедеятельностью некоторых видов планктона. Звуки, создаваемые судами, водными животными, захлопывающимися пузырьками, ветром, или шумы моря,

также являются в этом случае помехами и являются своего рода инструментальным шумом, не связанным с излучаемыми колебаниями эхолокаторов. Когда акустические данные эхолокатора корректируются относительно шумовых помех и помехи не коррелированы с сигналами обратного рассеяния от целей, максимальный диапазон акустических данных ограничивается объемом акустической выборки [Ona, 1987; Foote 1991]. Это объем, где все интересующие цели при всех ориентациях являются акустически видимыми во всех частях объема выборки для используемых диапазонов. Он зависит от видов объектов и их плотности. В своей работе [Foote, 1991] описал статистические характеристики объема выборки.

5. Измерения не должны смещаться помехами.

Указанное условие также относится и к гидроакустической количественной оценке водных биологических ресурсов.

Правильное определение помехи необходимо прежде разработки способов ее удаления. Вообще помехами являются все нежелательные сигналы, включая излученный звук, обратно отраженный (рассеянный) от создаваемых ветром воздушных пузырьков. Однако сложно отделить свободные пузырьки от плавательных пузырей малых рыб или от пузырьков, создаваемых для поддержания плавучести некоторыми видами планктона.

Можно привести также определение помех, приведенное в работе [Korneliussen, 2000]: если желаемый эхосигнал определяется как все излученные эхолотом звуки, рассеянные обратно к поверхности антенны, тогда помехи – это все остальное. К ним относятся акустические колебания, создаваемые судами, животными, захлопывающимися пузырьками, ветром или морем.

Помехи могут быть количественно определены и исключены из измеряемого эхосигнала при использовании сбора пассивных акустических данных (при работе эхолотатора без излучения зондирующих импульсов) [Nunnallee, 1987]. Более целесообразным представляется метод, представленный в работе [Korneliussen, 2000] и реализуемый при активной работе эхолокационной аппаратуры. По результатам экспериментальных исследований с использованием ЕК500 для выделения (расчета) и удаления помех в указанной работе предлагается использование лишь информации, принимаемой в течение некоторого промежутка времени после первого донного эха и до приема второго. Данные методы не предусматривают обычного использования порога, обрезающего часть данных измерений, или применения внутреннего алгоритма для автоматического удаления помех. На рис. 13.33 показан пример эхограмм продолжительностью 1 морская миля аппаратуры ЕК500 с результатами коррекции помех при ее одновременной работе на частотах 18, 38, 120 и 200 кГц. Вверху представлены эхограммы без коррекции помех, в нижней части рис. 13.33 – после коррекции. Цифры в кружках показывают реальные значения полученных коэффициентов обратного рассеяния S_A . Из рис. 13.33 можно видеть, что эффект подавления является наибольшим на частоте 200 кГц. Вблизи дна на скорректированной в части снижения помех эхограмме могут быть видны структуры, невидимые на оригинальной эхограмме.

При отсутствии пассивных акустических данных информация, необходимая для количественной оценки помех, может быть получена при применении схемы, предложенной [Korneliussen, 2004]. Для снижения влияния пузырьковых слоев, создаваемых за счет обтекания водой корпуса судна, вместо выдвижных устройств на рыболовных судах стали применяться подъемно-опускные устройства (ПОУ), позволяющие обеспечивать большее погружение акустических антенн от корпуса [Ona and Traunor, 1990].

6. Помехи не должны сокращать объем акустических выборок.

Это требование обусловлено тем, что помехи не должны влиять на пространственную сравнимость акустических данных. ВАРУ обеспечивает компенсацию акустических измерений по глубине, и последующие расчеты основываются на площади обнаружения A на глубине r . Если помехи превышают порог обнаружения, площадь, в пределах которой могут обнаруживаться цели, будет меньше A , поэтому объем выборки со-

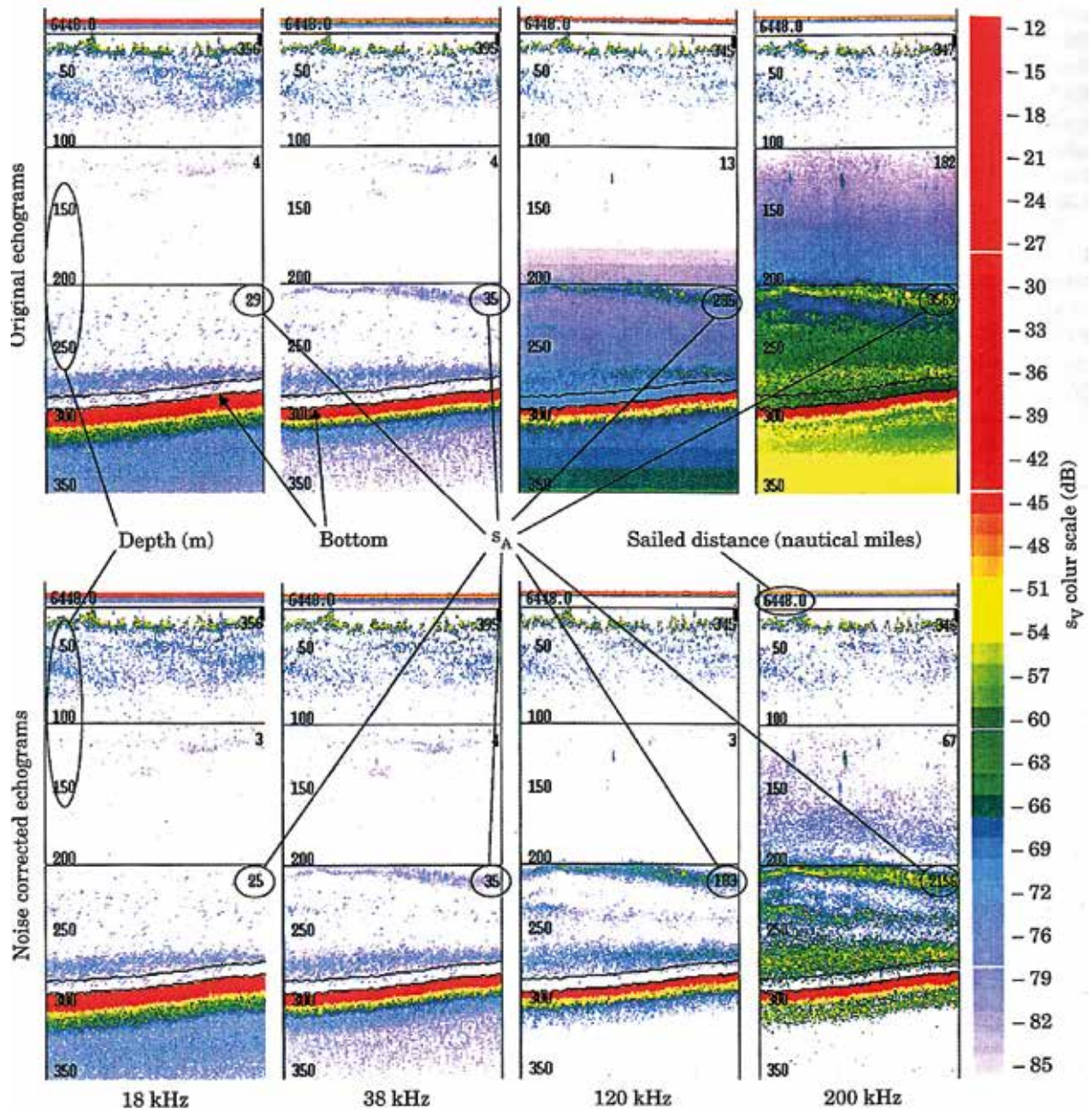


Рис. 13.33. Пример коррекции помех по методу, предложенному [Korneliussen, 2000], при работе аппаратуры EK500 на частотах 18, 38, 120 и 200 кГц. Цифры в кружках показывают значения S_A

кращается. В общем случае глубину от акустической антенны, до которой получаемые данные полагаются быть достаточно удовлетворительными, целесообразнее сократить, чем стараться скорректировать данные, собранные с уменьшенным объемом выборки (ниже будет рассмотрено). Поэтому данные, полученные после некоторой глубины r , где помехи начинают существенно ограничивать объем выборки эхосигналов от любых целей, представляющих интерес [Ona, 1987; Foote, 1991], не должны использоваться. В данном случае r – это глубина, где объем выборки V начинает сокращаться, например, где коэффициент обратного объемного рассеяния σ_v больше не пропорционален r^2 . Строго говоря, измеренные данные могут быть скорректированы, если уменьшение объема выборки между r и $(r + \Delta r)$ известно. Следует, однако, иметь в виду, что глубина r , где объем выборки V начинает уменьшаться, зависит от силы цели TS. Поэтому, если в некотором измеряемом объеме имеются различные виды объектов, разные размеры каждого из видов или смесь видов и размеров, то для каждого из этих факторов необ-

ходима своя коррекция. Определенный компромисс состоит в использовании некоторой общей дистанции r для всех типов целей. В редких случаях может быть возможно оценить функции коррекции уменьшения акустического объема выборки для каждой частоты. Авторы указывают, что это было реальным для ситуации сбора акустических данных при наличии лишь одного представляющего интерес объекта одинаковых размеров, например, при съемках норвежской нерестящейся весной сельди в Ofotfjord во время большинства зим в период 1988 и 2006 гг.

7. Интерференция между частотами должна быть незначительной.

Если эхолокационная система, а именно, ее электроника, акустические антенны, соединительные кабели при работе на любой одной частоте каким-либо способом взаимодействуют с подобной аппаратурой, работающей на другой частоте, сигналы и помехи могут быть коррелированы, т. ч. известные алгоритмы для снижения помех не могут быть применены. Наличие взаимодействия может быть проверено, но в конечном итоге, соответствующие решения должны выполняться изготовителем аппаратуры, например, путем надлежащего выбора рабочих частот, ширины полос пропускания, электрических мощностей, подаваемых на антенны. Узкая полоса пропускания в системе будет способствовать уменьшению акустического взаимодействия, но будет усугублять другие проблемы, связанные с огибающей импульса и общей задержкой в аппаратуре. Проведенные к настоящему времени измерения показывают, что взаимодействие между эхолокационными системами не являются очень большой проблемой, по меньшей мере, при измерениях обратного рассеяния. Однако цели с большой отражательной способностью могут быть обнаруживаемы на некоторых частотах, к примеру, на частоте 18 кГц в эхолокаторе, работающем в пассивном режиме, если имеется некоторая аппаратура, функционирующая в активном режиме на близкой частоте, например, 38 кГц. Следует также отметить, что при умеренных и сильных нелинейных эффектах при работе на некоторой частоте f_0 могут проявляться гармоники, которые будут интерферировать с системами, работающими на частотах $2f_0$ и $3f_0$.

В связи с этим рабочие частоты эхолокационной аппаратуры должны выбираться достаточно отличающимися для исключения взаимной интерференции, особенно являющимися гармониками (например, 200 и 400 кГц). Авторы указывают, что когда акустические антенны на 200 и 400 кГц применялись вместе на НИС «G. O. Sars», вторая гармоника частоты 200 кГц даже с уровнями входной мощности, рекомендованными в табл. 13.10, создавала такие сильные акустические колебания, что 400-килогерцный эхолокатор не мог использоваться. В настоящее время он заменен на систему с рабочей частотой 333 кГц. Частот с нечетными множителями (3, 5, 7...) также следует избегать. Авторами приводится рекомендуемая последовательность частот для многочастотного применения (в кГц), к примеру, часть из них – 18, 38, 70, 120, 200, 333, 555, 926, 1543, 2572...

8. Предложения по обеспечению пространственной совместимости данных.

Используя упрощенное представление ХН эхолокатора вертикального действия в виде некоторого конуса авторы рассматривают вопрос зависимости перекрытия двух систем с одинаковыми характеристиками шириной θ от расстояния (глубины) от антенны и расстояния между центрами антенн.

Рис. 13.34 служит для иллюстрации возможных ситуаций такого перекрытия зон озвучивания и акустических выборок в горизонтальной и вертикальной плоскостях

Частичное перекрытие или в лучшем случае смещение по горизонтали является обычной ситуацией. Влияние горизонтального перекрытия уменьшается с увеличением глубины, тогда как смещение по вертикали остается. Снижение разрешающей способности по вертикали может уменьшать проблему вертикального смещения.

На дистанции r от антенны коэффициент горизонтального перекрытия O_r двух характеристик направленности шириной θ будет равен:

$$O_r = (2a/\pi) - [a \sin(\alpha)/r\pi \tan(\theta/2)],$$

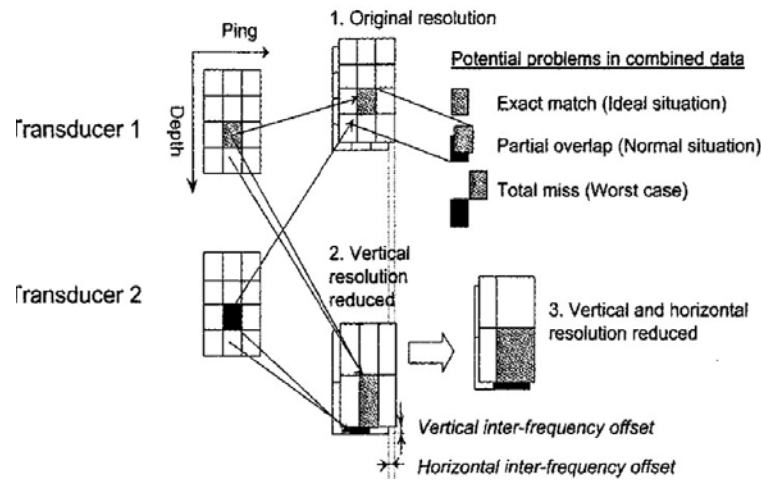


Рис. 13.34. Схематическая диаграмма, поясняющая проблему получения комбинированных эхограмм высокого разрешения при использовании двух эхолокационных систем с установленными недалеко друг от друга акустическими антеннами (1 и 2)

где $\alpha = \cos^{-1}(d/(2r \tan(\theta/2))$; d – расстояние между центрами антенн, м; θ – ширина ХН на уровне 3 дБ, рад; r – дистанция от излучающей поверхности антенн, м.

На рис. 13.35 показаны зависимости O_v от r для ХН одинаковой ширины 7° (на уровне 3 дБ). При разной их ширине ситуация более сложная. Показатель перекрытия по вертикали O_v для импульсов равной длительности и формы между данными, полученными на разных частотах эхолокаторами с одинаковой шириной ХН, определяется как:

$$O_v \equiv [1 - \text{abs}(\Delta\nu_1 - \Delta\nu_2)/\Delta z],$$

где $\Delta\nu_1$ и $\Delta\nu_2$ – смещения по вертикали, обусловленные общими задержками в аппаратуре; Δz – разрешающая способность по вертикали.

O_v увеличивается, если разность $(\Delta\nu_1 - \Delta\nu_2)$ уменьшается, или если разрешающая способность по вертикали уменьшается вследствие увеличения Δz . O_v может быть повышен, если данные собираются при достаточно высокой разрешающей способности и при условии, что ширина ХН на уровне 3 дБ является одинаковой. Огибающие излучаемых импульсов отличаются от идеальных прямоугольной формы, особенно при узкой ширине полосы пропускания и более широких ХН, на более низких частотах, например, на несущей частоте 18 кГц. Это приводит к большей неопределенности смещения данных по вертикали. Корреляция вертикально смещенных данных на 18 кГц относительно любой другой частоты не позволяет получить существенного улучшения для полученных выборок акустических данных.

Показатель пространственного перекрытия O_{II} между характеристиками направленности на различных частотах определяется как:

$$O_{\text{II}} \equiv O_r O_v.$$

Не имеется строгих требований относительно перекрытия, требуемого для получения комбинированных «частотных» эхограмм, однако авторы полагают, что

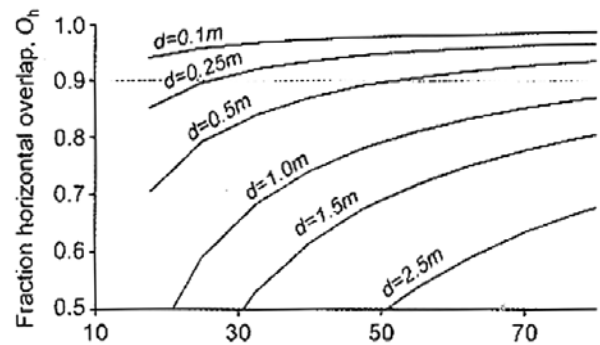


Рис. 13.35. Зависимость показателя O_v (вертикальная ось) двух ХН от глубины r (горизонтальная ось) под антеннами для нескольких расстояний d между центрами двух акустических антенн.

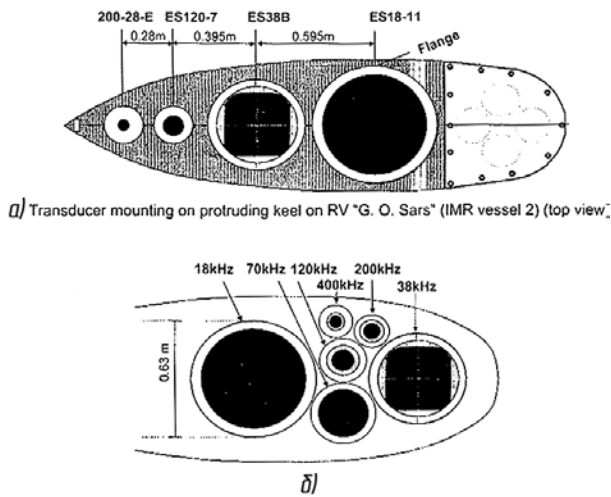


Рис. 13.36. Размещение гидроакустических антенн в ПОУ на прежнем (а) и новом (б) НИС «G. O. Sars»

шим НИС и O_n , равное 0,85, рассчитанное по формулам для O_r и O_n , достигается уже на меньших глубинах (расстояниях) от антенн, порядка 13–34 м в зависимости от используемых пар антенн (от сравниваемых характеристик направленности).

Дальнейшее рассмотрение неидеальных ситуаций, где данные не перекрываются или из-за расположения антенн, или в связи с различной шириной характеристик направленности, рассматриваются авторами ниже.

9. Длительности импульсов и их огибающие должны быть идентичными на всех частотах.

Номинальные длины импульсов будут равными, когда длительности излучаемых импульсов одинаковы при всех рабочих частотах, — это необходимое требование. Для выполнения требования одинаковых форм импульсов необходимо равенство ширины полос пропускания, что более сложно обеспечить.

Длительность импульса 1 мс достаточна для обеспечения стабильной полосы пропускания в 18-килогерцевых эхолокаторах. Такая длительность, следовательно, должна использоваться при всех рабочих частотах; более короткие импульсы могут использоваться, если рабочая частота 18 кГц не применяется. В новом научно-исследовательском эхолокаторе вертикального действия ЕК60 имеется возможность использовать длительность импульса 1 мс на всех частотах. Применение широкой полосы пропускания, 10% от центральной частоты, в работе рекомендуется для ЕК500 при частотах 70 кГц и ниже, а узкой, 1% от центральной частоты, для 120 кГц и выше. Ширина полосы пропускания в ЕК60 рассчитывается системой. Когда используются 1мс-ные импульсы с тональным заполнением, при 18 кГц ширина полосы пропускания равна 1,6 кГц, при 38 кГц- 2,4кГц, при 70 кГц-2,9 кГц, при 120 и 200 кГц — 3,0 кГц, при 364 кГц — 3,1 кГц.

10. Индивидуальные циклы лоцирования в аппаратуре должны быть идентифицируемыми в любое время.

Выполнение этого требования позволяет обеспечить, чтобы одновременные циклы лоцирования на различных частотах могли быть идентифицированы и сравнены. Недостаточно лишь иметь возможность подсчета циклов в файле данных, т. к. некоторые могут быть «случайно» утеряны или частота повторения циклов может отличаться при одновременной работе аппаратуры. Для этого должно регистрироваться время, когда производится излучение импульса, и оно должно сохраняться с достаточным высоким разрешением, чтобы избежать двух циклов излучения на одной и той же частоте, регистрируемых в одно и то же время. Разрешающая способность по времени 0,01 с является достаточной для этого; разрешающая способность 1,0 с уже недостаточна.

$O_n \geq 0,85$ представляется приемлемым. Для 38 и 120-килогерцевых акустических антенн на НИС «G. O. Sars», как показано на рис. 13.36 а, где центры антенн находятся на расстоянии 39,5 см, O_n 0,85 достигается на глубине от антенн 28 м. Для 38 и 200-килогерцевых антенн, установленных на дистанции друг от друга 67,5 см, $O_n = 0,85$ см будет на глубине 47 м. Для методов, использующих деление или умножение данных на двух частотах, $O_n = 0,85$ приводит к неопределенности в результатах $\sim 15\%$. O_n никогда не может быть выше O_r . Расположение антенн на более новом НИС «G. O. Sars» (рис 13.36 б) специально выбиралось для улучшения пространственного перекрытия их характеристик направленности по сравнению с предыду-

11. Акустические объемы выборок должны быть подобными на всех частотах для сравнимости расстояний до рассеивателей.

Интересующие цели должны быть акустически видимыми во всех частях объема выборки для используемых диапазонов [Foote, 1991]. Это требуется для того, чтобы достигнуть максимального перекрытия между характеристиками направленности. При условии, что помехи незначительны, это подразумевает подобные половины ширины ХН антенн, которые должны быть установлены на одинаковой глубине (от поверхности воды) и с одинаковой ориентацией акустических осей. Антенны наименьшего размера должны устанавливаться в середине для уменьшения средней дистанции между ними. Стандартизация ширины характеристик направленности на уровне 3 дБ к-7° представляется разумным компромиссом между дальностью действия эхолотаторов и шириной характеристик для перекрытия больших объемов. Для промышленных низкочастотных антенн, к примеру, 18 кГц, формируемые ХН шириной 11° могут быть наименьшими из достижимых и, следовательно, ближайшими к 7°. Положение излучающих поверхностей всех антенн должно быть отрегулировано таким образом, чтобы иметь одну и ту же ориентацию их акустических осей, возможно более близкую к вертикали. Расстояния между антеннами по горизонтали будут результироваться в появление погрешностей, которые будут рассматриваться далее. Влияние смещения по горизонтали уменьшается с увеличением глубины от антенн (что повышает O_b), что обусловлено конической формой ХН.

12. Излучение импульсов локации должно выполняться одновременно на всех частотах.

Чтобы объемы выборок были возможно более подобными, импульсы отдельных эхолотаторов (частот) должны излучаться точно в одно и то же время и должны быть введены соответствующие задержки в аппаратуре для обеспечения максимального перекрытия по вертикали. При одинаковой ширине полосы пропускания в системах не будет разностей в общих задержках, как было ранее указано. Однако на практике эхолотаторы на разных частотах будут иметь разную ширину полос пропускания и, следовательно, также различные общие задержки, которые должны компенсироваться тем или иным способом. Если выборки данных собраны с достаточно высокой разрешающей способностью по вертикали и вертикальный сдвиг известен, выборки могут быть просто сдвинуты по вертикали. Если данные не собраны с достаточно высоким разрешением, некоторую помощь может оказать их «сглаживание».

Должна обеспечиваться синхронная работа аппаратуры на разных частотах. В работе приводятся соответствующие рекомендации для ситуации с эхолотаторами ЕК500, каждый из которых может работать максимально на трех частотах. В аппаратуре ЕК60, которая может работать одновременно на семи частотах (с семью антеннами), предусмотрена возможность синхронного излучения зондирующих импульсов.

13. Должны вводиться системные задержки.

Расчет задержек относительно (от) импульса запуска эхолотатора не представляет особой сложности при условии, что характеристики электронных компонентов аппаратуры известны. В то же время не рекомендуется компенсировать общую задержку системы до того, как теоретические задержки не подтверждены измерениями.

Задержки измерялись [Она и др., 1996] со стандартной версией программного обеспечения Симрад ЕК500. Измерения и расчеты были совместимы и показали, что общие задержки системы (в сек) при рабочей частоте f (Гц), когда применялись не композитные антенны, составляли: общая задержка в системе при широкой полосе пропускания (10% от рабочей частоты) была $14,8/f$ (сек), при узкой (1% от центральной частоты) – $44,6/f$ (сек).

Термин «композитный акустический преобразователь» относится к способу его разработки. Пьезокерамика разрезается на несколько тонких стержней, к примеру, с поперечным сечением 2×2 мм, где длина стержней определяет основную акустическую резонансную частоту. Несколько стержней склеиваются вместе в определенной после-

довательности. В результате большинство нежелательных резонансных мод не может быть возбуждено, тогда как основной резонанс еще может присутствовать. Устранение нежелательных мод увеличивает частоты, на которых преобразователь может быть использован. Использование склеивания стержней также приводит к расширению полосы пропускания преобразователя. Не композитный преобразователь состоит из одного или нескольких элементов, где их длина определяет основную резонансную частоту. Поперечное сечение, например, может быть в виде круга диаметром 80 мм, что приводит к более вероятному появлению нежелательных резонансных частот, чем в случае композитных акустических преобразователей.

Сдвиг по вертикали при широкой полосе пропускания тогда близок к $1480(14,8/f)/2$ (м) для ЕК500 и при частоте 38 кГц составляет 29 см. В приведенном выражении 1480 м·с⁻¹ — это скорость звука и деление на 2 учитывает распространение акустического импульса до объекта и обратно. Глубины, связанные с измерениями MVBS в Симрад ЕК500, не корректируются в его выходных данных.

Подобные расчеты общей задержки в системе также были проведены и для Симрад ЕК60, однако они не были достаточно качественно подтверждены, как было сделано с Симрад ЕК500. Теоретическая общая задержка в системе при частоте f (Гц) для ЕК60 включает задержку в аппаратной части и в антенне:

- а) задержка в аппаратной части — $4,5/f$ (сек);
- б) задержка в некомпозитной антенне (Q -фактор = 4) — $2,5/f$ (сек);
- в) задержка в композитной антенне (Q -фактор = 2,5) — $1,5/f$ (сек).

В настоящее время акустические антенны фирмы Симрад на частоты 70 кГц и выше являются композитными. Это дает сдвиг по вертикали для ЕК60 близкий к $1480(7,0/f)/2$ (м), который на частоте 38 кГц составляет примерно 14 см. В табл. 13.11 показаны смещения по вертикали, обусловленные задержками в системе эхолотатора для ЕК500 и ЕК60, рассчитанные по вышеприведенным формулам для разных рабочих частот относительно частоты 38 кГц.

Таблица 13.11. Разность в смещениях по вертикали в ЕК500 и ЕК60 при общих установках параметров аппаратуры и антенн различных частот относительно 38 кГц

Эхолотатор	$\Delta 18$	$\Delta 38$	$\Delta 70$	$\Delta 120$	$\Delta 200$	$\Delta 333$
	см	см	см	см	см	см
ЕК500	32*	0*	-0,5**	-12,0**		
ЕК60	15	0	-7***	-10***	-11***	-12***

Примечание. $\Delta 18$ — разность между смещениями на частотах 18 и 38 кГц и т. д.

* ЕК500 «широкий» фильтр.

** ЕК500 «узкий» фильтр.

*** Композитная антенна.

14. Должны использоваться корректные скорость звука и коэффициент затухания.

Скорость звука и акустическое затухание могут быть рассчитаны по формулам Франсуа и Гаррисона [1982]. Оба эти параметра изменяются при изменении солености, температуры и глубины (давления). Когда указанные параметры известны, данная формула позволяет получить точные значения скорости звука. В идеале было бы необходимо постоянно рассчитывать новые значения этих характеристик для получения корректных измерений, но это сложно для практической реализации. Авторами предлагается следующее: датчики электропроводности-температуры-глубины необходимо применять перед началом каждой съемки в районе съемки. Вероятно, достаточно использовать одни и те же профили скорости звука и одни и те же коэффициенты затухания для всей съемки, полученные непосредственно в обследуемом районе. Плохой практикой будет использовать профили звука, полученные в зоне калибровки для расчета скорости звука и затухания в районе самой съемки,

если они находятся далеко друг от друга или различаются по океанографическим характеристикам.

15. Использование данных, которые сопоставимы не во всех аспектах.

Идеальной была бы ситуация, где оси двух или нескольких акустических антенн полностью совпадают или они имеют одинаковую ширину ХН, но практически это невозможно². В связи с этим авторы обсуждают результаты проведенных исследований по оценке погрешностей при многочастотном анализе, когда полученные данные были компромиссными относительно перекрытия характеристик направленности. Исследования были проведены с антеннами, установленными на французском рыболовном НИС «Таласса» с частотами от 12 до 200 кГц, с ХН от 7 до 16° и расстояниями между центрами антенн от 0,4 до 2 м. Антенны с осями, находящимися на некотором расстоянии друг от друга и с ХН различной ширины, вероятно, обеспечивали получение данных при наиболее общих компромиссных условиях. Следует отметить, что позже антенны на НИС «Таласса» были переустановлены для расположения их возможно ближе друг другу. Все другие требования (одинаковые длительности и формы излучаемых импульсов, одновременное излучение и др.) полагались быть выполненными. Анализ касался только эхотрасс, полученных от больших множественных целей, таких как косяки рыбы, а не отдельных эхосигналов. Если мы определяем $O_{\text{п}}$, равное 0,85, в качестве разумного (приемлемого) значения для сравнения данных, указанное определение полагается на простое трехдецибельное определение ширины ХН и не включает все эха, вносящие вклад в сигнал с этого объема выборки при определенном пороге. Часть ХН, действительно занимаемая косяком во время процесса обнаружения, когда он проходит через нее, не принимается во внимание.

Так как процесс обнаружения косяка и формирования эхотрасс от него является достаточно сложным, инструментальные погрешности оценивались приблизительно, используя имитацию эхотрасс от косяков [Diner, 1999, 2001]. Имитация основывалась на упрощенной модели обратного рассеяния рыбы, которую изменяли в соответствии с методом, описанным Diner [2007]. Использовалась имитация нескольких косяков различных размеров (и MVBS), находящихся на различных глубинах при их обнаружении эхолокационной аппаратурой с характеристиками направленности акустических антенн различной ширины, 7, 11 и 16° (в общем применяемых на практике). Получаемые изображения эха обрабатывались с различными порогами. На эхотрассах косяков были выполнены два основных анализа:

а) Оценка «глобальной» MVBS. В этом случае эхограммы на каждой частоте обрабатывались отдельно и сравнивались для получения среднего MVBS. Инструментальная погрешность определялась как разность между значениями MVBS, рассчитанными для совокупностей эхосигналов от одного и того же косяка, обнаруженного при использовании двух различных акустических ХН при работе аппаратуры на одной частоте;

б) Анализ эхотрасс от одного цикла лоцирования к другому. В этом случае данные от двух каналов комбинировались на основе результатов от цикла к циклу для получения новой или «синтетической-искусственной» эхограммы. Из виртуальной эхограммы затем выделялись описатели эхотрасс. Инструментальная погрешность эквивалентна средней разности в VBS от косяка между двумя ХН на одной и той же частоте.

Потенциальные инструментальные погрешности определяются расстояниями между акустическими антеннами в поперечной и продольной плоскостях и различиями в ширине ХН. На величину «глобальной» MVBS влияют дистанция между антеннами в поперечной плоскости и различие между шириной ХН. Точность анализа «от цикла к циклу лоцирования» зависит от расстояния между антеннами в продольной плоскости.

² *Примечание автора.* В принципе возможно обеспечение совпадения, по меньшей мере, осей двух характеристик направленности при применении параметрических антенн [Тимошенко и Кудрявцев, 1981; Сидько и др., 1987; Кудрявцев, 2013] или электронно-сканирующих многочастотных систем, подобных MS70 [Trenkel et al., 2008].

Когда рассматриваются вариации в длине косяков и глубине их нахождения, положениях различных антенн, в их ХН, возможно большое количество комбинаций, достаточно сложных для анализа. Для оценки потенциальных погрешностей имитационные модели основывались на обнаружении геометрически однородных косяков эллипсоидной формы, пересекаемых ХН акустической антенны. Сложный процесс может быть упрощен посредством нормализации результатов в соответствии с реалистической геометрической гипотезой зависимости погрешности от параметра N_{bi} , размера эхотрассы относительно ширины характеристики направленности антенны (рис. 13.37):

$$N_{bi} = L_i / (2D_i \tan(B_0/2)),$$

где $B_i = 0,44 \times \theta \times (dST)^{0,45}$ – приближение обратной функции Бесселя для направленности в рассматриваемой части характеристики направленности; θ – номинальная ширина характеристики направленности (7° , например); dST – разность между MVBS эхотрасс косяка (S_{vi}) и порогом; L_i и D_i , соответственно, длина и средняя глубина эхотрасс косяка.

Ширина характеристики направленности авторами определялась с использованием угла обнаружения, B_i , а не номинального угла характеристики направленности антенны [Diner, 2001].

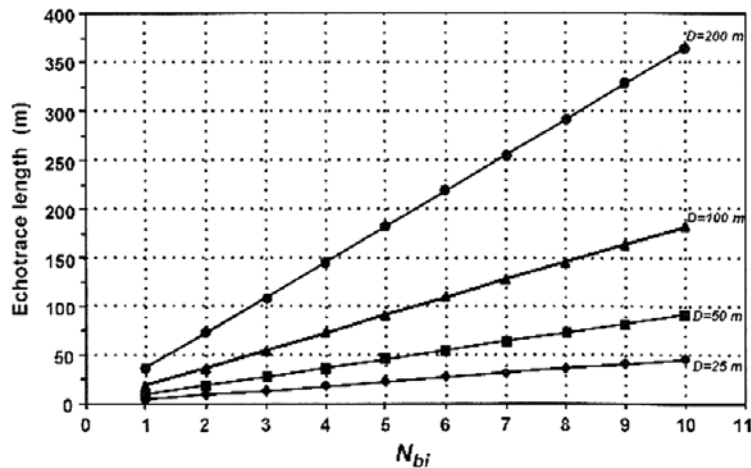


Рис. 13.37. Графики длины косяков как функция N_{bi} , т. е. размер эхотрассы относительно ширины характеристики направленности для различных глубин нахождения косяка и фиксированных разностей между MVBS косяка и величиной порога (dST) 15 дБ. Каждый график показывает N_{bi} на фиксированной глубине D_i

16. Погрешности, обусловленные дистанцией между антеннами в поперечной плоскости.

При многочастотном анализе расстояние между акустическими антеннами в поперечной плоскости может влиять на получаемые результаты, т. к., например, небольшие косяки могут занимать полную часть одной ХН и меньшую часть другой (рис. 13.38). Во время процесса обнаружения косяка эхолотом с одной ХН ширина обнаруживаемых косяков неизвестна. Для удобства предполагалось, что ширина и длина косяка эквивалентны, а также принимались и некоторые другие допущения.

В правой части рисунка круги, обозначенные буквой А, показывают момент, когда ХН находятся на границе косяка и он не обнаруживается. Круги, обозначенные буквой В, показывают, что ХН лишь частично захватывают косяк, и буквой С обозначены сечения ХН со значительно большим числом озвучиваемых рыб в цикле лоцирования.

Имитационные модели были применены для четырех отдельных дистанций между антеннами в поперечной плоскости: 0,40, 0,70, 1,0 и 2,0 м. При расстоянии 0,40 м инструментальные погрешности для MVBS оставались низкими, большей частью $< 0,25$ дБ относительно dST , глубины косяка или относительного размера косяка. Указанное значение расстояния можно считать приемлемым. Разности в MVBS от имитаций с разными поперечными дистанциями между антеннами позволили определить эмпирические

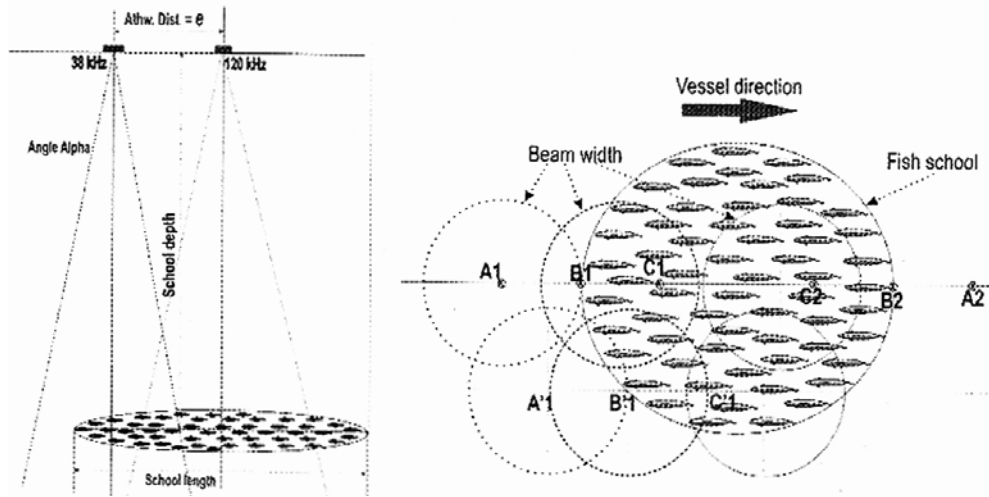


Рис. 13.38. Схематическое изображение обнаружения некоторого косяка двумя гидроакустическими антеннами, расположенными в поперечной плоскости судна на расстоянии e в вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) плоскостях

значения минимального N_{bi} при гипотезе, что они относятся к приемлемой погрешности для MVBS (E), глубине косяка D_i и показателю dST . Для поперечного расстояния e_{II} (II в м):

$$\begin{aligned}
 e_{0,70}: N_{bi} &\geq (20/D_i) + (8/E^{0,05}) - (0,03dST - 6,8); \\
 e_{1,0}: N_{bi} &\geq (20/D_i) + (8/E^{0,05}) - (0,03dST - 6,6); \\
 e_{2,0}: N_{bi} &\geq (20/D_i^{0,8}) + (8/E^{0,05}) - (0,05dST - 6,3).
 \end{aligned}$$

Эти отношения являются приближениями влияния глубины нахождения косяка и порога и позволяют быстро выбрать косяки, которые могут быть обработаны с некоторой потенциальной инструментальной погрешностью, которая не срывает дальнейший многочастотный анализ. Рис. 13.39 дает общее представление этих предельных

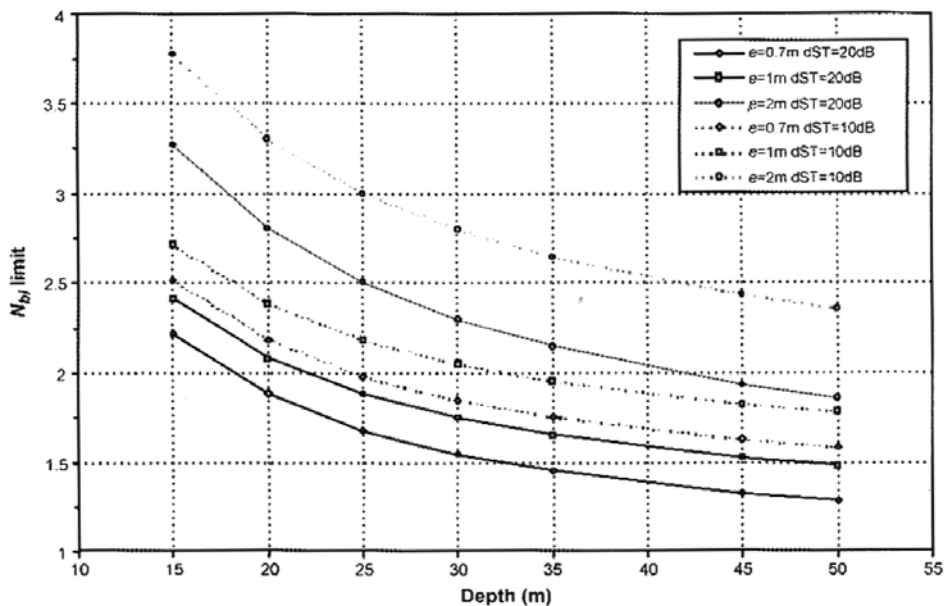


Рис. 13.39. Предельные значения N_{bi} , т. е. размер эхотрасс относительно предельных значений ширины характеристики направленности в зависимости от глубины нахождения косяка, рассчитанные с помощью эмпирических соотношений, для погрешности 0,5 дБ, разности между MVBS косяка и порогом $dST=20$ дБ (непрерывные линии) или 10 дБ (точечные линии), и расстояниями в поперечной плоскости $e=0,7$ м (линии с ромбами), 1,0 м (линии-графики с квадратами) или 2,0 м (графики с кругами).

значений N_{bi} . На малых глубинах, например, 15 м, с $dST=10$ дБ, пределы N_{bi} являются высокими, особенно при больших поперечных расстояниях. Обычно предел N_{bi} уменьшается, когда dST увеличивается, т. е. когда порог обработки снижается.

17. Погрешности, обусловленные расстоянием между антеннами в продольной плоскости.

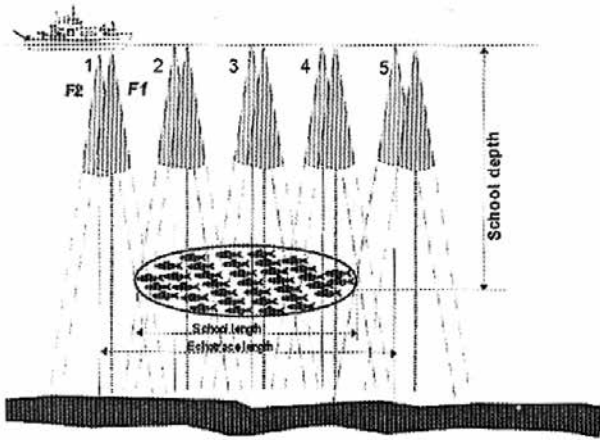


Рис. 13.40. Обнаружение косяка двумя характеристиками направленности, F_1 и F_2 , расположенными на некотором расстоянии в продольной плоскости за время выполнения пяти циклов лоцирования

Когда антенны устанавливаются относительно друг друга в продольной плоскости на дистанции несколько метров, инструментальные погрешности проявляются в начале обнаружения, т. к. одной характеристикой косяк обнаруживается на несколько циклов лоцирования раньше, чем второй, и наоборот, этот косяк раньше выходит из зоны обнаружения первой характеристики (рис. 13.40).

Если антенны установлены не слишком далеко друг от друга (<6 м, например), эхотрассы от одного и того же косяка, обнаруживаемого двумя характеристиками, являются обычно подобными и «глобальная» MVBS не является предметом большой инструментальной погрешности. Это не относится к методу анализа от «цикла к циклу». Во время начала или окончания обнаружения косяка имеют место регулярные вариации уровня принимаемых эхосигналов от одного цикла локации к другому. Этот уровень эха, относящийся к части ширины характеристики антенны, занимаемой рыбой, увеличивается до тех пор, пока вся характеристика не будет ею заполнена. Он затем остается постоянным за время не-

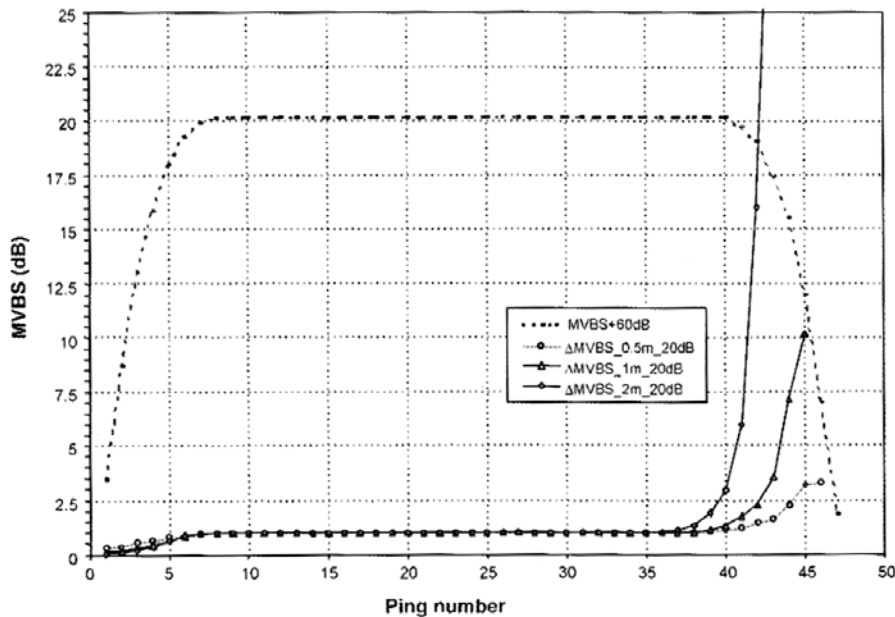


Рис. 13.41. Последовательные значения амплитуд эхосигналов (имитированный уровень эхосигнала в мВ) от имитированного косяка рыбы длиной 20 м и находящегося на средней глубине 25 м от начала до окончания обнаружения (точечный график). Сплошными линиями показано отношение уровня сигнала, обнаруживаемого двумя антеннами, разнесенными в продольной плоскости на расстоянии 0,5 м (линии с кругами), 1,0 м (линии с треугольниками) и 2,0 м (линии с ромбами)

скольких циклов локации и далее к концу лоцирования уменьшается (рис. 13.41). Если выполняется сравнение между частотами, к примеру, между $MVBS_{f1}$ и $MVBS_{f2}$, что эквивалентно отношению интенсивностей эха I_{f1}/I_{f2} , это отношение должно быть высоким в конце обнаружения косяка, т. к. I_{f2} ниже, чем I_{f1} и, наоборот, в начале обнаружения.

Чтобы оценить величину возможных погрешностей, были имитированы рыбные косяки различных размеров, находящиеся на разных глубинах и с разными величинами $MVBS$, и рассчитаны погрешности, обусловленные дистанциями между антеннами в продольной плоскости, составляющими 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м (с частотами повторения локационных импульсов, соответствующими 0,5 м). Для расстояния между антеннами 0,5 м и величине $dST=5$ дБ инструментальная погрешность была $<0,5$ дБ независимо от размеров косяка и его глубины. Для дистанции 2,0 м и $dST=5$ дБ глубина косяка должна быть >25 м, чтобы снизить погрешность до приемлемого уровня. С $dST=10$ дБ или более погрешность остается высокой при любых размерах косяка и/или глубине его нахождения.

Одним из решений этой проблемы является компенсация этой дистанции в продольной плоскости судна в терминах числа циклов локации, а именно, смещение частотного анализа на количество циклов, эквивалентное расстоянию между антеннами. Однако когда скорость судна большая (например, 10 уз.), а частота повторения циклов локации низкая (1 цикл в сек⁻¹), пройденная судном дистанция за время между циклами может быть больше, чем расстояние между антеннами (~ 5 м в приведенном примере). Следовательно, такой сдвиг не может компенсировать дистанцию между антеннами. Более высокая частота повторения излучаемых импульсов, или уменьшенная скорость судна, или комбинация указанных факторов поможет получить более качественные результаты анализа.

18. Погрешности, связанные с шириной ХН акустической антенны.

Недооценка $MVBS$ косяка обуславливается различными факторами, но критичными являются размеры косяка и ширина ХН [Diner, 1999, 2001]. Использование ХН различной ширины приводит к недооценке различных характеристик, результирующих в погрешности при многочастотном анализе в случае применения метода общего (глобального) $MVBS$. Сдвинутые обнаружения при различной ширине ХН приводят к проблемам, аналогичным создаваемым при анализе эхолокации от цикла к циклу при разнесенных антеннах в продольной плоскости судна. Для исследований этой проблемы авторами были выполнены имитации обнаружения косяка, находящегося на разных глубинах, при использовании четырех ХН различной ширины: 7, 8, 11 и 16°. В каждом случае рассчитывалась разность между $MVBS$ эхотрасс для одного и того же косяка рыбы, обнаруживаемого с применением акустических антенн с углами характеристик направленности, θ_1 и θ_2 : $\Delta MVBS(\theta_1, \theta_2) = (MVBS_{\theta_1} - MVBS_{\theta_2})$.

Когда косяк обнаруживается посредством вертикальной локации, его $MVBS$ систематически недооценивается. Эта недооценка увеличивается, когда горизонтальные размеры косяка становятся меньше относительно ширины ХН антенны (т. е. имеют место низкие значения N_{bi}). Когда косяк обнаруживается с помощью двух частот с одинаковой шириной ХН, эти две недооценки являются подобными и не влияют на результат многочастотного анализа. При использовании двух ХН разной ширины разность в недооценке $MVBS$ для двух характеристик должна быть определена; эта разность будет эквивалентна инструментальной погрешности при многочастотном анализе (общей $MVBS$).

При исследовании этого вопроса авторами использовался алгоритм определения коррекции в описателях косяка [Diner, 2001]. Недооценка в определении $MVBS$ косяка относительно N_{bi} рассчитывалась как:

$$dS_v = 2,56 / (N_{bi} - 1). \quad (13.42).$$

Разность в $MVBS$ для двух антенн с разной шириной характеристик направленности тогда будет определяться как:

$$\Delta MVBS(\theta_1, \theta_2) = dS_{\theta_1} - dS_{\theta_2} = 2,56[(1/N_{bi\theta_1} - 1) - (1/(N_{bi\theta_2} - 1))]. \quad (13.43).$$

Путем комбинирования результатов имитации были определены соотношения между N_{bi} и другими номинальными значениями ширины характеристик направленности, а именно, N_{bi8° , N_{bi11° и N_{bi16° . Разность в коэффициенте MVBS тогда может быть выражена относительно N_{bi7° путем регулирования коэффициентов в выражении (13.43) как:

$$\begin{aligned} \Delta MVBS(7,8) &= 2,56[(1/N_{bi7^\circ} - 1) - (1/0,87(N_{bi7^\circ} - 0,87))]; \\ \Delta MVBS(7,11) &= 2,56[(1/N_{bi7^\circ} - 1) - (1/0,59(N_{bi7^\circ} - 0,57))]; \\ \Delta MVBS(7,16) &= 2,56[(1/N_{bi7^\circ} - 1) - (1/0,87(N_{bi7^\circ} - 0,41))]. \end{aligned}$$

Потенциальные погрешности для диапазона значений N_{bi} приведены на рис. 13.42.

В общем можно отметить, что имеются небольшие погрешности для $7^\circ/8^\circ$, обычно $< 0,5$ дБ. Для соотношения $7^\circ/11^\circ$ или хуже для $7^\circ/16^\circ$, если косяки не являются очень большими ($N_{bi7^\circ} > 7$) получаются большие погрешности, мешающие сравнениям с данными, полученными с номинальной 7-градусной шириной ХН (например, 38, 120 или 200 кГц), и данными, полученными с 11-градусной (18 кГц) или 16-градусной (12 кГц) шириной.

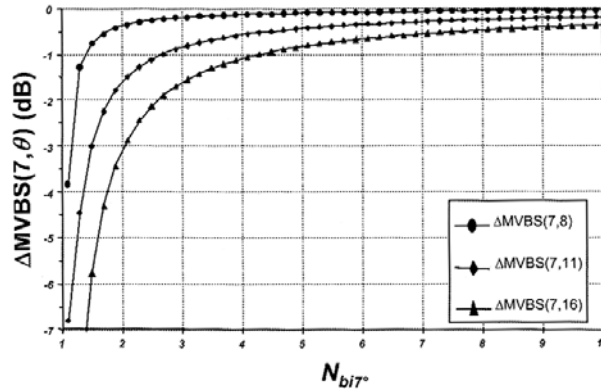


Рис. 13.42. Потенциальные погрешности относительно N_{bi7° т. е. размера эхотрасс относительно ширины характеристики направленности антенны при различных значениях номинальной ширины характеристики: $\theta = 8^\circ, 11^\circ, 16^\circ$ в сравнении с 7°

Возможное решение в таких ситуациях состоит в ограничении анализа данных (результатов) с краев косяка и использовании эхосигналов лишь с той части косяка, которая полностью озвучивается ХН двух частот. Некоторые циклы озвучивания в начале и окончании обнаружения косяка поэтому должны быть исключены из анализа. Это количество циклов рассчитывается, принимая во внимание более широкую характеристику направленности, но используя реальный угол обнаружения, B_i :

$$B_i = 0,44\theta (dST)^{0,45}. \quad (13.44)$$

Подходящая дистанция в начале и конце обнаружения косяка, тогда определяется как:

$$L_{pg} = 2D_i \tan(B_i/2). \quad (13.45).$$

Если скорость судна равна v_c (в м⁻¹) и интервал между циклами лоцирования равен P_g (в сек), то общее число удаляемых циклов должно составлять

$$n_{pg} = [2D_i \tan(B_i/2)] / v_c P_g. \quad (13.46)$$

Авторами приводятся некоторые примеры полученных вычислений. Они указывают, что их стремлением было улучшить автоматическое распознавание видов при вы-

сокой пространственной разрешающей способности и, следовательно, анализ эхотрасс от биологических водных объектов, особенно рыбных косяков небольших размеров. На данной стадии больше усилий должно быть предпринято для усовершенствования эхолокационных систем и расположения акустических антенн на судах, которые используются для многочастотных наблюдений. Для ограничения инструментальных погрешностей, обусловленных наличием антенн, установленных в различных местах, количество пригодных для многочастотного анализа косяков будет ограничено и это сокращает количество небольших косяков, которые могут рассматриваться. Предложения по расположению акустических антенн должны учитываться при проектировании новых исследовательских рыболовных судов или для переустановки их на существующих НИС. Предварительные результаты были использованы при проектировании НИС «G. O. Sars», при переустановке антенн на НИС «Tallassa», НИС «Dr. Fritjof Nansen», НИС «Scotia» и НИС «Johan Hjørt», а также при разработке и постройке большого промыслового рыболовного траулера «Libas».

Также должно уделяться внимание соотношениям размера косяка с шириной характеристики направленности антенны, т. к. для небольших косяков инструментальная погрешность, основывающаяся на расположении антенн в поперечной плоскости и разной ширине ХН, может быть больше, чем любые разности, обусловленные их естественным частотным откликом. Минимальный диапазон для описанных методов ограничивается требованием, чтобы O_n была $>0,85$, а максимальный – эффективной дальностью действия самых высоких частот, которая для 200-килогерцевой системы, предназначенной на судах, в основном, для обнаружения слабых целей, типично составляет 150–200 м. Большая часть водной толщи над континентальным шельфом, следовательно, может исследоваться на полной скорости судна. Более глубоководные рыбы и мелкие объекты, такие, как зоопланктон, должны исследоваться или с помощью комбинации более низких частот, или применением буксируемых устройств с подобными акустическими системами.

В заключение авторы суммируют предложения по сбору многочастотных акустических данных с возможно более высоким качеством:

- выбор набора рабочих частот, обеспечивающих минимальное взаимное влияние;
- выбор акустических антенн с подобными и лучше с идентичными ХН;
- установка антенн возможно ближе друг к другу и с наименьшими размерами в центре;
- обеспечение синхронизации лоцирования всех акустических антенн;
- обеспечение временной идентификации каждого цикла локации с разрешающей способностью по меньшей мере 0,01 сек;
- обеспечение выходной мощности с уровнями, которые не приводят к существенным потерям из-за нелинейных эффектов, к примеру, 250 Вт на рабочей частоте 120 кГц, 100 Вт на 200 кГц;
- обеспечение работы на всех частотах с одной и той же длительностью излучаемых импульсов, одинаковой частотой их повторения и длиной акустических выборок;
- осуществлять сбор данных при самом низком возможном пороге, например, при 120 дБ или менее;
- выполнять калибровку на всех частотах, по меньшей мере, один раз за время акустической съемки, в идеале – дважды, в начале и в конце;
- использовать соответствующие скорость звука и коэффициент затухания;
- по возможности удалять или максимально снижать помехи.

В том случае, когда не удастся выполнить какие-либо из указанных условий, может быть предпринято следующее:

- усреднение данных по множеству выборок для получения эквивалентных объемов выборки;
- компенсация расстояния между антеннами в продольной плоскости посредством пропорционального смещения циклов лоцирования;

– при использовании антенн с различной шириной ХН осуществление компенсации путем исключения из многочастотного анализа акустических данных с крайних частей (зон) косяка.

Korneliussen [2010] были проведены дополнительные исследования по совершенствованию алгоритма видовой идентификации скумбрии, большей частью зависящего от оценки типичного значения относительного частотного отклика, $r(f)$, и его диапазона вариации, $\Delta r(f)$, на каждой акустической частоте (f). Он полагает, для акустической оценки обилия должна использоваться частота 200 кГц и должен быть произведен перерасчет предыдущих оценок обилия скумбрии, которые первоначально основывались на 38 кГц, через данные на 200 кГц.

Первое эхо от дна видно на глубине 70 м при активной локации, второе – примерно на глубине 140 м. В результате данные с интервала глубин (к примеру, 90–125 м) в цикле активной локации могут использоваться для оценки помех.

Как указывалось, при количественной оценке состояния запасов гидробионтов гидроакустическим методом большей частью используется интегрирование отраженных от них сигналов. Результаты эхоинтегрирования затем переводятся в оценку биомассы на основании характеристик рассеяния водных организмов. Компенсация потерь на расширение фронта волны и затухание обеспечивается с помощью ВАРУ.

Принимаемая акустическая энергия включает обратное рассеяние от подводных целей в среде (эхосигналы), а также помехи. Обычно для исключения влияния помех (шумов) при эхоинтегрировании используются пороговые значения амплитуд эхосигналов. Обратное рассеяние ниже порога устанавливается равным нулю, т. е. шум подавляется. Установка порога является определенным компромиссом, т. к. при высоком пороге могут исключаться и представляющие интерес некоторые слабые рассеиватели, а также и разреженные рыбные концентрации с низкой плотностью распределения. Это может влиять на результаты гидроакустической количественной оценки.

В связи с этим предлагались некоторые способы измерения помех для последующего их учета при обработке данных интеграторов. Были измерены помехи в районе проведения гидроакустической съемки при выключенном генераторе эхолотатора [Такао and Furusawa, 1995] и [Nunnallee, 1990] и зарегистрирован их вклад в измеряемое обратное рассеяние. Результаты оценки помех затем исключались из данных, получаемых при активной локации. При этом допускалось, что результаты оценки помех при выключенном генераторе оставались примерно такими же, как и при работе аппаратуры во время съемки, т. е. в другое время и в других местах, в т. ч. с отличающейся гидрометеорологической обстановкой. В развитие указанного предложения [Nunnallee, 1990] предлагал выполнять выключение генератора эхолотатора на ряд циклов, так, чтобы измерения обратного рассеяния прерывались с целью измерения помех для определенной компенсации временных изменений в уровнях помех.

[Kloser, 1996; Higginbottom, Pauly, 1997; Korneliussen, 2000] разработали методы, основанные на анализе данных ниже первого донного эха или на больших диапазонах, где соотношение с/ш наиболее вероятно полагается быть низким. Методы [Higginbottom and Pauly, 1997; Korneliussen, 2000] отличаются тем, что они не предполагают постоянных уровней помех по протяженным периодам времени (к примеру, в пределах галса при съемке), т. к. они периодически оценивают помехи в течение коротких временных интервалов, которые необходимы в ситуациях, где помехи изменяются по времени вследствие изменения условий, таких как скорость судна, погода, глубины дна и его состав.

В работе [De Robertis A. and Higginbottom I.R., 2007] рассматривается другой метод оценки помех и компенсации измерений обратного объемного рассеяния. Он подобен предложенным [Kloser, 1996] и [Watkins and Brierley, 1996], но имеет преимущество в том, что может использоваться для постоянного контроля помех в течение гидроакустической съемки. Другое его преимущество заключается в том, что он не полагается на вмешательство пользователя аппаратуры для определения того, какая часть реги-

страции должна использоваться для оценки помех: он позволяет корректно определять пригодные ее участки.

Цель метода заключается в компенсации влияний помех на данные эхоинтегрирования посредством оценки средней компоненты, относящейся к помехам, и удаления ее из результатов измерений. Согласно авторам базовая основа метода состоит в том, что в процессе обычной работы эхолот регистрирует информацию с участков, в которых имеет место небольшое обратное рассеяние при распространении излученного импульса. Данная информация используется для оценки среднего уровня помех и далее она исключается из результатов акустической количественной оценки. Указанная оценка помех также используется для определения соотношения с/ш, которое, в свою очередь, может применяться для ограничения дальнейшего анализа лишь высококачественными данными или помогать в выборе подходящего порога интегрирования. Порог эхоинтегрирования, основанный на отношении с/ш, может использоваться для максимизации части популяции, которая представляет основной интерес при гидроакустической съемке. Это будет наиболее полезно в ситуациях, где желательно минимизировать влияние помех при максимизации вероятности обнаружения акустических целей, являющихся слабыми рассеивателями, разреженно распределенными, находящимися на больших глубинах и др.

Авторы приводят следующее обоснование предлагаемого метода. Измеряемая средняя сила объемного обратного рассеяния (S_v , в дБ относительно 1 м^{-1}), являющаяся логарифмической мерой объемного рассеяния, может быть выражена как арифметическая сумма вкладов сигнала обратного рассеяния и помехи:

$$S_{v, \text{meas}} = 10 \log_{10} \left(10^{(S_{v, \text{signal}}/10)} + 10^{(S_{v, \text{noise}}/10)} \right),$$

где $S_{v, \text{meas}}$ – объемное рассеяние, регистрируемое эхолотом; $S_{v, \text{signal}}$ – вклад обратного рассеяния, обусловленный излученным импульсом; $S_{v, \text{noise}}$ – вклад от помех.

Ряд измерений $S_{v, \text{meas}}(i, j)$, полученных во время активной локации, используется в качестве основной информации для оценки помех. Индекс i используется для обозначения номера цикла лоцирования, а j – для обозначения положения части (элемента) выборки по вертикали. $S_{v, \text{meas}}$ применяется, т. к. эхолот калибруется в величинах S_v . Оценки помех в единицах S_v обеспечивают меру вклада помех. Основные допущения метода заключаются в том, что фоновые помехи являются независимыми от времени задержки в течение одного цикла излучения-приема и что в некоторых точках в цикле измерения имеют место превышения вкладов от помех (т. е. $S_{v, \text{noise}} \gg S_{\text{signal}}$). Последнее допущение подразумевает, что «всплески» помех, такие как импульсы короткой длительности, излучаемые другими эхолотами, отсутствуют или исключены из результатов измерений.

Если эти допущения выполняются, некоторая часть возвратов, наблюдаемых при активной локации, будет давать показания, подобные получаемым при работе

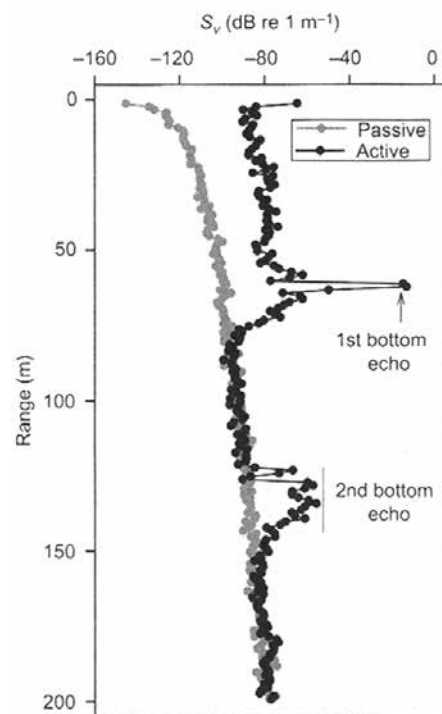


Рис. 13.43. Наложение циклов пассивной и активной локации 200-килогерцевого эхолота с временным сдвигом на 1 сек. Выборки S_v усреднялись в интервалах (слоях) 1 м

аппаратуры в «пассивном» режиме, которые являются мерой помех (рис. 13.43). При нарушении указанных допущений указанный метод и другие [Kloser, 1996; Watkins and Brierley, 1996; Higginbottom and Pauly, 1997; Korneliussen, 2000], основанные на активной локации, будут переоценивать помехи, т. к. часть измерений, используемых для оценки их уровня, будет включать заметный обратнорассеянный сигнал, также как и помехи.

Чтобы оценить уровни помех, в указанной работе из $S_{v, meas}$ сначала удаляется ВАРУ для получения $Power_{cal}$, количественно эквивалентной $S_{v, meas}$ с исключенной ВАРУ. Это необходимо для исключения зависящего от дистанции усиления помех, которое не должно изменяться со временем от запуска генератора. $Power_{cal}$ рассчитывается как

$$Power_{cal}(i, j) = S_{v, meas}(i, j) - (20 \log_{10}(r_{avg}(i, j)) + 2\alpha r_{avg}(i, j)),$$

где i – номер цикла лоцирования; j – номер выборки по вертикали; r_{avg} – расстояние, используемое для применения ВАРУ в средней точке каждого отрезка (bin) в метрах и α (дБ м⁻¹) – коэффициент затухания, первоначально используемый в эхолокаторе. В эхолокаторах часто выполняется задержка начала ВАРУ для минимизации погрешностей, обусловленных задержками в приемнике и r_{avg} представляет расстояние, регулируемое с учетом указанных задержек. Для эхолокатора ЕК60 в данной работе задержка составляла:

$$r_{avg} = r - (\tau c/4),$$

где r – некорректированное расстояние до средней точки выборки; τ – длительность импульса (сек); c – скорость звука (м с⁻¹).

В работе приведено выражение для оценки измерения средней $Power_{cal}$ в элементах, соответствующих N циклам лоцирования по горизонтали и M выборкам по глубине

$$\overline{Power_{cal}}(k, l) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{NM} \sum_{j=(l-1)M+1}^{lM} \sum_{i=((k-1)N+1}^{kN} 10^{Power_{cal}(i, j)/10} \right).$$

Это результируется в $\overline{Power_{cal}}$ для каждого усредненного интервала N циклов лоцирования (усредненные временные интервалы обозначаются в работе индексом k) посредством M выборок по дистанции (усредненные интервалы по вертикали обозначаются индексом l).

Из $\overline{Power_{cal}}$ выводится оценка помех посредством выбора минимального значения $Power_{cal}$ в каждом временном интервале k :

$$Noise(k) = \min(\overline{Power_{cal}}(k, l)).$$

Чтобы минимизировать влияние ситуаций, где вышеуказанные допущения нарушаются (т. е. регистрации с толщи водной среды имеют место во всех расстояниях выборок) применяется максимальный порог $Noise_{max}$ к $Noise(k)$:

$$\begin{aligned} \text{т.е. если } Noise(k) > Noise_{max}, \\ \text{то } Noise(k) = Noise_{max}, \end{aligned}$$

где $Noise_{max}$ представляет верхний предел ожидаемых помех при работе эхолокационной аппаратуры. $Noise_{max}$ должен определяться эмпирически и будет зависеть от типа эхолокатора, его установки и помех, создаваемых судном. В данной работе он был установлен в 125 дБ на всех частотах и это значение при натуральных испытаниях никогда не превышалось.

Оценки $Noise$ устанавливались для каждого цикла лоцирования i посредством установки значения $Noise$ в данном блоке циклов локации k ко всем индивидуальным циклам. Влияние ВАРУ затем добавлялось к уровню помех для получения $S_{v, noise}$ для каждой выборки S_v . Приводится следующее выражение для $S_{v, noise}(i, j)$:

$$S_{v, \text{noise}}(i, j) = \text{Noise}(i) + (20 \log_{10}(r_{\text{avg}}(i, j)) + 2\alpha r_{\text{avg}}(i, j)).$$

Оценка помех затем вычиталась из $S_{v, \text{meas}}$, чтобы получить оценку S_v , откорректированную относительно помех ($S_{v, \text{corr}}$) для каждого цикла локации i и диапазона выборки j :

$$S_{v, \text{corr}}(i, j) = 10 \log_{10}(10^{(S_{v, \text{meas}}(i, j)/10)} + 10^{(S_{v, \text{noise}}(i, j)/10)}).$$

Соотношение с/ш (дБ) для данной выборки оценивалось как:

$$c/\text{ш}(i, j) = S_{v, \text{corr}}(i, j) - S_{v, \text{noise}}(i, j).$$

Оно является мерой относительного вклада сигнала и шума и может объективно использоваться для идентификации данных, которые содержат достаточный сигнал, чтобы гарантировать (давать право) дальнейший их анализ при эхоинтегрировании или многочастотных сравнениях эхолокационных данных.

Кроме того, в указанной работе условие $c/\text{ш} > \text{порога}_{c/\text{ш}}$, где порог $c/\text{ш}$ – это минимальное желаемое значение с/ш в дБ, может соотноситься с порогом $S_{v, \text{corr}}$ и соотношением с/ш как: если $c/\text{ш}(i, j) \leq \text{порога}_{c/\text{ш}}$, то $S_{v, \text{corr}}(i, j) = -999$.

Значение -999 используется, если результат измерения ниже порогового значения, т. к. логарифм нуля не определяется.

Предложенный в указанной работе метод снижения влияния помех был испытан с несколькими базами данных, собранных на судах «Miller Freeman» и «Oskar Dison» в районе Аляски и штата Вашингтон с помощью калиброванного эхолокатора EK60, работающего на частотах 18, 38, 120 и 200 кГц.

На рис. 13.44 представлен пример соответствующих эхограмм.

Некоторые другие способы и примеры снижения влияния помех на результаты количественной оценки гидробионтов гидроакустическим методом рассмотрены в работе [Ryan et al., 2015], в т. ч. в полуавтоматическом режиме. Основное внимание при этом уделяется их использованию при гидроакустических съемках биологических рассеивателей в океанических районах, когда дно находится на больших глубинах и применение способов, использующих прием информации после донного эха, не всегда возможно. Авторами приводятся обоснование и примеры применения снижения влияния трех типов помех: импульсного характера длительностью менее одного цикла лоцирования (обозначенных как IN), импульсного характера, принимаемых во многих циклах локации (TN) и фоновых (принимаемых в течение часов и более), обозначенных как

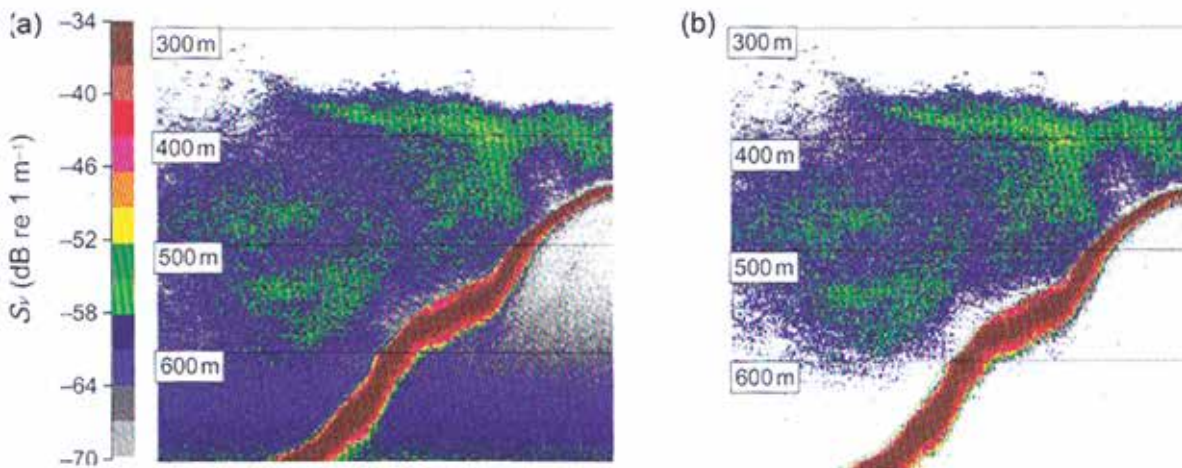


Рис. 13.44. Пример снижения влияния помех при прохождении двух морских миль при работе эхолокатора на частоте 120 кГц по поиску минтая в Беринговом море. Концентрация минтая находилась на глубинах между 350 и 650 м:

a – оригинальная эхограмма; *b* – эхограмма при подавленных помехах с порогом 3 дБ

(BN). В работе также рассматривается способ учета влияния затухания эхосигналов воздушными пузырьками ниже акустических антенн эхолотаторов (AS). Сумма IN, TN и BN обозначены как CN. IN, например, может создаваться излученными импульсами несинхронизированных эхолотаторов IN. TN может результироваться вследствие воздействия широкополосных акустических колебаний высокой энергии, создаваемых в плохую погоду при ударах волн. Источником BN могут быть помехи от гребного винта судна. AS могут отрицательно сказываться на результатах калибровки как в одном цикле лоцирования, так и в серии циклов, особенно в плохую погоду. Приведены примеры натурального применения предложенных способов при обработке баз данных в форме эхограмм выборок сил объемного обратного рассеяния S_v (в дБ относительно 1 м^{-1}), собранных в Индийском и других океанах. Индивидуальные выборки $S_v(i, j)$ идентифицируются их номером по вертикали i и номером цикла лоцирования j . При применении фильтров для снижения помех, обозначенных как IN, TN, и учета затухания AS, значения $S_v(i, j)$, которые не удовлетворяют критерию приемлемого качества, удаляются из базы данных. Для BN значения $S_v(i, j)$, которые были ниже определенного соотношения с/ш, устанавливаются -999 дБ относительно 1 м^{-1} (нулевыми).

Способ снижения влияния помех IN был основан на методе двухстороннего сравнения, описанного в работе [Anderson et al., 2005]. Прежде применения фильтра IN выборки в пределах каждого цикла локации в оригинальной эхограмме. Усредненные по вертикали значения $S_v(i, j)$ удаляются, если эмпирически определенный порог, δ , был превышен при сравнении $S_{v(i, j+n)}$ и $S_{v(i, j-n)}$,

$$S_{v(i, j)} - S_{v(i, j-n)} > \delta \text{ и } S_{v(i, j)} - S_{v(i, j+n)} > \delta.$$

В работе приводятся выбранные и определенные пользователем параметры фильтра IN.

Последовательность операций при определении снижения влияния затухания AS на результаты гидроакустических съемок в работе заключаются в следующем. Вначале задаются верхний r_1 и нижний r_2 пределы рассеивающего слоя по глубине. Если необходимо, эти пределы регулируются для учета временных изменений в глубинах слоя. Затем определяются средние значения \tilde{S}_v между r_1 и r_2 для каждого цикла локации, обозначаемые как \tilde{S}_{vp} ; далее определяются средние значения \tilde{S}_{vp} для серии n циклов лоцирования, обозначаемые как \tilde{S}_{vn} . Затухание при наличии пузырьков воздуха влияет на все значения S_v в цикле лоцирования. Поэтому весь цикл удаляется, если среднее значение в нем было меньше, чем среднее значение в серии n циклов локации исходя из определенного пользователем порога δ ,

$$\tilde{S}_{vp} - \tilde{S}_{vn} < \delta.$$

Выбор n включает некоторый компромисс. Если значение n слишком мало, \tilde{S}_{vn} будет слишком подобно \tilde{S}_{vp} и указанный фильтр не будет идентифицировать AS. И наоборот, если значение n слишком большое, и сигнал в пределах выбранного слоя слишком переменный, \tilde{S}_{vn} может не являться достаточно полезным. Поэтому n выбирается на основании анализа конкретной эхограммы. Авторами приводятся выбранные ими типичные значения для n .

Задачей фильтра помех типа TN в работе является их удаление без удаления сигнала от биологических рассеивателей. Его работа основана на допущении, что $S_{v(ij)}$, которые превышают среднее значение в некоторой области, окружающей m циклов лоцирования и n метров, $\tilde{S}_{v(mn)}$, обуславливается TN. Поэтому значения $S_{v(i, j)}$ удалялись, если они превышали $\tilde{S}_{v(mn)}$, а именно:

$$S_{v(i, j)} - \tilde{S}_{v(mn)} > \delta.$$

На глубинах 0–250 м вариации в обратном рассеянии от биологических агрегаций могут превышать δ и ошибочно указывать на TN. На больших глубинах вероятность этой погрешности уменьшается в связи с обратным рассеянием от различных видов

(смесь микронектона) и (вышеупомянутой) автокорреляции вдоль галса. На глубинах менее 250 м влияние TN, однако, обычно незначительно вследствие ВАРУ. Поэтому, чтобы избежать удаления сигналов от биологических объектов, авторы не применяли фильтр TN к данным с глубин <250 м. В работе приводятся значения m , n и δ , выбранных эмпирически с использованием множества тестовых баз данных.

Натурная проверка разработанных методов в указанной работе проводилась на нескольких промысловых судах. В заключении авторы отмечают, что представленные способы позволяют более полно использовать акустические данные при работе в неидеальных ситуациях (к примеру, в плохую погоду и при излучениях других приборов). Полуавтоматические процедуры дали возможность реализации эффективной, быстрой и повторяющейся обработки данных от рассеивателей в толще водной среды. Несмотря на решение проблемы с помехами первого порядка и влияниями затухания, необходимы дальнейшие исследования, так как остаточные погрешности могут еще быть значительными, особенно, если качество исходных (оригинальных) данных является плохим. Авторы указывают, что выполненные ими расчеты меры качества данных (PR) являются первым шагом в обеспечении индикации PR и надежности обработанной информации.

13.7. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИКИ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ЗАПАСОВ ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ И ДРУГИХ ОБЪЕКТОВ ЛОВА

Обеспечение более достоверного мониторинга и контроля состояния биоресурсов в настоящее время является одной из основных задач органов управления современным промышленным рыболовством. Поэтому расширение использования гидроакустической техники несомненно может способствовать более качественному решению указанной задачи.

13.8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРОМЫСЛОВЫХ СУДОВ

Гидроакустический (ГАМ) метод, основанный на ультразвуковом зондировании водной среды широко используется отечественными и зарубежными исследователями биоресурсов с помощью специализированной научной гидроакустической аппаратуры вертикальной локации. Однако из-за высоких материальных затрат не представляется возможным проведение масштабных исследований на научно-исследовательских судах (НИС) в течение всего года. Такие работы проводятся с существенными временными промежутками, что естественно сказывается, например, на оценке сезонной изменчивости запасов промысловых объектов. Эффективность таких исследований могла бы быть значительно повышена, если бы удалось централизованно получать дополнительную гидроакустическую информацию с промысловых судов, поскольку их количество значительно превосходит численность научно-исследовательского флота. Кроме обеспечения количественной оценки обнаруживаемых концентраций гидробионтов, средства рыбохозяйственной гидроакустики позволяют получать информацию о пространственно-временном распределении скоплений рыб и других промысловых объектов, о рельефе дна и характеристиках донных грунтов.

Российскими рыбохозяйственными НИИ проводились работы по оценке возможностей использования гидроакустической информации промысловых судов для оценки состояния запасов рыб, в т. ч. и ВНИРО [Юданов, 1992]. Принимая во внимание большие возможности обследования акваторий, которые предоставляет использование промысловых судов Кузнецовым [2001] была разработана методика прямого учета запаса минтая в Охотском море, основанная на проведении акустико-траловых съемок с визуальным анализом и оценкой цветных эхограмм дисплея рыбопоисковой аппаратуры во всей толще воды и в обловленном слое. Практически данная методика использовалась

им при ежегодных съемках в указанном районе с 1996 по 2001 гг. Количество акустических галсов многократно превышало число тралений. Относительно оценки достоверности данных в работе Кузнецова и др. [2008] делаются следующие выводы: «О малой погрешности регистрации акустической записи свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции между полученными индексами обилия и фактическими уловами, сходные показатели при повторной регистрации одних и тех же скоплений. Ввиду большого числа акустических регистраций выборочная погрешность проведенных съемок существенно ниже, чем таковая траловых съемок». К сожалению, визуальная обработка цветных эхограмм очень трудоемка и требует большого опыта оператора, что обусловило ограниченность ее практического применения. Не исключена в данном случае и определенная субъективность при работе с некалиброванной и разнотипной промысловой рыбопоисковой аппаратурой.

В СевНИИРХе была разработана аппаратура «АСКОР» [Дегтев, Ивантер, 2002], обеспечивающая автоматическое накопление и хранение акустических данных промысловый рыбопоисковой аппаратуры вертикальной локации. Она прошла натурные испытания и успешно используется в ряде внутренних водоемов, в т. ч. на Байкале при количественной оценке запасов байкальского омуля [Кудрявцев, Дегтев, Соколов, 2005; Гидроакустический учет ресурсов байкальского омуля / Под редакцией В.И. Кудрявцева (и один из авторов), Дзюбы Е.В. Коллективная монография. 2009], а также при определении запасов ламинариевых водорослей в Белом море [Пронина, Дегтев, Кудрявцев, Воробьев, 2004].

На основе аппаратуры «АСКОР» предлагалось создание отраслевой системы гидроакустического мониторинга с промысловых судов для информационного обеспечения российского промышленного рыболовства [Кудрявцев, 2006, 2008]. Однако сложность создания универсального устройства, которое должно подключаться к любой уже установленной на российских промысловых судах достаточно разнотипной рыбопоисковой аппаратуре, а, главное, необходимость соответствующих согласований с разными ее изготовителями, затруднили практическую реализацию предложенной системы.

Тем не менее, при современном состоянии запасов биоресурсов задача создания эффективной системы гидроакустического мониторинга гидробионтов с промысловых судов несомненно является актуальной для органов управления российским промышленным рыболовством, особенно в связи с обширностью наших водных промысловых пространств и небольшим количеством рыболовных НИСов.

Крупномасштабный сбор гидроакустических данных с промысловых судов позволит решить прежде всего две важнейшие задачи: проводить первичную оценку промысловой обстановки в районе промысла и получать дополнительную информацию для контроля за местоположением промысловых судов. Координаты о местоположении рыболовных судов, получаемые береговыми центрами через технические средства контроля (ТСК), могут автоматически дополняться текущими данными о глубине под судном. Кроме этого, учитывая предполагаемый непрерывный режим регистрации гидроакустических сигналов, по результатам обработки запомненных эхограмм (в пост-процессинговом режиме) можно судить о режимах работы судна: судно на переходе; судно в процессе траления; судно в дрейфе. Такая информация позволит в центрах связи и мониторинга косвенно контролировать производственную деятельность рыболовных судов и поможет выявлять недостоверные данные, отправляемые в суточных судовых донесениях.

На качество и объективность акустической информации с промысловых судов влияет разнотипность применяемых эхолокационных устройств, нередкое несоответствие имеющихся и устанавливаемых параметров аппаратуры требованиям контроля состояния запасов, в частности диапазонов просматриваемых глубин.

Практика использования гидроакустической аппаратуры рыбопромысловых судов для оценки состояния запасов биоресурсов имеется в целом ряде стран с развитым промышленным рыболовством. В своем докладе на Рабочей группе WGFAST в [Karp W.,

2003], текст которого был включен в отчет [ICES, 2007], отмечал, что у научных сотрудников, занимающихся оценкой запасов биоресурсов, часто отсутствует достаточная информация для оценки ситуации с промысловыми запасами и выдачи обоснованных рекомендаций по величине максимально допустимого вылова. Даже при наличии надежных данных об уловах и результатов обширных по времени съемок остаются вопросы относительно временного и пространственного распределения гидробионтов. Он указывает, что акустические данные, получаемые во время обычных промысловых операций на рыболовных судах, также должны использоваться при оценках запасов и управления ими.

Имеются различные подходы к сбору акустических данных с промысловых судов: от получения субъективных данных об относительном запасе с помощью некалиброванных эхолотов вертикального действия до получения абсолютных оценок биомасс с помощью калиброванных промышленных или научных акустических рыболокаторов, соединенных с запоминающими устройствами. В некоторых случаях промысловые операции судна модифицируются для обеспечения большего пространственного перекрытия. В отчете Рабочей группы ICES SGAFV [2007] и отчете ИКЕС [ICES Coop. Res. Rep. N287, 2007] были рассмотрены методы сбора гидроакустической информации с помощью промысловых судов для контроля и мониторинга отдельных запасов биоресурсов в Перу, Чили, Канаде и ряде других стран.

В указанном отчете [ICES, 2007] приводится пример широкомасштабного использования промысловых судов при акустическом картировании распределения ставриды вдоль побережья Чили. Результаты использовались для определения районов с большими концентрациями рыбы для решения задач управления промыслом и определения индексов запаса. Указанный проект был начат в конце 90-х гг. Участвующие суда выполняли акустические галсы и собирали выборки для идентификации видов и выполнения других научных задач. После завершения цикла работ эти суда реализовывали некоторые специальные квоты в течение задаваемого ограниченного периода квот на вылов. На борту каждого судна находились два научных сотрудника и ответственные за сбор акустических данных и информации об уловах. Руководитель проекта дважды в сутки принимал отчеты с каждого судна. Как указывают [Barbieri and Cordova, ИКЕС, 2007], ставрида распределяется на больших пространствах Чилийского побережья, что не позволяет выполнить обычные широкомасштабные съемки НИС. С 1997 г. проводятся широкомасштабные съемки с использованием от 6 до 15 рыбопромысловых судов одновременно, получая данные об относительных акустических оценках и биологические данные об икре и личинках. Съемки выполнялись в два этапа. В процессе первого этапа проводилось картирование пространственного распределения ставриды 17-ю судами по большому району. Каждое судно картировало присутствие ставриды, основанное на качественных акустических регистрациях аппаратурой вертикального действия вдоль нескольких предварительно заданных трансект. При этом суда определяли зоны более высокой плотности, как они обычно это делают во время промысловых работ. Все галсы выполнялись в течение временного периода, примерно равного одной неделе. На основе полученных данных проводилась обычная акустическая съемка промысловыми судами, оснащенными научно-исследовательскими эхолотами вертикального действия EK60. Использование результатов картирования первого этапа давало возможность разработки более качественного проекта съемки на втором этапе, что впервые позволило установить, что примерно 50% запаса распределяется вне экономической зоны.

Перуанская программа EUREKA включала выполнение быстрых крупномасштабных съемок перуанского анчоуса с использованием 25–50 рыбопромысловых судов, зафрахтованных перуанским Агентством по рыболовству (IMARPE), со сбором акустических данных рыбопоисковой аппаратуры. Как указывает [Gutierrez M., ICES, 2007], съемки EUREKA оказались полезными для мониторинга районов нереста и обитания молоди, определения районов промысла, измерения относительных акустических характеристик и наличия необходимых видов, а также определения локальных или реги-

ональных характеристик и условий среды. Каждому из участвующих судов выделялась задача перекрытия двух или трех параллельных или треугольных зигзагообразных галсов, сбор океанографических данных и проведение обловов, как это делается во время обычных ГАС. Благодаря большому количеству судов необходимая зона исследований могла быть полностью перекрыта в течение 2–3 сут. Участвующим судам разрешалось ловить рыбу без ограничения в течение периода съемки. Это представляло интерес для участников, т. к. съемки EUREKA обычно проводились в период, когда рыболовный сезон был еще закрыт.

Решение о прекращении промысла основывается на нескольких факторах, включая достижение выделенной квоты, появление большого количества молодежи в коммерческих уловах и др. Принимаемые решения базировались на совместном анализе биологической, океанографической и акустической информации, что позволяло в определенной мере избегать конфликтных ситуаций. На каждое судно, участвующее в съемках EUREKA, назначались три научных наблюдателя: гидроакустик, ихтиолог и океанограф (акустики использовали акустическое оборудование, имеющееся на промысловом судне). Общей практикой для участвующих кампаний являлась оплата наблюдателей и покупка необходимого оборудования, что минимизировало издержки IMARPE. Программа EUREKA была инициирована IMARPE и частными рыболовными кампаниями для быстрого и экономически разумного сбора промысловой, ихтиологической, океанографической и гидроакустической информации, чтобы строить широкомасштабные карты распределения пелагических рыб, в основном, анчоуса. В последние годы она также используется для придонного промысла. Эта программа существует уже свыше 39 лет, в течение которых было выполнено 65 съемок до 2007 г., хотя она приостанавливалась в период между 1982 и 1991 гг.

Съемки EUREKA используются при решении следующих вопросов:

- когда выполнение рыболовной квоты достигается, результаты ее используются для оценки возможности установления новой;
- для нахождения районов промысла, особенно во время зимнего периода, когда все основные рыбные ресурсы имеют тенденцию распределяться по более широкому водному пространству;
- для установления периода, когда новые океанографические условия (например, связанные с течением El Nino) могут влиять на стабильность промысловых операций;
- для определения окончания периода нереста (в течение периодов нереста промысел закрывается).

Основная работа при выполнении съемки EUREKA состоит в заполнении бортового журнала для описания морфологии и относительной акустической плотности рыбных косяков в единицах выборок на одну морскую милю. Это работа проводится научными наблюдателями на борту 25–50 рыболовных судов, которые обычно должны выполнить два галса протяженностью от 100 до 300 морских миль. Это делается для того, чтобы перекрыть весь район распределения ставриды. Однако имеются погрешности в описании пространственных структур косяков рыбы: слишком многие наблюдатели неизбежно допускают ошибки в расчетах, большей частью, относительных значений); имеется различный уровень умения среди наблюдателей, что иногда делает обработку данных проблематичной; трудно полностью сосредотачивать внимание наблюдениями за экраном эхолота в течение всей съемки.

Несмотря на эти недостатки, программа EUREKA является экономически эффективной и полезной для управления процессами промысла и для научных применений, например, оценки динамики зон высокой рыбной продуктивности.

Данная программа может быть усовершенствована, если использовать акустические автономные устройства АЧЯ (акустические «черные» ящики), для сбора акустических данных и исключения ошибок при визуальных наблюдениях эхограмм. Это позволило бы более опытным наблюдателям больше концентрироваться на анализе данных, используя программные средства вместо простой регистрации на борту судов.

Кроме программы EUREKA, имеется программа спутникового мониторинга (SISESAT), которая могла бы использовать данные с «черных» ящиков. Рыбопромышленная деятельность примерно 1000 рыболовных судов, оборудованных спутниковыми устройствами в Перу, контролируется агентством IMARPE по закону 1998 г., который обязывает иметь на борту указанный вид оборудования для защиты сезонов нереста, зон нагула и др. мест. Это сделало бы возможным постоянное использование «черных ящиков» на борту большего количества судов, чем лишь тех, которые используются при съемках по программе EUREKA.

Некоторые запасы сельди восточного побережья Канады оцениваются и управляются с 1997 г. на основе акустических данных, собранных с множества рыбопромышленных судов. Эта программа полностью финансируется сельдевой промышленностью и обусловлена необходимостью получения информации в связи с ощутимым снижением общего нерестующего запаса сельди [Claytor, 2001]. До недавнего времени значительная часть сельдяного промысла в основном проводилась на нерестующих концентрациях для японского рынка икры. Оценка запаса базировалась на виртуальном анализе популяции, основанном на показателях обилия личинок. В 1994 г. было зарегистрировано падение запаса. В результате допустимый вылов был сокращен с 151 000 до 80 000 т в 1995 г. и далее был сокращен до 57 000 т в 1996 г. Это привело к необходимости проведения объединенных исследований для лучшего понимания причин спада и разработки стратегии повышения уровня запаса. Была организована комиссия из научных сотрудников и правительственных управленцев, а также представителей рыболовных кампаний и капитанов судов, которые должны были выработать рекомендации по данной проблеме. Основной рекомендацией комиссии была разработка и реализация протокола «Съемка, Оценка, затем Промысел» [Melvin et al., 2002].

Практическая реализация выработанных предложений оказалась трудно-выполнимой, особенно в связи с отсутствием технических средств для оценки биомасс. Первоначально было предпринято проведение до начала открытия промысла серии гидроакустических съемок рыболовными судами нерестовых концентраций сельди в основных районах нереста. Съемки проводились по заранее спланированным параллельным сеткам галсов, равноудаленных друг от друга, в пределах задаваемого района [Melvin et al., 2002]. Акустические наблюдения и местоположения судов регистрировались на каждом судне каждые несколько минут. По завершении съемки научными сотрудниками и капитанами судов распределения сельди в относительных акустических величинах наносились на планшет. Такие скорее качественные (не количественные) оценки давали некоторый механизм для мониторинга общего запаса нерестующей сельди перед открытием района для промысла. Представлялось, однако, что оценки распределения биомассы были достаточно субъективными, в научном отношении не вполне корректными и приводили к неопределенности в оценке состояния запаса.

Указанная неопределенность в оценке биомасс привела к разработке автоматической калибруемой акустической системе регистрации. Первые две системы были установлены и испытаны в 1996 г., а первые ГАС были проведены осенью 1997 г. До 2007 г. [ИКЕС, 2007] на флоте развернуто девять таких систем, три системы были приобретены за счет правительственных средств и остальные закуплены рыбопромышленностью. За ежегодную калибровку отвечают владельцы этих систем. С 1999 г. гидроакустические оценки биомассы сельди играют основную роль при определении ее запаса. Ежегодно выполняются многочисленные съемки основных нерестовых районов с использованием на всех судах стандартных протоколов съемки [Melvin and Power, 1999]. Получаемые данные накапливаются и используются при научной оценке запасов. Время судна для проведения съемки оплачивается рыбной промышленностью в рамках совместного соглашения между рыбной промышленностью и правительством. Отчеты о предварительных результатах данной съемки представляются заинтересованным лицам в пределах недели после ее окончания.

Наиболее пригодным и целесообразным решением проблемы глобального акустического мониторинга как в отношении качества получаемой информации, так и с технической и экономической точек зрения представляется автоматический регистратор гидроакустических данных (АРГД), состоящий из генератора зондирующих импульсов, приемника-усилителя эхосигналов, блока аналого-цифрового преобразования эхосигналов, акустической антенны (целесообразнее, как минимум, двухчастотной), процессора и модуля памяти для хранения записанных гидроакустических сигналов. Он будет накапливать гидроакустическую информацию без участия человека. Такое гидроакустическое устройство будет являться одним из основных составных элементов отраслевой автоматизированной системы, предназначенной для повышения достоверности распределения биоресурсов по промысловым районам [Кудрявцев, Гончаров, Долгов, 2008; Гончаров, Долгов, Кудрявцев, 2009].

В общем могут быть два варианта дальнейшего использования информации, получаемой с помощью АРГД. Она может передаваться в отраслевой центр обработки по приходу судна в порт или дистанционно непосредственно с судна. В случае необходимости оперативного контроля промысловой обстановки и управления промыслом, конечно, целесообразна непосредственная ее передача с промысловых судов в центр обработки. При современном уровне развития радиоэлектронных средств передачи данных (в т. ч. со сжатием информации) данная задача технически вполне осуществима. Передачу на береговой центр могут обеспечить спутниковые системы, на флагманское судно руководителя промысла – можно осуществить с помощью УКВ или ПВ радиосистем. Однако из-за больших объемов в первом случае пока возникают экономические ограничения, во втором также и необходимость наличия у руководителя промысла групп обработки и анализа данных. Существенно меньшие затраты будут, если ограничиться передачей только результатов эхоинтегрирования.

В то же время для решения задач оценки состояния запасов непосредственная передача указанной информации с судов в принципе не является необходимой и поэтому пока можно ограничиться передачей запомненных данных в центр обработки после завершения рейса.

В ситуации с получением и накоплением такой информации от n -го количества судов для ее статистической обработки необходима разработка соответствующей методики. Это связано с получением в данном случае большого массива акустических выборок (или с сопутствующей информацией) по времени и пространству. Эти данные должны определенным образом группироваться. Соответственно, методика должна включать селекцию получаемой информации (выбор наиболее пригодных данных) с учетом мест, периодов и времени сбора, а также других особенностей. Важной задачей при этом является отработка методов определения корректирующих коэффициентов. По мере накопления банка данных для определения коэффициентов коррекции может использоваться и информация, полученная в предшествующие годы или сезоны.

Постоянное накопление банка акустических данных о плотности скоплений, динамике пространственных и временных изменений концентраций, их распределении несомненно положительно скажется на достоверности оценки состояния запасов и прогнозирования.

В отличие от судовой рыбопоисковой аппаратуры АРГД работает автономно (при включении на судне бортового электропитания). Если РПА работает под управлением оператора, то вмешательство судового персонала в работу АРГД полностью исключено. Для «привязки» гидроакустических данных к местоположению судна в АРГД должен быть предусмотрен ввод данных от спутниковой навигационной системы (GPS/GLONASS). После преобразования отраженного гидроакустического сигнала из аналогового вида в цифровой и выделения донной составляющей с целью определения глубины производится его запись в модуль памяти. Гидроакустические сигналы в АРГД записываются в необработанном («сыром») виде. Запись гидроакустических сигналов

должна проводиться с момента выхода рыболовного судна из порта и до его возвращения в порт. По прибытии судна в порт представителями соответствующей отраслевой службой (это может быть региональный информационный центр (РИЦ)) необходимо провести изъятие записанных данных и их передачу в отраслевой информационный центр системы мониторинга для обработки собранных данных и построения карт распределений рыбных концентраций в промрайонах. Построение карт распределений рыбных концентраций можно проводить по информации как одного из судов, так и по всем судам, оснащенным АРГД, работающим в одном районе. Чем больше судов будут оснащены АРГД, тем распределение рыбных запасов будет достовернее.

При установке на судне АРГД должен быть предварительно откалиброван, и все калибровочные данные должны быть внесены в его оперативную память. В дальнейшем периодическую калибровку целесообразно проводить в автоматическом режиме – режиме автокалибровки (на предварительно подготовленном в порту полигоне) с участием представителя РИЦ, который будет осуществлять запуск АРГД при отходе судна в промысловый рейс.

Возможные схемы организационного решения указанной проблемы уже опробованы на практике, как выше указано, органами управления рыболовством некоторых стран.

13.9. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ (МНОГОКАНАЛЬНОЙ) ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ И ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ЭХОСИГНАЛОВ (ЭХОГРАММ)

При стандартной гидроакустической количественной оценке состояния запасов промысловых рыб в ситуациях с косячными и смешанными скоплениями нередко имеют место сложности с выделением и оценкой косяков в получаемых эхограммах, что может приводить к уменьшению достоверности и снижению точности получаемых результатов в сравнении с оценками в ситуациях с достаточно разреженными концентрациями. В связи с этим появлялись предложения по использованию и других методов количественной оценки косячных скоплений с помощью гидроакустических средств.

В частности, Кадильниковым [2001] была разработана методика расчета плотности заселения для оценки состояния запасов косячных рыб. Эта методика была проверена при ручной обработке эхограмм самопишущего регистратора рыбопоисковой аппаратуры (РПА) «Крупн-Атлас», собранных в рейсах НИС АтлантНИРО. АтлантНИРО и МариНПО была разработана аппаратура автоматического определения горизонтальных и вертикальных протяженностей сечений косяков и стай рыб, а также их количества (при подключении ее к рыбопоисковой эхолокационной аппаратуре). Результаты были положительные, однако в силу известных финансовых обстоятельств 90-х гг. данные работы дальнейшего развития не получили.

Качественные выделения и количественная оценка отдельных косяков в рыбных концентрациях важны не только для обеспечения более корректных результатов при гидроакустических съемках, но и при промысловом использовании рыбопоисковой аппаратуры, а также и при различных ихтиологических исследованиях. Поэтому указанному вопросу уделялось серьезное внимание. Был разработан широко используемый в различных программах постобработки алгоритм для коррекции измерений размеров косяка, обусловленных расширением фронта акустической волны антенн рыбопоисковой аппаратуры (которые смещаются из-за увеличения характеристики направленности с глубиной) [Diner, 1999, 2001]. Он был применен в версии одной из первых программ постобработки MOVIES под названием MOVIES B [Weill et al., 1993].

Гидроакустическое обнаружение косяка определяется как некоторая совокупность (серия) акустических выборок, формирующих эхограмму. В серию выборок для каждого обнаружения включаются лишь те, которые имеют амплитудные значения, превышающие пороговое значение эхоинтегратора. Они должны также удовлетворять закону не-

прерывности как по вертикали, так и горизонтали, т. е. как в пределах каждого цикла лоцирования, так и от текущего цикла к предыдущему.

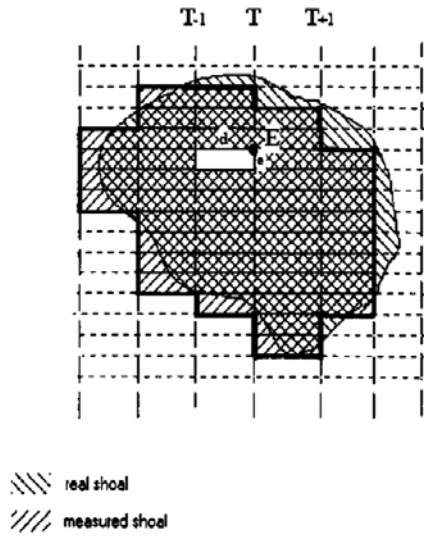


Рис. 13.46. Схема цифрового преобразования акустического отображения косяка на эхограмме при вертикальной локации рыбопоисковой аппаратурой с одной характеристикой направленности

Для каждого обнаружения косяка рассчитывается набор количественных параметров (описателей), которые могут использоваться в качестве входных данных при статистическом анализе и классификации. На рис. 13.45 показаны схемы определения основных параметров и характеристик косяка при вертикальном озвучивании одноканальной рыбопоисковой аппаратурой. Схема цифрового преобразования акустического отображения сечения косяка и определения его характеристик представлена на рис. 13.46. Прямоугольник, обозначенный буквой E, ассоциируется с элементарной выборкой, T – циклы лоцирования.

В отличие от обычных эхограмм, формируемых при последовательном вертикальном зондировании водной среды аппаратурой с одной ХН, при применении электронно-сканирующих гидролокаторов кругового и секторного обзора обеспечивается квазиодновременное акустическое отображение поперечных сечений косяка за один цикл локации. В результате может быть достигнуто более качественное выделение косяков и их оценка.

В работе [Trygonis et al., 2009] приводится схема оцифрованного акустического отображения сечения косяка при работе с гидролокатором SP90, имеющим специальный

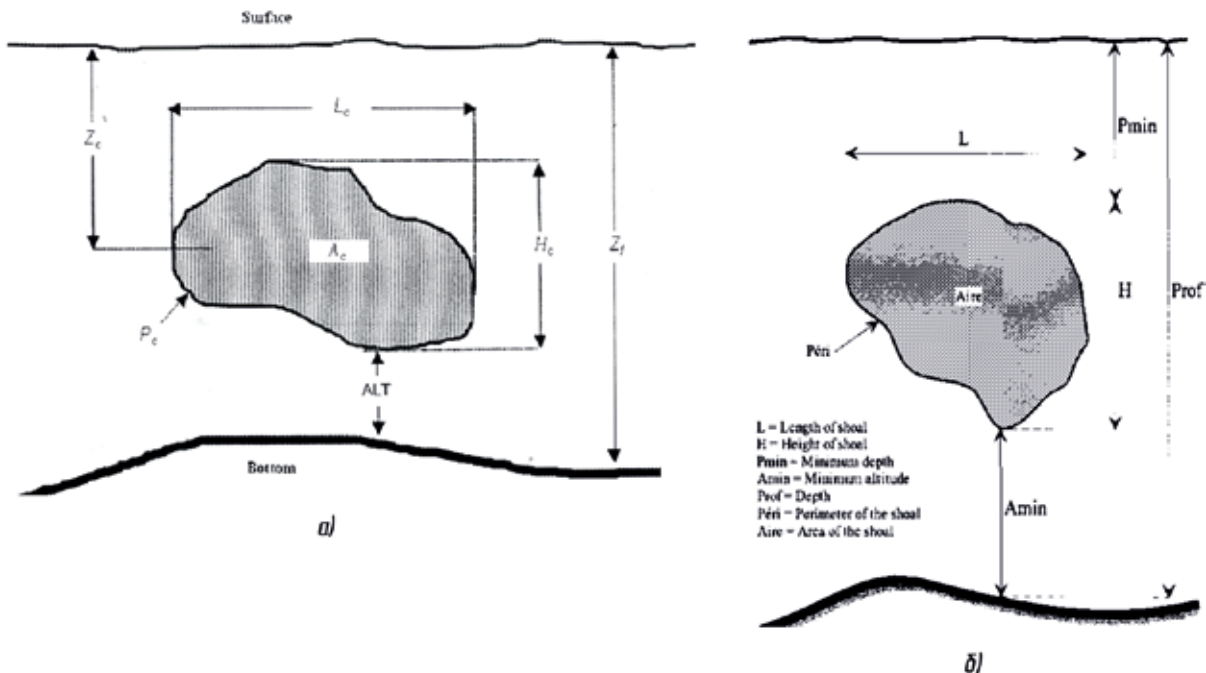


Рис. 13.47. К определению основных параметров и характеристик косяка при вертикальном озвучивании одноканальной рыбопоисковой аппаратурой: а) Z_c – глубина нахождения центра косяка; L_c – протяженность косяка по ходу движения судна; H_c – протяженность косяка по вертикали; P_c – периметр; ALT – минимальное расстояние косяка от дна; A_c – площадь сечения косяка; Z_l – глубина места; б) – обозначения на рисунке

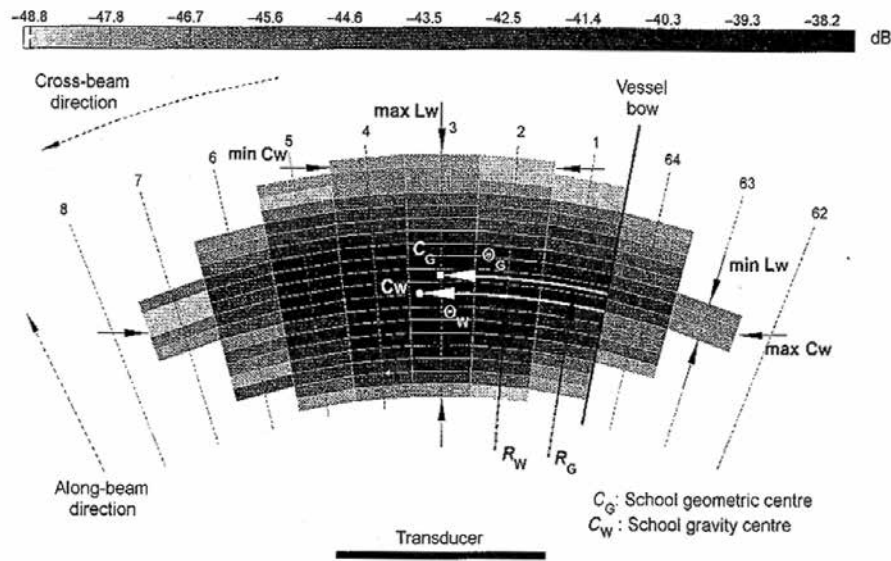


Рис. 13.48. Схема оцифрованного акустического отображения сечения косяка электронно-сканирующим многоканальным рыбопоисковым гидролокатором при излучении в горизонтальной или наклонной плоскостях с обозначениями основных характеристик косяка. Черно-белая шкала акустических пикселей соответствует их энергетическим параметрам. Размер каждого пикселя определяется размерами выборок в направлении излучения и в поперечном сечении характеристики направленности

«научный» выход для акустических измерений косяков (рис. 13.48), и индикация обозначений описателей (характеристик) косяков с помощью разработанного алгоритма SCHOOL.

Гидролокатор SP90 может работать в диапазоне частот 20–30 кГц (с шагом 1 кГц). Цилиндрическая многоэлементная антенна за один цикл лоцирования озвучивает 360°. Одновременный наклон ХН обеспечивается в пределах от +10 до –60°. В режиме приема в SP90 формируются 64 ХН и обеспечивается получение 256 акустических выборок в пределах каждой ХН с углами 11° в горизонтальной плоскости и 9° в вертикальной (на уровне 3 дБ). Предусмотрена стабилизация их положения при бортовой и килевой качке судна. Кодированный приемный тракт SP90 с многоцветным отображением эхосигналов на дисплее всегда имеет динамический диапазон порядка 30 дБ в логарифмической шкале ступенями по 0,5 дБ, а именно $30/64 \approx 0,5$ дБ (всего 64 ступени – 0–63), где нулевое значение соответствует наименьшему эхо, а 63 – максимальному.

На экране дисплея SP90, кроме текущего цикла локации, с использованием модуля «Multibeam Sonar Tracer» программы обработки может отображаться и ряд предстоящих, а также множество самой различной дополнительной информации (см. рис. 13.48).

Морфометрические описатели акустического изображения косяка соответствуют наблюдаемым двумерным горизонтальным характеристикам сечения косяка (рис. 13.49), таким, как их размеры вдоль и поперек каждой из ХН, форма и площадь сечения (табл. 13.12). Для каждого обнаруженного косяка расчет морфометрических описателей зависит от двух промежуточных параметров, ширина вдоль ХН, Lw_b , для характеристики b и ширины поперек ХН, Cw_s , для круговой дистанции выборки S :

$$Lw_b = \Delta r N S_b, \text{ м}, \quad (13.48)$$

где $\Delta r = (\text{диапазон сонара}/256)$ – размер выборки вдоль характеристики направленности (м) и $N S_b$ – ширина косяка вдоль характеристики направленности в характеристике b , измеряемая в числе акустических выборок, для всех выборок, принадлежащих этому косяку, включая пустые выборки или пустоты [Freon et al., 1992; Gerlotto et al., 2006]. Параметр Cw_s представляет некоторую хорду поперек всех характеристик направлен-

ности, охватывающих этот косяк, отдельно для каждой круговой дистанции выборки S :

$$Cw_s = 2\Delta r R_s \sin(n_n \Delta\theta / 2) \text{ (м)}, \quad (13.49)$$

где R_s – некоторое положительное число в диапазоне от 1 до 256, измеряемое количеством выборок на дистанции S между акустической антенной и соответствующей выборкой эха при круговом сканировании ХН; n_b – количество ХН, охватывающих косяк на круговом расстоянии S ; $\Delta\theta$ – размер выборки поперек ХН в градусах, рассчитываемый как $\Delta\theta = 360^\circ / 64 = 5,625^\circ$.

Затем рассчитывается ряд морфометрических описателей косяка, касающихся статистических характеристик (максимум, минимум и среднее) размеров косяка вдоль ХН (Lw) и поперек ХН (Cw) (табл. 13.12). Дальнейшими морфометрическими описателями являются количество выборок эха, принадлежащих этому косяку (n_s), площадь сечения этого косяка (A) в горизонтальной плоскости осей ХН, которые оцениваются как число выборок n_s , составляющих этот косяк, а также площадь выборки, в которой находится геометрический центр косяка (C_G).

Энергетические описатели косяка рассчитываются посредством первого трансформирования силы объемного обратного рассеяния $S_v(i)$, для i -й выборки косяка к некоторому коэффициенту объемного обратного рассеяния [MacLennan et al., 2002]:

$$S_v(i) = 10^{Sv(i)/10}, \text{ м}^{-1}.$$

$S_v(i)$ в указанной работе определяется как:

$$S_v(i) = S_{vCS}(30/64) - G_R - 3G_D,$$

где $S_{vCS} = G_R + G_{TVG} + G_D + S_{vm}$; G_R , G_{TVG} , G_D , S_{vm} – соответственно, усиление приемного тракта, усиление ВАРУ, усиление дисплея и измеренная сила объемного рассеяния до действия ВАРУ.

Среднее обратное объемное рассеяние косяка является тогда средним поперек всех n_s выборок:

$$\hat{S}_v = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_s} S_v(i), \text{ м}^{-1}, \quad (13.50)$$

и выделяется также некоторое количество энергетических описателей косяка, таких как средняя акустическая плотность S_{vcp} , максимальная акустическая плотность $S_{v\max}$, сумма акустического объемного обратного рассеяния ΣS_v , и вариация акустической плотности в пределах косяка $S_{v\text{вар}}$ (табл.13.12).

Что касается описателей (характеристик) положения, то вначале оценивается радиальное положение геометрического центра косяка (среднее расстояние до косяка, $R_{G, cp}$):

$$R_{G, cp} = \Delta r \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} R_s(i) \text{ (м)}, \quad (13.51)$$

а также угловое положение геометрического центра косяка (среднее положение ХН, $\Theta_{G, cp}$) относительно носа судна, где ХН #1 SP90 находится:

$$\Theta_{G, cp} = \theta_{\text{смещ. offset}} + \Delta\theta \left[-0,5 + \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \text{характ.направл-ти}(i) \right] \text{ (град)}, \quad (13.52)$$

где $\theta_{\text{смещ. offset}}$ – угловое смещение установки гидролокатора в градусах, и $\text{ХН}(i)$ – это величина, соответствующая числу характеристик направленности $[1, \dots, 64]$, которые перекрываются всеми n_s выборками эха от косяка. Отмечается, что положительное направление для $\Theta_{G, cp}$ соответствует направлению против часовой стрелки, подобно тому, как нумеруются ХН SP90 на рис. 13.48.

Таблица 13.12. Сводная таблица символов и выражений для определения выбранных в указанной работе описателей косяка (подробности приводятся в тексте)

Переменная	Определение	Единица	Формула
<i>Описатели файла</i>			
ID_p	Последовательность циклов лоцир-ия	—	—
Lat_{VL}	Долгота судна	градусы	—
Lon_{VL}	Широта судна	-«-	—
H_{VL}	Курс судна	-«-	—
U_{VL}	Скорость судна	м/с	—
t_{UTC}	Время	часы: мин: сек: мс	—
<i>Описатели сонара</i>			
R	Диапазон наблюдения сонара	м	—
T	Угол наклона характеристик	градусы	—
G_{Rpp}	Усиление приемника	дБ	—
G_{BAPU}	ВАРУ	дБ	—
G_{AGC}	AGC	выключено, слабое, среднее, сильное	—
Входные параметры модуля КОСЯК			
ID_k	Косяк ID	—	—
Thr_C	Порог	дБ	—
$T_{вдоль}$	Допуск вдоль характеристик направленности	выборки или м	—
$T_{поп-к}$	-«- поперек -«-	-«- или градусы	—
<i>Морфометрические описатели</i>			
n_b	Колич-во выборок	—	—
Lw_b	Протяженность эха вдоль одной ХН	м	$Lw_b = \Delta r N S_b$
Cw_s	Протяженность эха от косяка поперек ХН на круговом расстоянии s	м	$Cw_s = 2 \Delta r R_s \sin(n_s \Delta \theta / 2)$
макс. Lw	Максимальная протяженность эха вдоль ХН	м	макс $Lw_s = \text{макс} (Lw_b)$
мин. Lw	Минимальная протяженность эха вдоль ХН	м	мин. $Lw = \text{мин} (Lw_b)$
средняя Lw	Средняя протяженность эха вдоль ХН	м	средняя $Lw = \text{средн.} (Lw_b)$
макс. Cw	Максимальная протяженность эха поперек ХН	м	макс $Cw = \text{макс.} (Cw_s)$
мин. Cw	Минимальная протяженность эха поперек ХН	м	мин. $Cw = \text{мин.} (Cw_b)$
средняя Cw	Средняя протяженность эха поперек ХН	м	средняя $Cw = \text{средняя} (Cw_b)$
A	Площадь сечения косяка	m^2	$A = \Delta r \Delta \theta_m (C_G) n_b$
Энергетические описатели			
средняя S_v	Средняя акустическая плотность	дБ	средняя $S_v = 10 \log_{10}(\xi_v)$
макс-я S_v	Максимальная акустическая плотность	дБ	макс. $S_v = (S_v(i))$
ΣS_v	Сумма объемных рассеивателей	m^{-1}	$\Sigma S_v = \sum_{i=1}^n s_v(i)$
$vars_v$	Вариация обратного рассеяния	—	$\text{var } s_v = (n \sum s_v^2 \sum s_v^2) / [n_s (n_s - 1)]$

Окончание табл. 13.12.

Переменная	Определение	Единица	Формула
<i>Описатели положения</i>			
R_G	Расстояние до косяка	м	$R_G = \Delta r_1 / n_s \sum_{i=1}^{n_s} R_{s(i)}$
Θ_G	Среднее положение ХН	градусы	$\Theta_G = \theta_{\text{оффсет}} + \theta[-0,5 + 1 / n_s \sum_{i=1}^{n_s} \text{хар.напр.}(i)]$
R_w	Взвешенное расстояние до косяка	м	$R_w = \Delta r \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_s} s_v(i)} \sum_{i=1}^{n_s} R_{s(i)} s_v(i)$
Θ_w	Взвешенное положение характер-ки напр-ти	градусы	$\Theta_w = \theta_{\text{оффсет}} + \Delta\theta[-0,5 + \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_s} s_v(i)} \sum_{i=1}^{n_s} \text{хар.напр.}(i) s_v(i)]$
$X_G Y_G$	ху-расстояние до гидролокатора	м	$x_G = \sin(H_G) R_G, y_G = \cos(H_G) R_G$
Lat_G	Геометрическая широта косяка	градусы	$Lat_G = Lat_{VL} + Y_G / (60 \times 1852)$
Lon_G	Геометрическая долгота косяка	градусы	$Lon_G = Lon_{VL} + X_G / [60 \cos(Lat_{VL}) \times 1852]$
Lat_w	Взвешенная широта косяка	градусы	$Lat_w = Lat_{v1} + Y_w / (60 \times 1852)$
Lon_w	Взвешенная долгота косяка	градусы	$Lon_w = Lon_{w1} + X_w / [60 + \cos(Lat_w) \times 1852]$

Соответствующими описателями (характеристиками) (табл. 13.12), которые принимают во внимание объемное обратное рассеяние выборок косяка, являются взвешенное расстояние до косяка (R_w) и взвешенное положение характеристики направленности (Θ_w). Далее оценивается географическое положение этого косяка посредством объединения вышеуказанных описателей с навигационными данными судна, содержащимися в научном выходе SP90 (гирокомпасное направление судна H_{Ci} и спутниковые координаты судна – широта_c и долгота_c, все единицы в градусах). Эти параметры относятся к различным координатным системам, требуя некоторого промежуточного преобразования до окончательного расчета описателей. Географический центр направления на косяк (H_G) в градусах относительно севера тогда определяется как:

$$H_G = (H_C - \Theta_G), \text{ если } H_G \geq 0; \quad (13.53)$$

$$H_G = (H_C - \Theta_G + 360), \text{ если } H_G < 0$$

и дистанция в метрах до геометрического центра косяка вдоль x и y осей географических координат будет $X_G = \sin(H_G) R_G$, и $Y_G = \cos(H_G) R_G$, где положительными направлениями осей x и y являются восток и север, соответственно, центрированные к судну. Так как 1 м в x направлении эквивалентен $1 / [60 \times \cos(\text{долгота}_{\text{судна}}) \times 1852]$ градусам по долготу, и 1 м в направлении y есть $1 / (60 \times 1852)$ градусов по широте, то может быть рассчитано географическое положение геометрического центра этого косяка (долгота_c, широта_c) (табл. 13.12). Подобным способом, используя взвешенные значения R_w и Θ_w , выделяются соответствующие взвешенные описатели X_w, Y_w, Lon_w и Lat_w .

Развитие многоканальной электронно-сканирующей эхолокационной гидроакустической аппаратуры одновременного кругового и секторного обзора позволило обеспе-

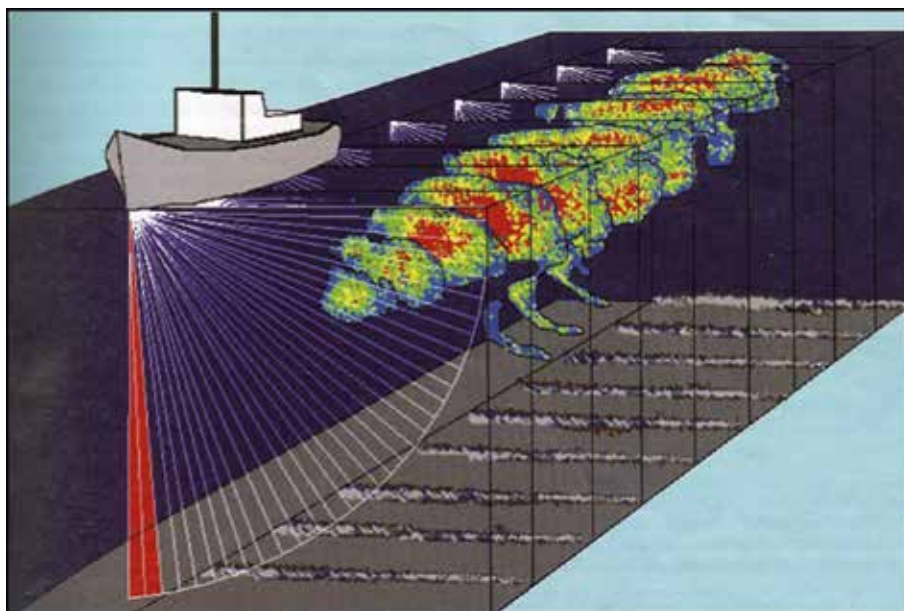


Рис. 13.50. К формированию трехмерных отображений при использовании электронно-сканирующих гидролокаторов

чить более качественную реализацию трехмерных изображений косяков и стай рыб. Это выполняется посредством сканирования ХН в вертикальной плоскости в пределах до 90° перпендикулярно направлению движения судна по одному или обоим бортам (рис. 13.49) [Gerlotto, 1999]. При движении судна обеспечивается получение последовательных акустических сечений косяка, которые с помощью соответствующей программы обработки преобразуется в его трехмерное отображение (рис. 13.50).

Несколько программных средств было разработано для выделения морфологических и энергетических описателей рыбных косяков в 2D [Weill et al., 1993; Coetzee, 2000] и от гидролокаторов в 3D [Lecornu, 1998; Gerlotto, 1999; Brehmer et al., 2007]. Для выделения косяков в ППС Мовис 3D используются подобные входные параметры как в режимах обработки 2D, так и 3D. Единственным дополнительным входным параметром является максимальная дистанция в поперечном направлении. Элементарным элементом разрешения в 2D алгоритмах является pixel. В качестве такого элементарного элемента алгоритма обработки в режиме 3D в работе [Trenkel et al., 2009] предложен voxel. Объем voxel увеличивается с глубиной и зависит от ширины ХН.

Современные эхолокационные системы с электронным сканированием с более высокой разрешающей способностью по углу и дистанции позволяют обеспечивать более качественное определение характеристик косяков и стай рыб, их структуру, а также выделение и количественную оценку. В качестве примеров можно привести системы одновременного секторного обзора SEAPIX (Франция (www.seapix.fr, 2012-2-BR)) и ПГЛС (Россия,

SEAPIX выполнена на основе двойного креста Mills и имеет следующие основные характеристики: рабочая частота 150 кГц; тип излучаемых сигналов – тональный или с внутриимпульсной частотной модуляцией; ширина одной характеристики направленности – $1,6 \times 1,6^\circ$; количество характеристик направленности поперек и вдоль диаме-

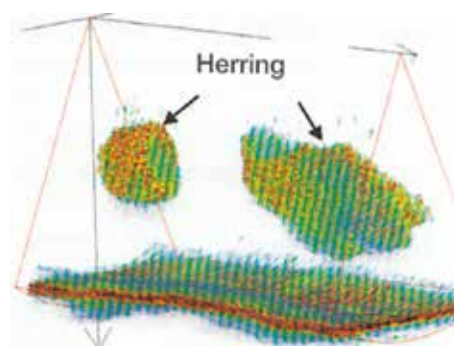


Рис. 13.51. Трехмерное изображение косяков сельди над дном при движении судна (показано стрелкой)

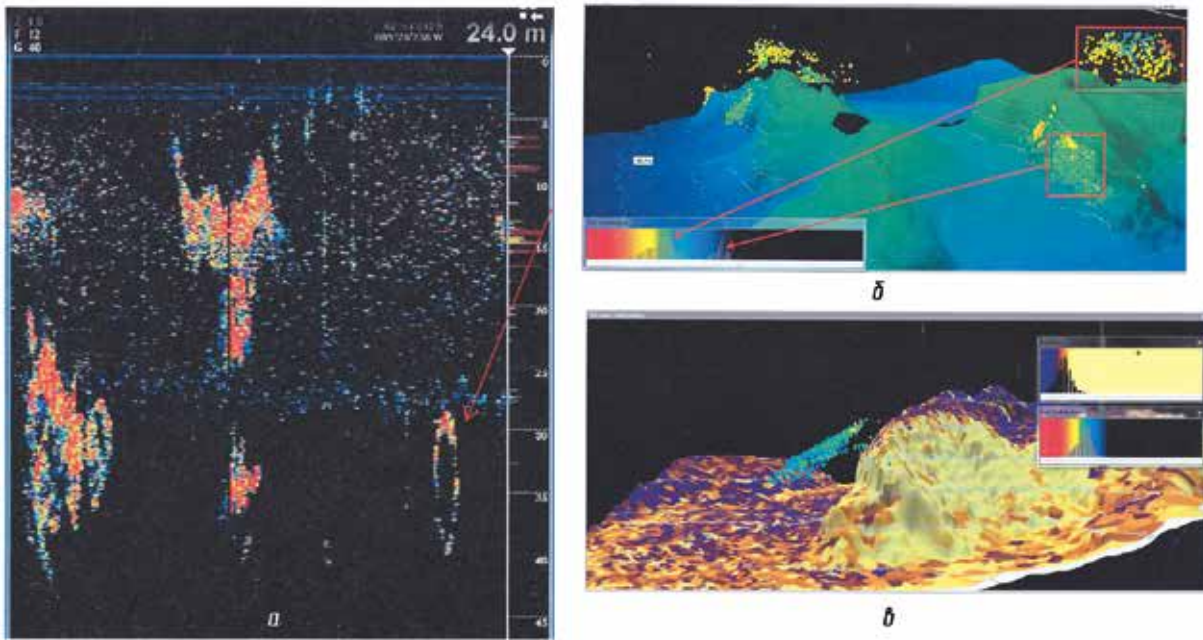


Рис. 13.52 Отображения на экране дисплея аппаратуры SEAPIX структуры косяков рыб и дна:
a – косяков скумбрии. Стрелкой справа показано скумбриевое кольцо; *б* – трехмерное отображение небольших скоплений рыбы вблизи дна с гистограммами оценки жесткости грунта и распределения рыбы; *в* – трехмерное отображение скопления рыбы над дном и характеристик дна

тральной плоскости судна – 64; мощность излучения – 1000 Вт. Указанная аппаратура уже установлена на более 20 промысловых судах.

На рис. 13.52 показаны отображения структуры косяков рыб аппаратурой SEAPIX.

В 2012 г. КБМЭ «Вектор» (г. Таганрог) совместно с ФГУП «ВНИРО» и ОАО «Реаконт» (г. Москва) были начаты работы по разработке портативного многоканального гидролокатора секторного обзора ПГЛС, в 2014 г. с моим участием были проведены натурные испытания в Азовском море и на оз. Глубокое (Московская область). В нем формируется веерная диаграмма, состоящая из 33 независимых ХН с режимом «split-beam», общая ширина которой составляет 90° .

Обработка эхосигналов происходит в каждой из 33 ХН отдельно, что позволяет минимизировать слой «мертвой зоны» у дна. Все 33 характеристики могут быть ориентированы как строго в вертикальном, так и в боковом (горизонтальном) направлении (рис. 13.53).

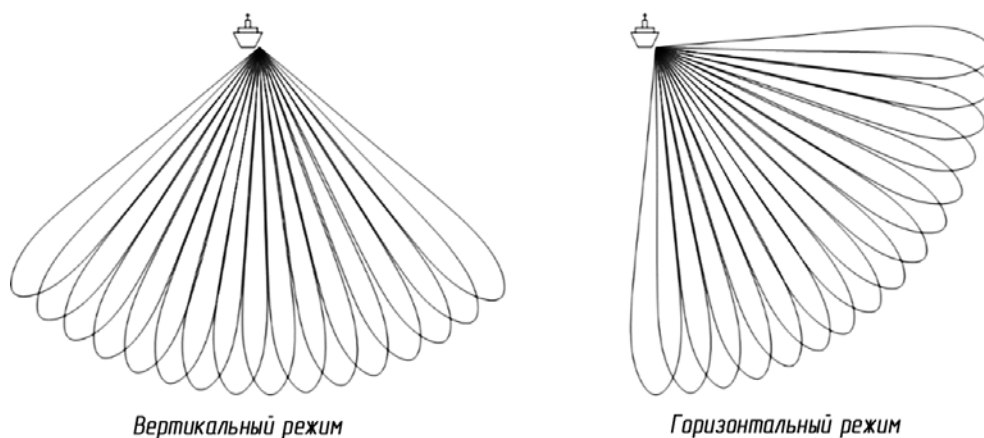


Рис. 13.53. Режимы работы ПГЛС в зависимости от ориентации антенны

Кроме того, минимальная длительность импульса, равная 32 мксек, позволяет достичь максимального разрешения по дистанции 2,5 см.

Технические характеристики ПГЛС:

1. Рабочая частота, кГц: 200
2. Дальность действия по силе цели минус 45 дБ, м: 150
3. Диапазон дальности, м: до 255
4. Разрешение по расстоянию, см: 2,5
5. Ширина одной ХН, градусы: 7×7
6. Сектор обзора, градусы: 90
7. Количество лучей в секторе обзора, шт: 33
8. Тип излучаемых сигналов: тон, ГЧМ
9. Способ определения направления на цель внутри раствора ХН: . . «split-beam»
10. Совокупная масса оборудования гидролокатора, не более, кг: 50

Высокая разрешающая способность ПГЛС позволяет в ряде случаев идентифицировать отдельных рыб в скоплениях и получать более адекватную картину распределения рыб по размерам. Кроме того, регистрация рыб в виде одиночных объектов позволяет вместо метода эхоинтегрирования, используемого при регистрации рыб в виде скоплений без разделения каждой рыбы внутри косяка, применять метод эхосчета при эхоинтегрировании вместо счета каждой рыбы используются интегральные усредненные оценки, что снижает точность конечных результатов. Поэтому использование метода эхосчета позволит получать более точные оценки численностей рыбы и их биомассы.

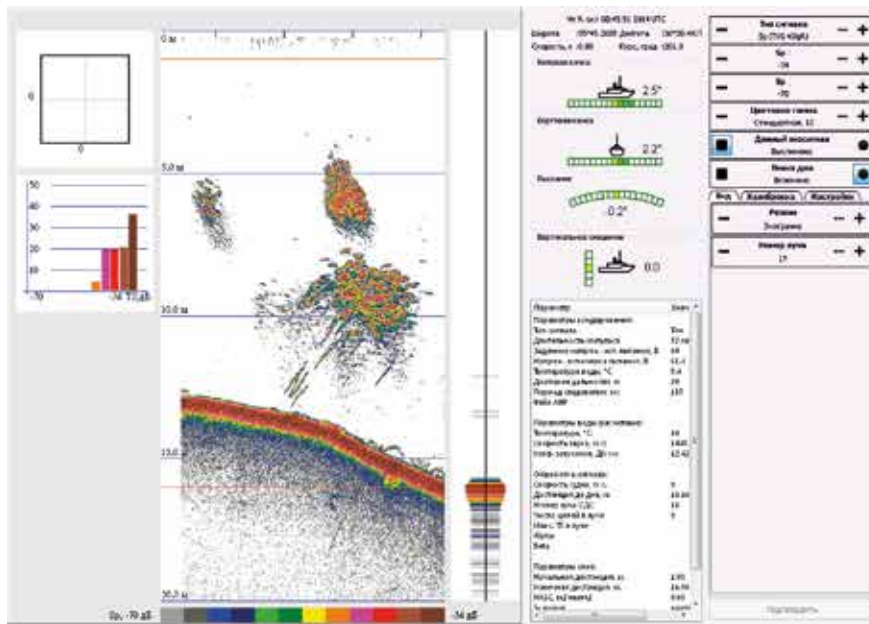
На рис. 13.54 приведены режимы работы и отображение эхосигналов от рыб на экране дисплея аппаратуры ПГЛС. На рис. 13.55 *а, б* показано отображение внутренней структуры косяков, а также и отдельных рыб. В процессе работы ПГЛС возможно отображение эхограммы как в пределах всех 33 ХН, так и в каждой отдельно. В качестве примера регистрации отдельных рыб в придонном слое и у дна на рис. 13.55 *в* представлены эхограммы, предположительно скоплений плотвы, при вертикальной локации одной ХН и длительности импульса ПГЛС 32 мксек. На эхограммах рис. 13.55 *г* и *д* показаны результаты использования аппаратуры при работе на очень малых глубинах при тех же режимах. Основной недостаток при этом обусловлен малой шириной зоны действия.

В работе [Trenkel et al., 2009] рассматриваются основные характеристики новой многоканальной многолучевой широкосекторной и многочастотной гидроакустической аппаратуры вертикального и наклонного лоцирования ME70, а также ее возможности при различных рыбохозяйственных исследованиях. Она была разработана Iqmetec совместно с фирмой Симрад и установлена на НИС «Таласса». Одновременно фирмой Симрад и Норвежским институтом морских исследований IMR была разработана гидролокационная версия такой аппаратуры MS70 [Кудрявцев, 2013].

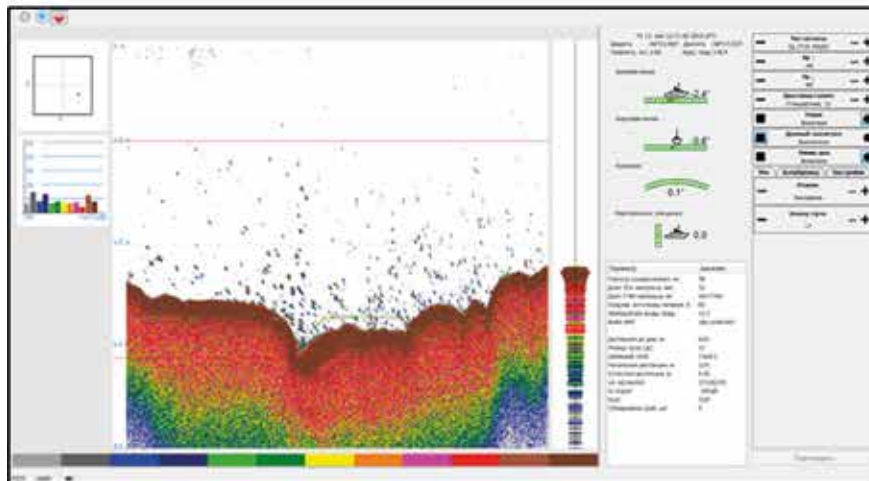
В ней может быть сформировано до 45 ХН (с возможностью работы каждой в режиме «split-beam») в пределах веера до 150°. Каждая характеристика имеет свою рабочую частоту в диапазоне 70–120 кГц. Ширина центральной ХН может регулироваться от 2,2 до 20°; ширина остальных затем регулируется в зависимости от рабочей частоты и углового положения. ME70 базируется на гидроакустической антенне, представляющей собой двухмерную матрицу из индивидуально управляемых 800 пьезоэлектрических элементов, работающих как на излучение, так и прием. В результате в ME70 может быть обеспечено формирование до 500 ХН. Все ХН стабилизированы для исключения влияния бортовой и килевой качки судна.

Частота заполнения зондирующего импульса в любой ХН может изменяться в широких пределах независимо от ее значения в других ХН, что вместе с весьма низким уровнем боковых лепестков ХН обеспечивает эффективное подавление взаимодействия между ХН.

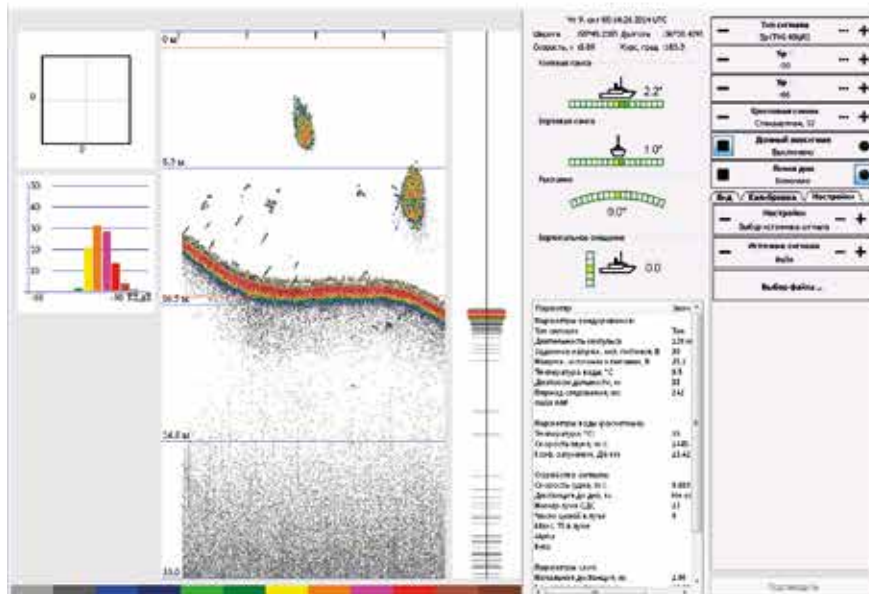
В ME70 имеется ряд режимов озвучивания водной среды. На рис. 13.56 представлен пример одного из режимов (в «V» конфигурации). Количество используемых ХН зависит от выбранной длительности излучаемого импульса и выбранного частотного диапа-



а



б



в

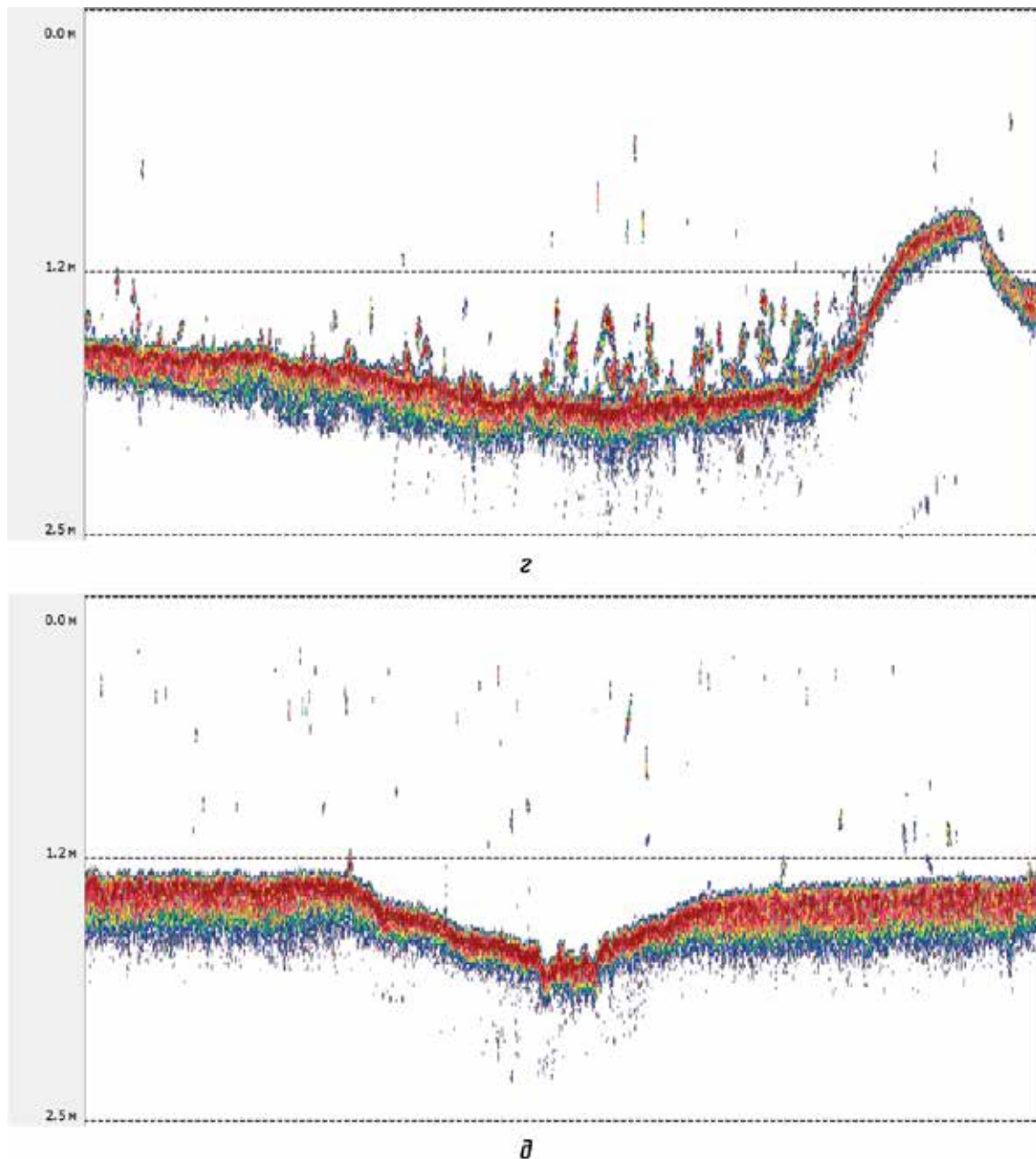


Рис. 13.55. Режимы работы и отображение эхосигналов от рыб на экране дисплея аппаратуры ПГСЛ: *a* – внутренней структуры косяков и дна при работе в режиме увеличенной мощности импульсов лоцирования (вертикальная локация одной характеристикой); *б* – пример отображения эхосигналов от отдельных рыб у дна с гистограммой размерного распределения; *в* – эхосигналов от одиночных рыб и стай; *г* – эхограмма эхосигналов от крупных рыб, находящихся преимущественно вблизи донной поверхности на малых глубинах (при длительности импульса 32 мкс и работе одной характеристикой направленности); *д* – эхограмма эхосигналов от мелких рыб, находящихся преимущественно в толще воды при тех же режимах работы аппаратуры

зона и наоборот. При максимальном диапазоне частот от 70 до 120 кГц и максимальном числе ХН 45 минимальная длительность импульсов зондирования составляет 2048 мкс, при уменьшении количества характеристик до 21, она будет равна 1024 мкс.

Плотные скопления рыбы вблизи дна, «мягкие» донные грунты или наклоны дна (или отклоняющиеся ХН) могут приводить к ошибочным акустическим обнаружениям при использовании в гидроакустической аппаратуре алгоритмов, полагающихся только на измерения амплитуд эхосигналов. Макленнан и др. [2004] при экспериментальных исследованиях демонстрировали, что информация о фазе отраженных сигналов при

использовании гидроакустической аппаратуры с «split-beam» может позволять разделение эха от дна и рыбы. Так как все характеристики направленности ME70 могут работать в режиме «split-beam», то с учетом малого уровня боковых лепестков в данной аппаратуре возможно более качественное разделение эха от морского дна и рыбы. Для более точного выделения донных эхо во всех ХН ME70 [Bourguignon et al., 2009] были проведены исследования по использованию для этого как информации об амплитуде, так и фазе отраженных сигналов. Ими был разработан соответствующий алгоритм, ко-

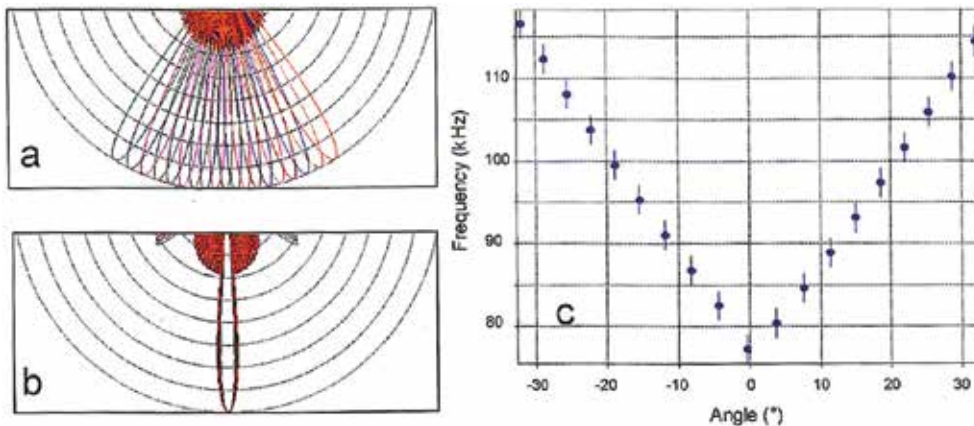


Рис. 13.56. Пример схематического отображения характеристик направленности эхолотатора ME70: в продольной (а); поперечной (б) плоскостях; (с) — частоты и угловые положения характеристик направленности в «V» конфигурации (режиме) озвучивания (вертикальные линии показывают частотную ширину полосы пропускания каждой из характеристик направленности)

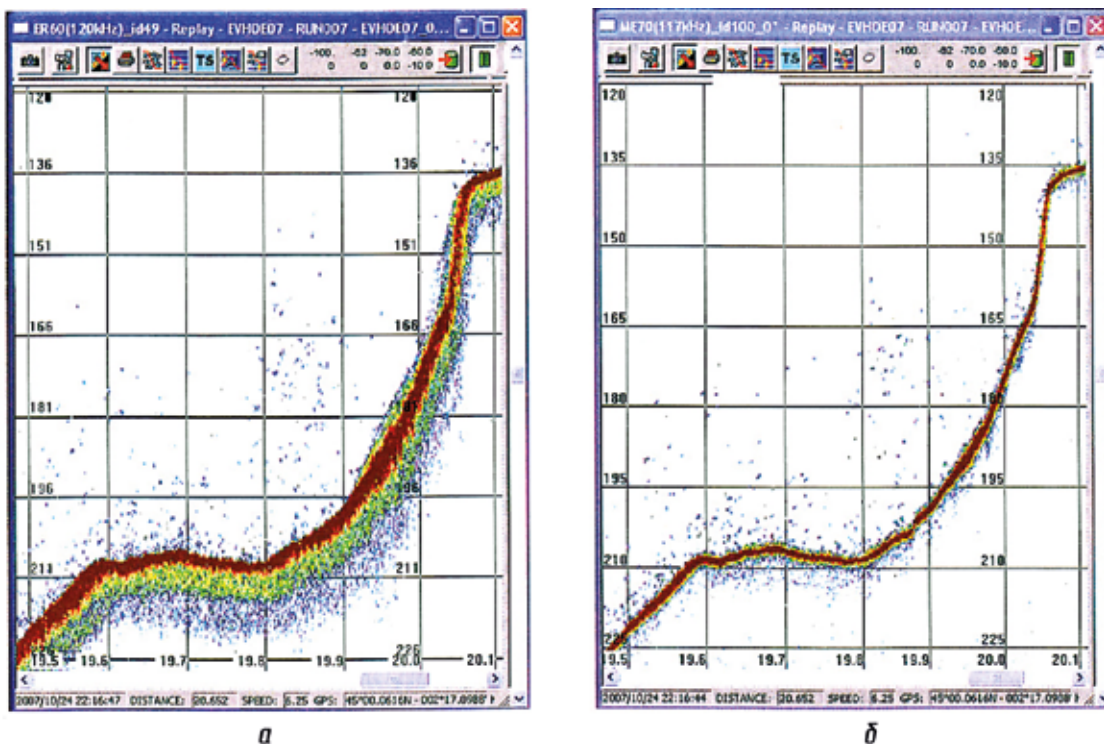


Рис. 13.57. Сравнительные эхограммы одновременной работы обычного эхолотатора и ME70 при неровном дне, свидетельствующие о существенно меньшем влиянии донных отражений на качество получаемой информации:

а — эхолотатор ER60 (рабочая частота 120 кГц, ширина характеристики направленности 7°) б — ME70 центральная характеристика (117 кГц, $2,8^\circ$ — ширина характеристики); порог визуализации — 62 дБ

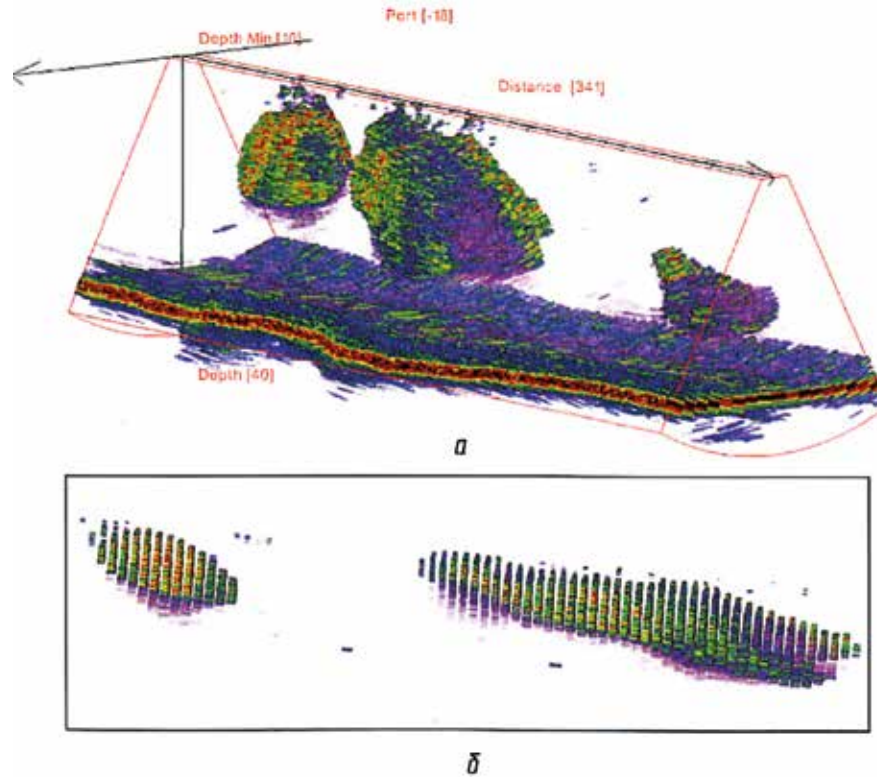


Рис. 13.58. Акустические отображения косяков сельди: а – в трех измерениях; б – в режиме бокового обзора. Направление движения судна слева направо в обеих ситуациях. Черные линии представляют систему координат

торый был проверен на наборах акустических данных, собранных в Английском канале на глубинах ~30 м и в Бискайском заливе на больших глубинах (~200 м). На малых глубинах результаты локализации дна были вполне успешными даже в присутствии плотных скоплений сельди вблизи дна. При работе на больших глубинах использование указанного алгоритма позволило улучшить обнаружение дна во всех ХН ME70 по сравнению с применением лишь традиционного амплитудного порога. При использовании версии алгоритма, включенной в программу MOVIES3D, она работает вполне неплохо при наличии плоского или ровного дна с наклоном. Для усовершенствования работы алгоритма при всех типах дна необходимо включение в алгоритм информации об углах наклона дна.

Авторы отмечают, что благодаря высокой угловой разрешающей способности и малому уровню боковых лепестков, составляющему до -70 дБ в режиме передачи-приема, ME 70 имеет меньшую мертвую зону у дна по сравнению с обычными эхолотами вертикального действия и позволяет получать более качественные отображения подводной обстановки в придонных слоях (рис. 13.48). ME 70 позволяет получать также трехмерные отображения косяков (рис. 13.56).

ME70 позволяет улучшить возможности гидроакустики при видовой идентификации при использовании метода своего рода фильтрации при установке его акустической антенны вблизи остальных антенн одноканальной аппаратуры (рис. 13.59).



Рис. 13.59. Расположение гидроакустических антенн на НИС «Таласса»

13.10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ (ПРИМЕНЕНИЕ) СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ГИДРОАКУСТИКИ ПРИ ИХТИОЛОГИЧЕСКИХ И ДРУГИХ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Активная гидролокация практически с самого начала ее внедрения в промышленное рыболовство стала все более широко использоваться в процессе исследовательских работ, в изучении пространственного и временного распределения рыбы и других гидробионтов [Кудрявцев, 1979]. Совершенствование электронно-сканирующих гидролокаторов в отношении разрешающей способности по дистанции и углу позволило проводить более углубленное изучение поведения скоплений гидробионтов, структуры и их взаимодействий.

Многолучевые всенаправленные или секторно-сканирующие гидролокаторы постепенно развиваются в реальные средства для акустического изучения трехмерной морфологии и визуализации косячных пелагических видов рыб [Gerlotto et al., 2000, 2006; Melvin et al., 2002; Gerlotto and Parano, 2003; Parano et al., 2007], косячного поведения (косяков) [Picher et al., 1996; Misund et al., 2003], характеристик миграций [Hafsteinsson and Misund, 1995] и реакций избегания судна [Soria et al., 1996, 2003; Gerlotto et al., 2004].

Использованию активной гидролокации при рыбозоологических исследованиях уже было уделено много внимания в предыдущих главах, поэтому здесь приводятся лишь некоторые дополнительные примеры, в частности, по исследованию взаимодействия хищник-жертва, рыб с орудиями лова. Также рассматриваются характеристики и возможности новых гидроакустических систем, предназначенных специально для исследовательских работ в рыбном хозяйстве.

В работе [Nøttestad L. et al., 2002] представлены результаты акустических наблюдений взаимодействий хищника и жертвы между китами и сельдью. В настоящее время мало известно о динамике взаимодействия хищник-жертва в открытом океане, т. к. лишь недавно стало возможным количественно оценивать динамику косяков акустическими методами, используя технологии многолучевых гидролокаторов [Pitcher et al., 1996]. Акустическое слежение за косяками рыб в океане делает возможным более качественно и количественно, а также достоверно оценивать поведение в различных временных и пространственных масштабах.

Исследования проводились в апреле 1996 г. на путях миграций нерестящейся весной норвежской сельди. Акустические эхосигналы регистрировались гидролокатором и эхолокатором вертикального действия EK500, работающим на частоте 38 кГц и соединенным с эхоинтегратором. Выбранные косяки сельди прослеживали до 2 ч, используя 95-килогерцовый гидролокатор Симрад SA 950, работающий при включенном диапазоне 0–300 м. Гидролокатор обеспечивал одновременное озвучивание передней полусферы. Точные положения судна определялись с помощью дифференциальной глобальной спутниковой радионавигационной системы. Скорость и направление движения косяков рассчитывались программой SAS. Поведение косяков, наблюдаемое на экране гидролокатора, непрерывно регистрировалось исследователем вместе с оператором гидроакустической станции. Видовой состав акустически регистрируемых скоплений идентифицировался посредством пелагических тралений.

В процессе работ регистрировались следующие характеристики косяков:

- 1) площадь обнаруженного гидролокатором косяка в горизонтальной плоскости (m^2) с помощью программы, разработанной ИМР (Норвегия);
- 2) вертикальная протяженность (м) косяков, регистрируемых эхолокатором;
- 3) относительная плотность (сумма цветных единиц-градаций) регистраций, определяемая цветной палитрой экрана дисплея, где голубой цвет изображения представляет низкую плотность, желтый – среднюю и темнокрасный – высокую плотность;
- 4) скорость движения в горизонтальной плоскости (м/с) и направление (град.), оцениваемое как истинное, определяется по данным слежения за косяком и информации от дифференциальной GPS;
- 5) – глубина нахождения косяка (м), измеряемая от верхней кромки косяка, когда судно проходило над выбранным косяком;

б) расстояние между косяками (м), измеряемое по прямой линии между двумя косяками, наблюдаемыми на экране гидролокатора.

Во время слежения за косяком регистрировались дата, время, продолжительность слежения и точное географическое положение. Реакции косяков и действия хищников, непосредственно наблюдаемые с помощью гидролокатора, категорировались согласно классификации [Pitcher et al., 1996]:

1) изменения внутри косяка (сжатие, реорганизация, формирование округлых форм, удлинение, погружение, движение к поверхности);

2) изменения положения между косяками (сближение, объединение, уход, разделение);

3) поведение хищников (присутствие, общая атака, атака косяка рыбы и др. (рис. 13.60).

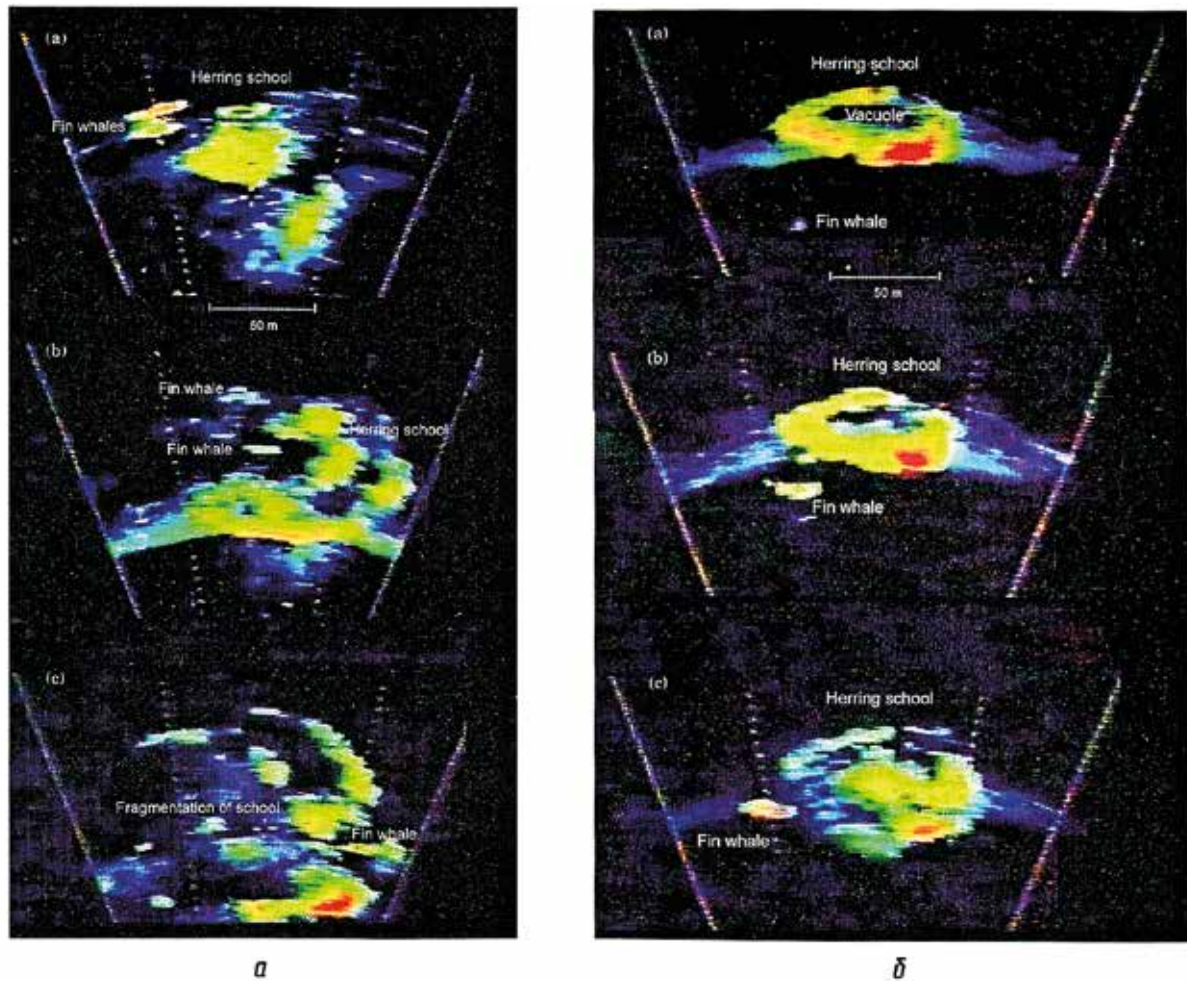


Рис. 13.60. Примеры отображения на экране дисплея гидролокатора взаимодействия китов финвалов со скоплением (косяком) сельди:

a – последовательные изображения эхосигналов от двух китов, атакующих косяк сельди (13 апреля 1996 г., 22.19–22.22 UTC, 01.176°W, глубина косяка 19 м, площадь 115 м², относительная плотность 6740): (а) Финвалы приближаются к косяку (вверху слева). Сельдь, ближайшая к хищникам, агрегируется от дисперсного неплотного слоя к образованию косяка; (б) Финвалы практически проникает в скопление и сельдь разделяется на несколько агрегаций меньшего размера; (с) Финвалы остаются в пределах скопления. Высокая плотность сельди (красный цвет) в нижнем правом углу изображения характеризует ее сильный отклик на действие хищников. Можно отметить скоординированные действия рыб; б – последовательные изображения эхосигналов от одного кита финвала, атакующего скопление (косяк) сельди (14 апреля 1996 г., 03.32–03.36 UTC, 66.894°N, 01.218°W; глубина косяка 66 м, площадь 442 м², относительная плотность 962): (а) Финвал приближается к косяку с нижнего левого угла. Сельдь агрегируется от дисперсного и неплотного слоя для формирования круглого и плотного косяка с образованием пустого пространства в его середине; (б) Финвал атакует косяк с левой стороны. Сельдь реагирует движением прочь от кита, поддерживая безопасную дистанцию от хищника с изменением как формы косяка, так и его плотности; (с) Финвал остается в пределах скопления и оно разделяется на несколько частей

Как указывается в работе [Gerlotto et al., 2006], до конца 1990-х гг. были редкими и трудновыполнимыми полевые наблюдения внутренней структуры и реорганизации рыб внутри косяков. Лишь совершенствование электронно-сканирующих гидролокаторов в части обеспечения более высокой разрешающей способности по дистанции и углу позволило получать более достоверные данные о волнах агитации рыб в натуральных морских условиях, экспериментально показанных в ситуации с небольшим косяком *Atcherinomorus* (состоящим из 300 рыб в танке) в работе Радакова [1973].

При исследованиях волн агитации в косяках анчоуса у побережья Перу (в присутствии морских львов) Герлотто и др. использовали многолучевой 90-градусный гидролокатор одновременного секторного обзора Reson Seabat 6012 с рабочей частотой 455 кГц. В указанном секторе отформировал 60 ХН с шириной 1,5 на 22°. Антенна находилась на глубине 4 м и озвучивала сектор 90° в направлении, перпендикулярном диаметральной плоскости судна, с частотой 3,5 цикла в секунду. Диапазон наблюдения был установлен равным 100 м. На рис. 13.61 представлены примеры акустических отображений структур косяков анчоуса при взаимодействии с морскими львами.

Полученные вариограммы подтверждали, что, как и при экспериментах Радакова, внутренняя организация в косяке полностью изменяется после пересечения его внутренними волнами.

При ихтиологических исследованиях, как и промышленном лове, во многих случаях полезно обеспечение автоматического слежения за обнаруженными косяками и скоплениями рыб. В работе [Trygonis et al., 2009] приведена разработка модуля слежения за косяком рыбы при применении электронно-сканирующих гидролокаторов одновременного обзора. Слежение за косяками при использовании информации в последовательных (следующих одна за другой) многолучевых эхограммах аналогично широко используемой процедуре слежения за рыбой при последовательных циклах лоцирования в ситуации вертикальной эхолокации [Brede et al., 1990; Ona and Hansen, 1991].

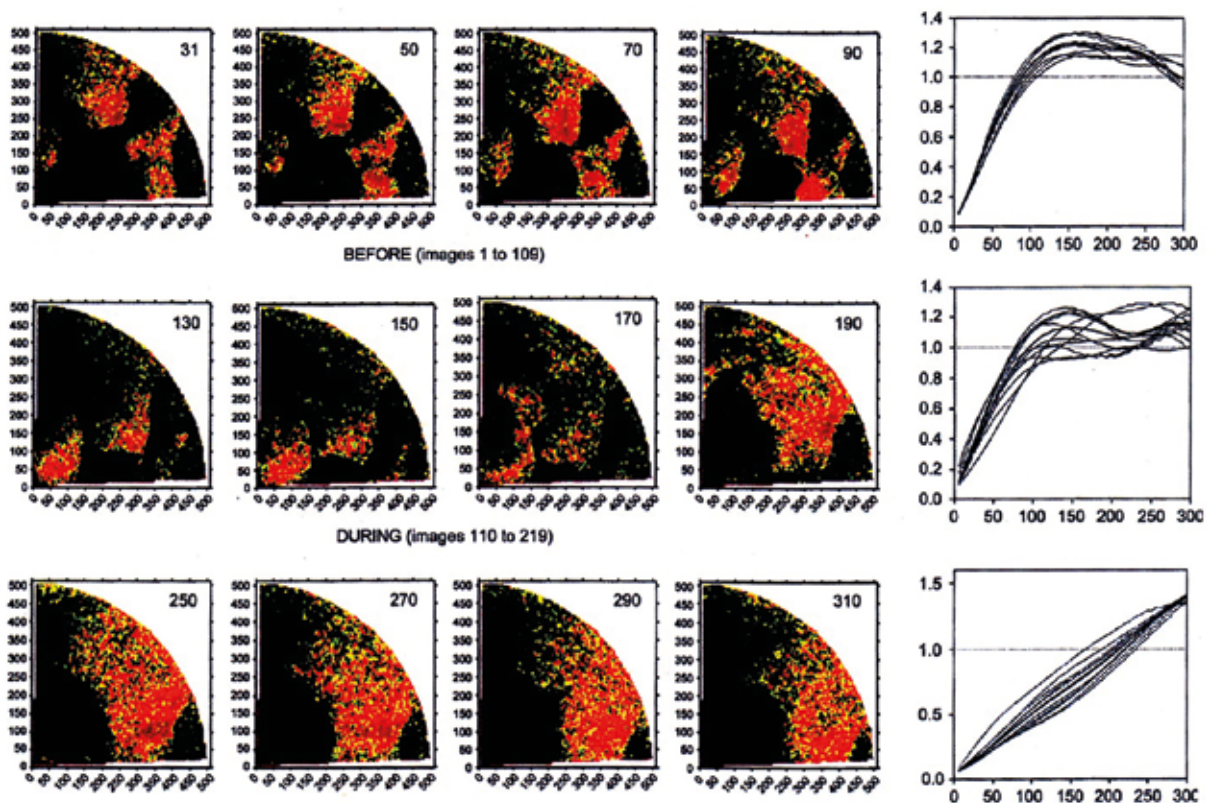


Рис. 13.61. Примеры отображения на экране дисплея электронно-сканирующего гидролокатора эхосигналов от концентраций рыбы при различных фазах взаимодействия с хищниками (перед началом атаки, во время ее и после) с соответствующими вариограммами

Устройства автоматического слежения за косяками также применялись и в гидролокаторах с однолепестковыми характеристиками направленности [Кудрявцев, 1981, 1984].

Вместо идентификации эха от отдельной рыбы или косяка электронно-сканируемые эхограммы многоканальных гидролокаторов используются для определения двухмерных плоскостных очертаний сечений (форм) косяка, которые имеют сравнимые геометрические и динамические характеристики между последовательными озвучиваниями (рис. 13.62).

Указанный модуль слежения может рассматриваться как некоторое развитие алгоритмов слежения за рыбой, в котором положения, площади и энергетические характеристики последовательных отображений эхосигналов от косяков сравниваются с применением подходящих критериев согласования от цикла к циклу, согласования траектории косяка и пространственно-временных характеристик [Trigonis, 2009].

Возможность отображения на основном дисплее ряда последовательных отображений эхосигналов при круговом обзоре (рис. 13.62) облегчает визуальную оценку и своего рода инспекцию результатов обработки и автоматического сопровождения косяка.

Развиваются исследования по использованию ультразвука в рыбохозяйственных технологических исследованиях. Целесообразность применения ультразвуковых акустических колебаний в рыбной технологии для снижения концентрации микроорганизмов, в тузлуках, увеличения скорости охлаждения, размораживания и посола рыбы, экстракции жира из жиросодержащего сырья была показана еще в 50–70-х гг. прошлого века [Маршак, Переплетчик, 1959; Заяс, 1971; Окорокова, Еремин, 1981]. В частности, во ВНИРО были получены положительные результаты при использовании ультразвука для извлечения жира из печени трески [Маршак, Переплетчик, 1959].

Специалистами-технологами [Шестаков, 2005; Артемов, Харенко, 2010; Артемов, 2011; Яричевская и др., 2011; Яричевская, 2013] указывается, что методы ультразвуковой обработки сырья, основанные на явлении кавитации (вследствие захлопывания воздушных пузырьков) в процессе излучения и распространении в водной среде акустических колебаний ультразвуковой частоты, представляют большой практический интерес для пищевой, в т. ч. и рыбной промышленности, для повышения качества и увеличения выхода рыбной продукции в единицу времени.

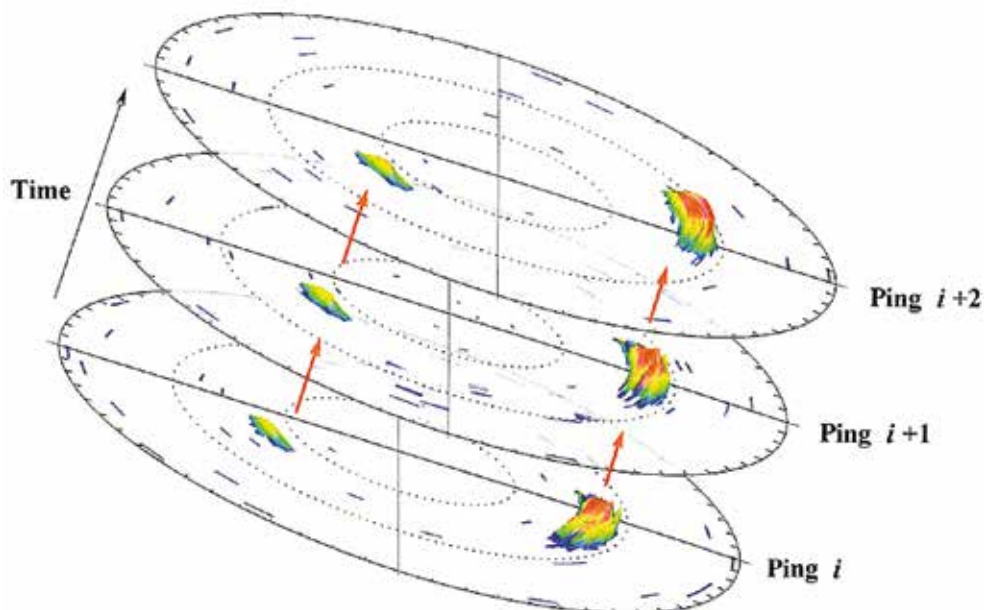


Рис. 13.62. К принципам формирования автоматического слежения за косяками с помощью электронно-сканирующего гидролокатора одновременного кругового обзора с использованием их последовательных эхо-отображений (представлены три последовательных цикла лоцирования)

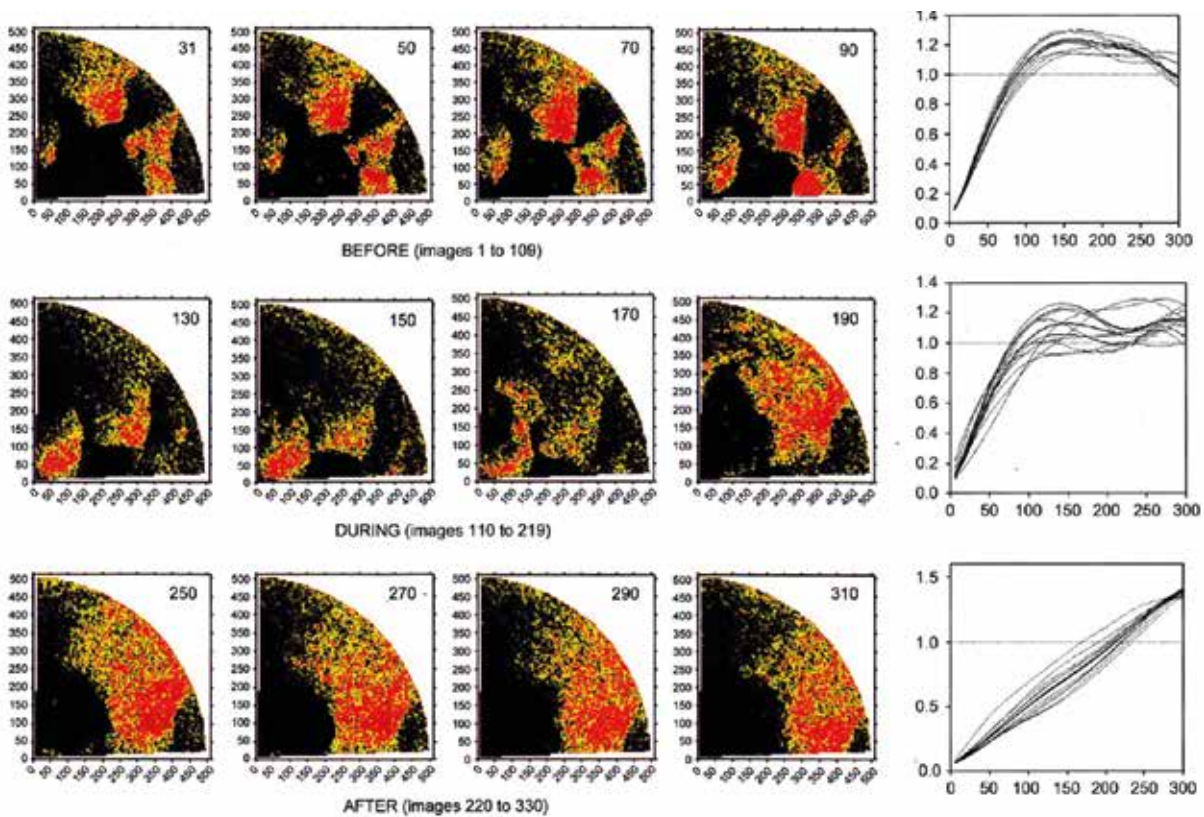


Рис. 13.63. Отображение на экране дисплея ME70 текущего цикла локации (в центре экрана) и ряда предшествующих (внизу)

В работе Артемова [2011] обосновывается технология охлаждения рыбы в льдо-водорыбной среде (ЛВС) с использованием ультразвука с целью повышения качественных характеристик производимой продукции. Исследования проводились на различных видах рыб: треска атлантическая, зубатка пятнистая, камбала морская, окунь морской, треска тихоокеанская, горбуша, нерка, карп, форель. В процессе исследований был обоснован выбор режима ультразвукового воздействия при охлаждении в ЛВС, определены его целесообразные параметры, исследованы изменения скорости охлаждения рыбы в зависимости от режимов ультразвукового воздействия, изучено их влияние на структуру мышечной ткани охлажденной рыбы и др.

Были рассмотрены три способа ультразвукового воздействия применительно к технологии охлаждения рыбы с использованием ЛВС: основанные на деструктурировании воды с помощью акустического кавитационного реактора, на обработке ЛВС с использованием акустического устройства с установкой пьезокерамических излучателей в корпус бака-накопителя и на одновременном воздействии ультразвука на ЛВС и рыбу. Первые два способа направлены на обеззараживание самой ЛВС, поэтому был принят третий способ.

По результатам проведенного исследования были установлены режимы ультразвукового воздействия при охлаждении рыбы и определены его целесообразные параметры. Показано, что при воздействии ультразвуковых акустических колебаний с интенсивностью $1,6\text{--}2\text{ Вт/см}^2$ в течение $25\text{--}30$ мин с установлением безопасного контура, создающего пограничный слой между поверхностью рыбы и акустическим излучателем, равным 1 см , имеет место наибольший бактерицидный эффект, увеличивается скорость охлаждения рыбы и не происходит нарушений структуры мышечной ткани. Выявлена зависимость влияния режимов ультразвукового воздействия на скорость охлаждения, которое свидетельствует о том, что использование УЗ интенсивностью $1,6\text{--}2\text{ Вт/см}^2$ позволяет увеличить скорость охлаждения рыбы в ЛВС в 2 раза. Отмечено также, что попеременные разряжения и сжатия жидкости в ультразвуковом поле вызывают интен-

сивные колебания кожного покрова рыбы, что приводит к расширению капилляров и проникновению ЛВС через кожный покров.

Установлено, что деструктивные изменения мышечной ткани находятся в прямой зависимости от мощности и длительности ультразвукового воздействия, а также расстояния от поверхности рыбы до излучателя, а также, что при воздействии ультразвуковых колебаний интенсивностью 2 Вт/см^2 на охлаждаемую рыбу в ЛВС наблюдается наибольший бактерицидный эффект по сравнению с более низкими интенсивностями воздействия $0,6$ и 1 Вт/см^2 .

Целью исследований Яричевской [2013] было обоснование и разработка технологии мороженой продукции из крабов с использованием явления кавитации (вредного и нежелательного при активной гидроакустической эхолокации) ультразвукового воздействия, обеспечивающей повышение качества и увеличение продукции без применения пищевых фосфатов. Исключение использования фосфатов позволяет избежать их возможного негативного воздействия на организм человека.

Для обоснования процесса ультразвуковой обработки крабового сырья были проведены экспериментальные исследования по ее использованию на различных стадиях технологического процесса производства конечностей краба варено-мороженых в панцире. Ультразвуковую обработку конечностей краба проводили в специальной ультразвуковой ванне «ГРАД 140-35» с рабочим объемом 14 л и регулируемой мощностью генератора от 90 до 300 Вт при средней рабочей частоте акустических колебаний 35 кГц , интенсивности излучения от 2 до 7 Вт/см^2 течение 10 – 20 мин. Мясо конечностей краба, подвергнутых УЗ-воздействию, характеризовалось лучшими органолептическими показателями, имело умеренно выраженный запах, свойственный данному виду продукции, обладало более сочной и нежной консистенцией по сравнению с контрольными образцами. При оценке вкуса крабового мяса, обработанного фосфатами, ощущался посторонний привкус. При продолжительности УЗ-обработки от $10,5$ до 20 мин и интенсивности УЗ-излучения от 3 до $5,5 \text{ Вт/см}^2$ мясо конечностей краба характеризовалось наибольшими показателями нежности 494 – $583 \text{ см}^2/\text{г}$ и имело самые низкие значения водоотдачи.

В результате совокупного анализа изменений качественных показателей мяса конечностей краба и выхода готовой продукции под влиянием заданных режимов УЗ было установлено, что продолжительность УЗ-воздействия в течение 16 мин при интенсивности излучения 4 Вт/см^2 являются целесообразными режимами УЗ-обработки крабовых конечностей при мойке, обеспечивающими максимальный выход готовой продукции с высокими качественными показателями. Было также показано, что глазирование крабовых конечностей водой при непрерывном воздействии ультразвуковых акустических колебаний интенсивностью $7,0 \text{ Вт/см}^2$ обеспечивает равномерное сплошное их покрытие глазурью, позволяет увеличить срок годности конечностей краба варено-мороженых при температуре не выше 18°C до 14 мес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ свидетельствует о существенном повышении возможностей и эффективности большинства технических средств рыбохозяйственной гидроакустики. Наиболее важными проблемами российского рыбного хозяйства, в решении которых существенную помощь может оказать гидроакустика, представляются:

- обеспечение качественного и достоверного контроля подходов мигрирующих лососевых к прибрежным районам Дальнего Востока, а также и к нерестилищам;
- обеспечение достоверной оценки состояния запасов осетровых в Северном Каспии;
- обеспечение масштабного контроля состояния запасов рыб в морских районах благодаря использованию гидроакустической информации промысловых судов;
- управление поведением рыб в зоне трала при разноглубинном траловом лове с комплексным применением акустических и световых полей.

ЛИТЕРАТУРА

- Акустика океана / Под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974.– 686 с.
- Алифанов Р.Н., Осипов Е.В., Стародубцев П.А. Информационная система для идентификации сигналов камчатского краба на основе метода нейронных сетей. – Владивосток: Известия ТИНРО.– 2009. – Т. 158. – С. 356–360.
- Андреева И.Б. Физические основы распространения звука в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1974.– 296 с.
- Аристов Т.И., Кудрявцев В.И. Новый траловый зонд. // Рыбн. хоз-во. – 1980. – № 4. – С. 61–63.
- Артемов Р.В. Обоснование и разработка технологии охлаждения рыбы в льдо-водо-солевой системе: Автореф... дис. канд. тех. наук. – М., 2011. – 24 с.
- Артемов Р.В., Харенко Е.Н. Перспективы использования ультразвука при охлаждении рыбы в льдо-водо-солевой системе. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2010. – С. 7–10.
- Антенные решетки. Методы расчета и проектирования. Обзор зарубежной литературы / под редакцией Бененсон Л.С. – М.: «Советское радио», 1966.– 315 с.
- А.с. 186806 СССР. Способ определения степени наполнения кутка рыболовного трала рыбой / Кудрявцев В.И., Федоров А.Б., Полякова В.В. // 1965.
- А.с. 184181 СССР. Гидролокационное устройство для определения положения косяка относительно трала / Петров Г.П., Кудрявцев В.И., Орлов Ю.В. // 1965.
- А.с. 561545 СССР. Датчик степени заполнения кутка трала рыбой / Круковер М.И., Кудрявцев В.И. // 1975.
- А.с. 587330 СССР. Устройство для записи информации в рыбопоисковых приборах одновременного кругового обзора / Кудрявцев В.И. // 1976.
- А.с. 713553 СССР. Способ определения перекоса трала / Хромов В.А., Краснов В.Б. // 1980.
- А.с. 1103687 СССР. Устройство для автоматического сопровождения целей / Кудрявцев В.И. // 1981.
- А.с. 1367716 СССР. Устройство для автоматического сопровождения цели / Кудрявцев В.И. // 1984.
- А.с. 1618364 СССР. Устройство для измерения горизонтального раскрытия трала / Кудрявцев В.И. // 1988.
- А.с. 1618363 СССР. Устройство для контроля перекоса трала / Кудрявцев В.И. // 1988.
- А.с. 1779308 СССР. Устройство для контроля разности длин ваеров / Кудрявцев В.И. // 1990.
- А.с. 1764601 СССР. Способ определения степени наполнения мешка рыболовного трала рыбой / Кудрявцев В.И. // 1992.
- Бобер Дж.Р. Гидроакустические измерения: пер. с англ. – М.: «Мир», 1974.– 364 с.
- Болгов В.М., Плахов Д.Д., Яковлев В.Е. Акустические шумы и помехи на судах. – Л.: «Судостроение», 1984.– 192 с.

- Борисенко Э.С. Измерение силы цели рыб *in situ* с помощью сканирующих гидроакустических систем. Гидроакустические исследования во внутренних водоемах // Материалы докладов Всероссийской конференции. ИБВВ РАН. — Изд-во ООО «Принтхаус», 2008. — С. 12–19.
- Борисенко Э.С., Мочек А.Д. Таксономическая идентификация рыб во внутренних водоемах гидроакустическим методом // Матер. научн. конференции «Дистанционные методы исследования в зоологии», РАН, Териологическое общество (тезисы). — М., 2011.— 12 с.
- Букатый В.М. Промысловая гидроакустика и рыболокация. Изд-во «Мир», 2003.— 494 с.
- Вендик О.Г. Антенны с немеханическим движением луча. М.: «Советское радио», 1965.— 321 с.
- Воловова Л.А., Шабалин К.В., 1982. Некоторые проблемы разработки гидроакустических методов и средств для управления поведением промысловых объектов // Использование физических раздражителей в целях развития морского рыбного промысла. — М.: ВНИРО. — С. 27–28.
- Гаврилов Е.Н., Зубов В.И. Методические особенности оценки запасов ламинариевых водорослей гидроакустическим методом // Гидроакустические исследования во внутренних водоемах. Материалы Всероссийской конференции. — Борок, 2008. — С. 85–88.
- Гаврилов Е.Н., Игнашкин В.А., Ратушный С.В. Методическое пособие по использованию научного эхолота ЕК500. — Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003.— 134 с.
- Гаврилов Е.Н., Ермольчев В.А., Мамылов В.С., Игнашкин В.А. Исследования по совершенствованию тралово-акустических технологий для повышения точности оценки запасов морских организмов // Материалы отчетной сессии ПИНРО, посвященной 85-летию института. — Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2007. — С. 111–121.
- Ганьков А.А. Использование гидроакустических приборов в мелководных водоемах. — Мурманск: ПИНРО, 1970.— 70 с.
- Гидроакустический учет ресурсов байкальского омуля / Колл. авт. под общ. ред. Кудрявцева В.И., Дзюба Е.В. — Новосибирск: Наука, 2009.
- Гончаров С.М., Долгов А.Н. Портативный гидролокатор секторного обзора (ПГЛС) — новые возможности гидроакустического метода количественной оценки рыбных ресурсов. — Рыбн. хоз-во.— 2015.— № 3. — С. 117–120.
- Гончаров С.М., Долгов А.Н., Кудрявцев В.И. Гидроакустика способна стать одним из основных средств мониторинга состояния запасов водных биоресурсов для промышленного рыболовства. — Рыбн. хозяйство.— 2009.— № 4. — С. 110–112.
- Гончаров С.М. и Кудрявцев В.И., 1989. Результаты использования гидролокатора кругового обзора. — Рыбн. хоз-во.— 1988.— № 7. — С. 39–42.
- Дегтев А.И., Ивантер Д.Э. Автоматизированная система количественной оценки рыбных запасов гидроакустическим методом АСКОР-2. — Рыбн. хоз-во.— 2002.— № 4. — С. 41–43.
- Демьянов В.В., Савельев Е.А. Геостатистика теория и практика. — М.: Наука, 2010.
- Дегтярев А.А. Гидролокатор и кошельковый лов. — Мурманск: ПИНРО, 1969.— 67 с.
- Долгов А.Н. Теория и практика проектирования тренажеров гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры / Ростов-на-Дону: ЗАО «Ростиздат», 2009.— 400 с.
- Дубман Д.М., Шмелева Н.И. О влиянии ветра и волнения на эффективность гидроакустического поиска рыбы в различных районах Мирового океана. — М.: ЦНИИТЭИРХ, 1970 (обзорная информация). — Сер. 1. — Вып. 5. — С. 15–26.
- Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. — М.: Наука.— 1989.— 240 с.
- Евтюхов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. — Л.: «Судостроение», 1988.— 288 с.
- Ермольчев В.А. Расчет зоны действия эхолота по экосигналам. — Рыбн. хоз-во, 1969.— № 8. — С. 50–52.
- Ермольчев В.А. Результаты исследований зависимостей силы цели рыб *in situ* от длины для трески, путассу и мойвы в Баренцовом и Норвежском морях. — Рыбн. хоз-во, 2006.— № 1. — С. 92–96.

- Ермольчев В.А. Зависимость акустической силы цели атлантической трески (*Gadus morhua*) от ее длины в естественной среде обитания (*in situ*) в Баренцевом и Норвежском морях / Тр. 10-й Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». — СПб.: 2010. — С. 144–146.
- Ермольчев В.А. Методические особенности и результаты определения акустической силы цели основных промысловых видов рыб *in situ* в морях Северо-восточной Атлантики и Арктики // Прикладные технологии гидрофизики и гидроакустики / Тр. XI Всеросс. конф. ГА-2012 (СПб., 22–24 мая 2012 г.). — СПб., 2012. — С. 405–408.
- Ермольчев В.А. О зависимости акустической силы цели TS промысловых рыб *in situ* от глубины их обитания в морях северо-восточной Атлантики и Арктики / Тр. 12-й Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». — СПб., 2014. — С. 374–376.
- Ермольчев В.А. Определение гидроакустической отражательной способности основных промысловых видов рыб *in situ* в морях Северо-восточной Атлантики и Арктики: методика и результаты. Акустика океана / Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещен. с сессией XXVI Российского акустического общества. — М., 2013. — С. 113–116.
- Ермольчев В.А., Убарчук И.А. Новые пост-обработки эхосигналов от скоплений морских рыб как элементы морской экосистемной акустики // Современные методы и средства океанологических исследований. Материалы XIV международной научно-технической конференции «МСОИ-2015», Т. 2. — М.: АПР, 2015. — С. 267–270.
- Ермольчев В.А., Убарчук И.А., Сергеева Т.М. Методы, новая программа пост-обработки эхogramм «SALTSE» и результаты определения зависимостей акустической силы цели основных промысловых рыб *in situ* от их длины и глубины обитания в северных морях // Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIX сессией Российского Акустического общества. М.: ГЕОС, 2016, С. 293–296.
- Зарайский С.А., Тюрин А.С. Теория гидролокации. — Л.: Военно-морская академия, 1975.— 189 с.
- Заферман М.Л. 1994. Погрешности инструментальной оценки запасов рыб. — Рыбн. хоз-во, 1994.— № 3. — С. 30–35.
- Заяс Ю.Ф. Воздействие ультразвука на животные ткани. — Мясная индустрия СССР, 1971.— № 3. — С. 33–35.
- Заярный П.П., Зыбин Б.А., Кудрявцев В.И. Результаты морских промысловых испытаний рыбопоисковой станции «Лещ-М». — Рыбн. хоз-во, 2006.— № 2. — С. 79–81.
- Зуссер С.Г. Суточные вертикальные миграции рыб. — М.: Пищевая пром-ть, 1971.— 223 с.
- Иванов О.А., Подлипанов М.Д., Ивашкин М.Н., Чечин Д.А. Состояние и перспективы развития рыбопоисковой техники.— «Судостроение», 1969. — Т. 12. — С. 54–58.
- Ильичев В.И., Сизов И.И. О классификации подводных объектов в промысловой гидроакустике // Тезисы докладов 1 Всесоюзной Дальневосточной акустической конференции. Ч. 1. — Владивосток, 1974. — С. 166–173.
- Истомин И.Г., Норин Е.Г., Татарников В.А., Акишин В.В. Особенности современного промысла ставриды в ЮВТО. — Рыбн. хоз-во, 2012.— № 3. С. 43–48.
- Кадильников Ю.В. Вероятностно-статистическая теория рыболовных систем и технической доступности для них водных биологических ресурсов. — Калининград: АтлантНИРО, 2001.— 102 с.
- Калинин В.Л. Алгоритм определения глубины погружения косяка рыбы. — Рыбн. хоз-во, 1975.— № 2. — С. 31–32.
- Калихман И.Л., Бондаренко В.М., Протащук В.А. 1980. Исследование многократного рассеяния звука в моделях скоплений. — Рыбн. хоз-во, 1980.— № 4. — С. 54–56.
- Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. Пер. с англ. — М.: Мир, 1980.— 580 с.
- Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н. Метод расчета дальности действия рыбопоисковой гидроакустической аппаратуры. — Рыбн. хоз-во, 1978.— № 6. — С. 41–44.
- Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. — Судостроение, 1986.— 272 с.

- Коротков В.К. 1998. Реакция рыб на трал, технология их лова. — Калининград, 1998.— 398 с.
- Кузнецов В.В., Котенев Б.Н., Кузнецова Е.Н. Запас восточно-охотоморского минтая и его распределение в нерестовый период // Вопросы ихтиологии, 1998. — Т. 38. — С. 35–39.
- Кудрявцев В.И. Биогидроакустика. — М.: Большая Советская энциклопедия (БСЭ), 1970. — Т. 3.
- Кудрявцев В. И. Биогидроакустика. — Таганрог: Гидроакустическая энциклопедия, 1970. — С. 81–83.
- Кудрявцев В. И. Биогидроакустика. 2005. — М.: Большая Российская энциклопедия, 2005. — Т. 3. — С. 491–492.
- Кудрявцев В.И. Возможности и применение современных гидроакустических средств дистанционного мониторинга гидробионтов // Матер. научн. конф. «Дистанционные методы исследования в зоологии», РАН, Териологическое общество (тезисы). — М., 2011.— 39 с.
- Кудрявцев В.И. Вопросы применения сканирующих гидролокаторов в рыбном хозяйстве. ОИ — М., ЦНИИТЭИРХ, 1975. — Сер. 6. — Вып. 2.— 58 с.
- Кудрявцев В.И. Гидроакустика рыбохозяйственная. — Таганрог, Гидроакустическая энциклопедия, 1999.— 136 с.
- Кудрявцев В.И. Гидроакустический контроль и накопление банка акустических данных по районам промысла. — Рыбн. хоз-во, 2008.— № 5. — С. 45–48.
- Кудрявцев В.И. Использование гидроакустики в рыбном хозяйстве. — Пищевая пром-ть, 1979.— 17 с.
- Кудрявцев В.И. К вопросу об улучшении характеристик траловых зондов с акустической линией связи. — Рыбн. хоз-во, 1977.— № 4. — С. 52–56.
- Кудрявцев В.И. Комплекс для акустико-траловых съемок состояния запасов биоресурсов. — Рыбн. хоз-во, 2003.— № 2. — С. 47–49.
- Кудрявцев В.И. Некоторые вопросы использования и совершенствования траловых зондов. — Рыбн. хоз-во, 1976.— № 12. — С. 46–49.
- Кудрявцев В.И. Некоторые вопросы создания и эксплуатации гидроакустической рыбопоисковой техники на промысловых судах. — М.: ЦНИИТЭИРХ, 1978 (обзорная информация). — Сер. 6. — Вып. 4.— 49 с.
- Кудрявцев В.И. Некоторые вопросы развития и совершенствования бескабельных траловых зондов. — Рыбн. хоз-во, 1974.— № 11. — С. 43–48.
- Кудрявцев В.И. Об акустической оценке и определении характеристик дна и донных отложений // Матер. Всеросс. конф. «Экология 2004 — море и человек» / Известия ТРТУ, 2004.— № 5 (40). — С. 71–76.
- Кудрявцев В.И. Об использовании высокочастотных акустических полей для управления поведением рыб. — Рыбн. хоз-во, 2003.— № 4. С. 50–53.
- Кудрявцев В.И. О дистанционном контроле процессов разноглубинного тралового лова. — Рыбн. хоз-во, 199.— № 5. — С. 50–54.
- Кудрявцев В.И. О некоторых направлениях совершенствования технических средств для повышения эффективности акустических съемок. — Рыбн. хоз-во, 2008.— № 2. С. 90–93.
- Кудрявцев В.И. О необходимости создания отраслевой системы акустического мониторинга промысловых районов. Повышение эффективности использования водных биологических ресурсов // Матер. Первой международной научно-практической конференции. — М., ВНИРО, 1–2 ноября 2006 г. — С. 53–56.
- Кудрявцев В.И. О повышении качества воспроизведения информации в траловых зондах экологического типа. — Рыбн. хоз-во, 1977.— № 7. С. 42–46.
- Кудрявцев В.И. О повышении эффективности использования информации акустической рыболокаторной аппаратуры. — Рыбн. хоз-во, 1979.— № 8. — С. 41–43.
- Кудрявцев В.И. О повышении эффективности использования рыболокаторов горизонтального действия. — Рыбн. хоз-во, 1979.— № 5. — С. 45–47.

- Кудрявцев В.И. О повышении эффективности использования рыбопоисковой аппаратуры. — Рыбн. хоз-во, 1977.— № 9. — С. 56–60.
- Кудрявцев В.И. Повышение эффективности гидроакустической рыболокационной аппаратуры. — М.: ЦНИИТЭИРХ, 1977, ОИ. — Вып. 3.— 56 с.
- Кудрявцев В.И. Промысловая гидроакустика. Сб. Оборудование пищевой промышленности, т. 2. — ВИНТИ СССР. Итоги науки и техники, 1972. С. 15–112.
- Кудрявцев В.И. Промысловая гидроакустика и рыболокация. 1978. — М.: Пищевая пром-ть, 1978.— 312 с.
- Кудрявцев В.И. Размерная классификация рыб. — Таганрог. Гидроакустическая энциклопедия, 1999. — С. 518–519.
- Кудрявцев В.И. Результаты эксплуатации аппаратуры контроля наполнения трала рыбой «Оберон». — М.: ЦНИИТЭИРХ, 1979, ЭИ. — Вып. 8.— 13 с.
- Кудрявцев В.И. Современное состояние и тенденции развития траловых зондов. — М.: ЦНИИТЭИРХ, 76 б. — Сер. 6. — Вып. 5.— 65 с.
- Кудрявцев В.И. Телеметрическая аппаратура контроля параметров орудий промысловства. — М.: Ежегодник БСЭ, 1969. — Вып. 13.— 5 с.
- Кудрявцев В.И. Телеметрическая аппаратура контроля параметров трала. — М.: Рыбн. хоз-во, 1970.— № 4–5. — С. 59–62, с. 35–38.
- Кудрявцев В.И. Телеметрическая аппаратура контроля параметров орудий промысловства. — М.: Пищевая пром-ть, 1972.— 360 с.
- Кудрявцев В.И., Бондаренко В.М., Борисенко Э.С. Поисковые возможности гидроакустической аппаратуры. — М.: Рыбное хозяйство, 1989.—№ 5. — С. 72–73.
- Кудрявцев В.И., Дегтев А.И., Борисенко Э.С., Мочек А.Д. Опыт использования гидроакустического метода и аппаратуры количественной оценки водных биомасс во внутренних водоемах // Рыбн. хоз-во.— 2006.— № 5. — С. 69–71.
- Кудрявцев В.И., Дегтев А.И., Соколов А.В. 2005. Об особенностях количественной оценки запасов байкальского омуля акустическим методом // Рыбн. хоз-во.— 2005.— № 3. — С. 66–69.
- Кудрявцев В.И., Зубарев И.А. Прибор контроля наполнения трала «Эридан» // Рыбн. хоз-во.— 1983.— № 6. — С. 40–43.
- Кудрявцев В.И., Муравьев В.Б., Дегтев А.И. Возможности оценки биомассы в рыбоводных садках гидроакустическим методом // Сб. Междунар. научно-практ. конф. «Мировые тенденции развития аквакультуры и современные методы переработки водных биоресурсов» / М.: ВНИРО, 2010. — С. 49–52.
- Кудрявцев В.И., Подлипанов М.Д. Морские испытания новой рыбопоисковой станции // Рыбн. хоз-во.— 1975.— № 12. — С. 29–34.
- Кудрявцев В.И., Романенков Б.С. Морские испытания сетного зонда // Рыбн. хоз-во.— 1965.— № 5. — С. 40–41.
- Кудрявцев В.И., Сапин М.Ф. Повышение эффективности использования акустической рыбопоисковой аппаратуры // Рыбн. хоз-во.— 1977.— № 9. — С. 62–63.
- Кудрявцев В.И., Шубный Н.В. Универсальные траловые зонды «СКОЛ-2000» // Рыбн. хоз-во.—1988.— № 11. — С. 63–68.
- Кудрявцев В.И., Щербино М.Н. Оснащение промысловых и научно-исследовательских судов гидроакустической аппаратурой (обзорная информация). — М.: ЦНИИТЭИРХ, 1976. — Сер. 6. — Вып. 4. — С. 56.
- Кудрявцев Н.Н. Исследование и разработка моделей акустических сигналов и помех для создания имитаторов гидроакустических рыбопоисковых приборов. Автореф. ... дис. канд. тех. наук. — Таганрог: ТРТУ, 2000.— 20 с.
- Кузнецов В.В. Запас минтая у Западной Камчатки: современное состояние и перспективы // Рыбное хозяйство.— 2001.— № 1. — С. 20–25.

- Кузнецов В.В., Котенев Б.Н., Кузнецова Е.Н. Популяционная структура, динамика численности и регулирования промысла минтая в северной части Охотского моря. – М.: ВНИРО, 2008.– 173 с.
- Кузнецов М.Ю., Убарчук И.А. Формирование библиотеки типовых акустических изображений гидробионтов Охотского и Берингова морей. 2012 (презентация).
- Кузнецов М.Ю. Гидроакустические методы и средства оценки запасов рыб и их промысла. – Известия ТИНРО, 2013. – Т. 172. – С. 20–41.
- Кузнецов Ю.А., Кузнецов М.Ю. Обоснование и разработка методов и средств промысловой биоакустики. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2007.– 339 с.
- Кузнецов Ю.А. Снижение подводных шумов от промыслового судна. Тез. док. I-й Дальневосточной акустической конференции, ч. 2. – Владивосток, 1974. – С. 139–141.
- Логинов В.И., Шишло Ю.В. Применение гидроакустических поисковых приборов и сетевых зондов на промысле. – Мурманское книжное изд-во, 1971.– 126 с.
- Лоуренс Л. Электроника в океанографии. – М.: Воениздат, 1969.– 260 с.
- Мамылов В.С. Некоторые аспекты оценки плотности рыбных скоплений тралово-акустическими методами // Сб. научн. тр. ПИНРО –Мурманск, 1999. – С. 147–163.
- Маршак И.М., Переплетчик Р.Р. Применение ультразвукового генератора для извлечения жира из печени трески // Труды ВНИРО.– 1959. – Т. 39. – С. 185–196.
- Материалы отчетной сессии ПИНРО, посвященной 85-летию института. Мурманск: изд-во ПИНРО, 2007.– 290 с.
- Месяцев И.И. Строение косяков стадных рыб. – Изв. АН СССР, 1937.– № 3. – С. 184–191.
- Николаев А.С. Некоторые результаты изучения распределения и миграции лососей в камчатском и озерном заливах. – Известия ТИНРО, 1974. – Т. 90. С. 173–197.
- Методическое пособие по проведению инструментальных съемок запасов промысловых гидробионтов в районах исследований ПИНРО. – Мурманск: изд-во ПИНРО, 2006.– 163 с.
- Николаев А.С., Новак С.И. Поиск скоплений лососей в море // Рыбн. хоз-во, 1987.– № 8. С. 63–65.
- ГАМАС Николаев и др., 2000.
- Никольский Г.В. Экология рыб. М.: Высшая школа, 1974. 367 с.
- Ольшевский В.В. Статистические свойства морской реверберации. – М.: Наука, 1966.– 232 с.
- Огорокова Ю.И., Еремин Ю.Н. Консервирование физическими методами. Гигиена питания. 3-е изд. – М.: Медицина, 1981.– 318 с.
- Опыт оценки численности молоди и производителей тихоокеанских лососей гидроакустическим методом на путях миграции в пресноводных водоемах / Дегтев А.И., Шевляков Е.А., Малых К.М., Дубынин В.А. // Известия ТИНРО – Т. 170. – С. 14–35.
- О проблемах и перспективах определения размерного состава рыб в скоплениях гидроакустическим методом: сб. науч. тр. ПИНРО / Под ред. Ермольчева В.А. – Мурманск, 1999. – С. 13–41.
- Орлов Ю.В. Прибор контроля горизонта хода трала «Глубина» // Рыбн. хоз-во, 1970.– № 4. С. 40–41.
- Оппенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов. Пер с англ. – М.: Мир, 1980.– 552 с.
- Пат. 2007077 РФ. Трал для лова рыбы / Б.Н. Тимин, В.И. Кудрявцев // 1992. Пат. 2006200 С1 РФ. Способ калибровки гидроакустической измерительной аппаратуры при оценке рыбных запасов с помощью телевизионной аппаратуры и устройство для его осуществления / В.А. Ермольчев, М.Л. Заферман // 1994.
- Пат. 2229226 РФ. Устройство для поиска рыбы / Кудрявцев В.И. // 2002.
- Пат. 2189611 РФ. Гидроакустический способ определения размерного состава рыб в скоплениях в естественной среде обитания / Ермольчев В.А. // 2002.
- Пат. 2275654 РФ Устройство для поиска и обнаружения рыбы / Кудрявцев В.И. // 2004.
- Пат. 2291615 РФ. Способ акустического учета рыб в потоке воды / Кудрявцев В.И. // 2005.

- Пат. 2260817 С2 РФ. Способ калибровки гидроакустической измерительной аппаратуры при оценке рыбных запасов с помощью телевизионной аппаратуры и устройство для его осуществления / Кудрявцев В.И. // Бюл. № 26 // 2005.
- Пат. 2346432 РФ. Способ определения коэффициента уловистости трала / Кудрявцев В.И. // 2007.
- Пат. 2275021 РФ С2. Способ определения коэффициента уловистости трала / Чурунов В.Н. // 2006.
- Пат. 2343704 РФ. Устройство для предотвращения выхода рыбы из трала / Кудрявцев В.И. // 2007.
- Пат. 84585 РФ. Устройство для дистанционного мониторинга состояния рыбных запасов промышленного рыболовства / Кудрявцев В.И., Гончаров С.М., Долгов А.Н. // 2008.
- Пат. 2367151 РФ. Устройство для оценки размеров рыб в процессе их поиска / Кудрявцев В.И., Борисенко Э.С. // 2008.
- Пат. 94738 РФ. Устройство для учета лососей, идущих на нерест / Кудрявцев В.И. // 2010.
- Пат. 473789 РФ. Способ определения коэффициента уловистости трала / Кудрявцев В.И. // Бюл. № 34 // 2011.
- Пат. 2483535 РФ. Способ определения селективности трала / Кудрявцев В.И. // Бюл. № 16 // 2013.
- Пат. 2271552 РФ. Гидроакустический способ определения размерного состава рыб в скоплениях в естественной среде обитания / Ермольчев В.А. // 2004.
- Петров Г.П. Электронные приборы для обеспечения тралового лова рыб // Инрыбпром-80, 1980.— 3 с.
- Подводная акустика (пер. с англ.) / под ред. Л.М. Бреховских. — М. Мир. 1965. — Т. 1.— 250 с.; — 1970. — Т. 2.— 496 с.
- Поленюк В.В. 2005. Слуховые способности рыб и управление их поведением. — Владивосток, ФГУП «ТИНРО-центр».— 130 с.
- Пронина О.А., Дегтев. А.И., Кудрявцев В.И. Воробьев А.В. 2004. Количественная оценка запасов макрофитов Белого моря акустическим методом. — М.: Рыбн. хоз-во, 2004.— № 3. — С. 36–39.
- Простаков А.Л. Гидроакустика и корабль. — Л.: Судостроение, 1967.— 215 с.
- Протасов В.Р. Биоакустика рыб. — М.: Наука, 1965.— 123 с.
- Протасов В.Р. Поведение рыб. — М.: Пищевая пром-ть, 1978.— 296 с.
- Радиолокационные устройства. — М.: «Советское радио», 1970.— 680 с.
- Радаков Д.В. Стайность рыб как экологическое явление. — М.: Наука, 1972.— 174 с.
- Релей. Теория звука: в 2-х т. — М.: Госиздат, 1995. — Т. 1.— 503 с.; т. 2—475 с.
- Рыбопоисковая станция одновременного кругового обзора с наклоном характеристик направленности / А.П. Воронежский, В.Л. Зыбин, Л.С. Кабаков, В.И. Кудрявцев и др. // Рыбн. хоз-во.— 1985.— № 5. — С. 58–62.
- Руководство ПИНРО по сбору и первичной обработке акустической информации в процессе тралово-акустических съемок. — Мурманск.— 1989.— 60 с. Совершенствование тралово-акустического метода оценки запасов гидробионтов в морях Северного рыбопромыслового бассейна / Е.Н. Гаврилов, В.А. Ермольчев, В.А. Игнашкин и др. — Рыбн. хоз-во.— 2011, юбил. спецвыпуск. — С. 68–72.
- Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / Под ред. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. — М.: Госуд. изд-во физ. — мат. литературы, 1962.— 608 с.
- Самоволькин В.Г. Зависимости сечения обратного рассеяния звука небольших рыб, ракообразных и медуз от их ракурса // Океанология.— 1974. — Т. 14. — Вып. 5. — С. 806–812.
- Сапин М.Ф. Использование рыболокаторов в донных прицельных тралениях // Рыбн. хоз-во.— 1970.— № 9. — С. 45–46.
- Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. — Л.: Судостроение, 1990.— 320 с.

- Сидько В.М., Горшенин Л.П., Кудрявцев В.И. и др. Параметрический тракт эхолота «Пескарь» при поиске рыбы и подводной локации // Рыбн. хоз-во.— 1987.— № 7. — С. 57–61.
- Сиверс А.П., Суслов Н.А., Метельский В.И. Основы радиолокации. — Л.: Судпромгиз.— 1959.— 351 с.
- Сколник М. Введение в технику радиолокационных систем. Пер. с англ. — М.: Мир, 1965.— 748 с.
- Стародубцев и др. Некоторые современные технологии дальнего обнаружения рыбных косяков // Известия ТИНРО.— 2008. — С. 307–316.
- Сташкевич А.П. Акустика моря. — Л.: Судостроение, 1966.— 302 с.
- Тарасюк Ю.Ф., Серавин Г.Н. Гидроакустическая телеметрия. — Л.: «Судостроение», 1973.— 176 с.
- Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. — М.: «Советское радио», 1964.— 352 с.
- Теслер В.Д., Шатоба О.Е. Современное состояние исследований отражательной способности промысловых объектов. — М.: ОИ, ЦНИИТЭИРХ, 1976. — Сер. 6. — Вып. 2. — С. 82.
- Тимошенко В.И., Кудрявцев В.И. Возможности и перспективы применения параметрических гидроакустических рыбопоисковых приборов // Рыб-ное хоз-во, 1981.— № 3. — С. 57–60.
- Толстобров Г.И. Акустическое определение размеров пузырных рыб в скоплениях // Вопросы судостроения, сер. Акустика.— 1976. — Вып. 6. — С. 44–49.
- Толстобров Г.И. Частотные характеристики резонансного рассеяния звука и размерный анализ рыб в скоплении // Вопросы судостроения, сер. Общетехническая.— 1982. — Вып. 64. — С. 5–10.
- Трусканов М.Д. Использование звуковых полей на промысле дальневосточной скумбрии // Рыбн. хоз-во, 1974.— № 1. — С. 37–39.
- Тюлин В.Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. — М.: Наука, 1976.— 256 с.
- Тюлин В.Н., Сташкевич А.П., Тюрин А.М. Теоретические основы гидроакустики. — Л.: «Судостроение», 1955.— 305 с.
- Тюрин А.М., Сташкевич А.П., Таранов Э.С. Основы гидроакустики. — Л.: «Судостроение», 1966.— 295 с.
- Физические основы подводной акустики. Пер. с англ. // Под ред. В.И. Мясищева. — М.: «Советское радио», 1955.— 740 с.
- Хортон Дж.У. Основы гидролокации. — Л.: Судпромгиз, 1961.— 612 с.
- Шабанов А.Н. К вопросу освоения разноглубинного тралового лова ставриды и скумбрии в районах ЮЗТО и ЮВТО // Отчет о результатах научного рейса РТМС «Азимут» в районы ЮЗТО и ЮВТО / КФ НПО ПР: № 31–296. — Калининград, 1989.—14 с.
- Шатравин А.В., Веденеев А.И., Кочетов О.Ю. и Иванов В.Н. 2009. Рас-познавание акустических сигналов морских млекопитающих в режиме реального времени посредством нейронных сетей. 2011. М. Материалы научной конференции «Дистанционные методы исследования в зоологии», РАН, Териологическое общество, с. 9
- Шестаков С.Д. Новые технологи производства качественных продуктов питания // Промышленные ведомости, 2005.
- Шварц В. Определение местонахождения отдельных рыб на большой глубине // Инрыб-пром-1975. — Доклад, 1975.— 15 с.
- Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. — Л.: «Судостроение», 1989.— 304 с.
- Эллис Г. Применение эхолота «Хамбер», включая стабилизированную модель с узким лучом // Инрыбпром-1968.— 1968.— 22 с.
- Юданов К.И. Гидроакустическая разведка рыбы. — Л.: «Судостроение», 1992.— 186 с.
- Юданов К.И. Зоны действия гидроакустических рыбопоисковых приборов // Рыбн. хоз-во, 1969.— № 9. — С. 35–39.
- Юданов К.И., Калихман И.Л. Методы определения плотности рыбных скоплений // Вопросы промысловой гидроакустики.— 1981. — С. 7–26.

- Юданов К.И. Об особенностях регистрации рыбных скоплений гидроакустическими приборами // Рыбн. хоз-во, 1973.— № 1. — С. 46–49.
- Юданов К.И. О дальности действия гидроакустических поисковых приборов // Рыбн. хоз-во, 1969.— № 8. — С. 38–41.
- Юданов К.И. О рациональном выборе диапазонов в самописцах рыбопоисковых эхолотов // Рыбн. хоз-во, 1971.— № 6. — С. 38–40.
- Юданов К.И. О рациональном выборе характеристик направленности вибраторов рыбопоисковых приборов // Рыбн. хоз-во, 1970.— № 7. — С. 46–49.
- Юданов К.И. Расшифровка эхограмм гидроакустических рыбопоисковых приборов. — М.: Пищ. пром-ть, 1967.— 116 с.
- Юданов К.И., Ганьков А.А., Шатоба О.Е. Характеристики обратного рассеяния промысловых рыб // Рыбн. хоз-во, 1967.— № 8. — С. 48–51.
- Юданов К.И., Калихман И.Л., Теслер В.Д. Руководство по проведению гидроакустических съемок. — М.: ВНИРО.— 124 с.
- Яричевская Н.Н. Обоснование и разработка технологии мороженой продукции из крабов с использованием ультразвука: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М.: 2013. — С. 24.
- Яричевская Н.Н., Харенко Е.Н., Бедина Л.Ф. Использование ультразвука в технологии варено-мороженой продукции из краба // Матер. VIII Межд. научно-практ. конфер. «Производство рыбной продукции: проблемы, новые технологии, качество». — Калининград: ФГУП «АтлантНИРО», 2011. — С. 166–172.
- Anderson C.I. H., Brierley A.S., Armstrong F. 2005. Spatio-temporal variability in the distribution of epi- and mesopelagic acoustic backscatter in the Irminger Sea, North Atlantic, with implications for predation on *Calanus finmarchicus*. *Marine Biology*, 146: 1177–1188.
- Anderson, J. T. 2006. Report of the study group on acoustic seabed classification (SGASC). ICES Fisheries Technology Committee. ICES Document CM 2006/FTC: 03, Ref. MHC, ACE, WGFAS. 7 pp.
- Anderson, J. T., Holliday, V., Kloser, R., Reid, D., and Simard, Y. 2007. Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes. ICES Cooperative Research Report, 286. 198 pp.
- Armstrong F. Target strength of sand eel, presented at Int. Council for Exploration of the Sea. Copenhagen, Denmark CM 1986/ B:5. 6, (mimeo)
- Arnaya, I.N. and Sano, N. (1990) Studies on acoustic target strength of squid VI. Simulation of squid target strength by prolate spheroidal model. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 41, 32–42.
- Arnaya I.N., Sano N., and Iida K. Studies on acoustic target strength of squid III: Measurement of the main target strength of small live squid. *Bulletin of the faculty of Fisheries University.* 40(2), 100, 1989.
- Barange, M., Hampton, I. and Soule, M.E. (1996) Empirical determination of in situ target strengths of three loosely aggregated pelagic fish species. *ICES J. Mar. Sci.* 53, 225–32.
- Benoit-Bird, K.J. and Au, W.W.L. (2001) Target strength measurements of Hawaiian mesopelagic boundary community animals. *J. Acoust. Soc. Am.* 110, 812–19.
- Borisenko, E.S., Degtev A.I., Mochek A.D., and Pavlov D.S. 2006. Hydroacoustic Characteristics of Mass Fishes of the Ob-Irtysh Basin. *Journal of Ichthyology*, Vol. 46, Suppl.2, pp. S227-S234.
- Burczynski, J.J. and Johnson, R.L. (1986) Application of dual-beam acoustic survey techniques to limnetic populations of juvenile sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*. *Can. J. Fish. Aqu. Sci.* 43, 1776.
- Burns D.R., Queen C.B., Chivers R.C. 1985. An ultrasonic signal processor for use in underwater acoustics. *Ultrasonics* 23, P. 189–191.
- Burns D.R., Queen C.B., Chivers R.C. 1985. Ground and fish discrimination in underwater acoustics. In *Proc. Ultrasonics International* 85, pp. 49–54, Butterworths Scientific, Guildford.
- Burns D.R., Queen C.B., Sisk H., Mullarkey W., Chivers R.C. Rapid and convenient acoustic sea-bed discrimination for fisheries applications. *Proc. of the Institute of Acoustics*, vol. 11, part 3 (1989). p. 169–177

- Brede, R., Kristensen, F. H., Solli, H., and Ona, E. 1990. Target tracking with a split-beam sounder. *Rapports et Proces-Verbaux des Reunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 189: 254–263.
- Brehmer, P., Georgakarakos, S., Josse, E., Trygonis, V., and Dalen, J. 2007. Adaptation of fisheries sonar for monitoring schools of large pelagic fish: dependence of schooling behaviour on fish finding efficiency. *Aquatic Living Resources*, 20: 377–384.
- Brehmer, P., Lafont, T., Georgakarakos, S., Josse, E., Gerlotto, F., and Collet, C. 2006. Omnidirectional multibeam sonar monitoring: applications in fisheries science. *Fish and Fisheries*, 7: 165–179.
- Brehmer, P., Lafont, T., and Gerlotto, F. 1999. Infobancs Software User's Manual. Technical Document, FA010018991/2. Centre IRD, Montpellier. 29 pp.
- Bourguignon S., Berger L., Scalabrin C., Fabler R., Mazauric V. 2009. Methodological developments for improved bottom detection with the ME70 multibeam echosounder. *ICES J. Mar. Sci.* 66, 1015–1022. .
- Berger L., Poncelier C., Trenkel V.M. 2009. A method for reducing uncertainty in estimates of fish-school frequency response using data from multifrequency and multibeam echosounder. *ICES J. Mar. Sci.* 66, 1155–1161.
- Berger et al., 2003
- Bodholt H. and Olsen K. 1977. Computer-generated display of an underwater situation: application in fish behaviour studies. *Rapports et Proces-Verbaux des Reunions du Conseil Int. pour Exploration de la Mer*, 170: 31–35.
- Borisenko E.S., Degtev A.I., Mochev A.D., and Pavlov D.S. Hydroacoustic Characteristics of Mass Fishes of Ob-Irtysh Basin. 2006. ISSN0032–9452, *Journal of Ichthyology*, vj1.46, Suppl. 2, pp. S227–S234.
- Brehmer P. Georgakarakos S., Josse E., Trygonis V., Dalen J., 2007, Adaptation of fisheries sonar for monitoring schools of large pelagic fish: dependence of schooling behaviour on fish finding efficiency. *Aquat. Living Resour.* 20, 377–384.
- Brehmer P., Lafont T., Georgakarakos S., Josse E., Gerlotto E. and Collet C. 2006. Omnidirectional multibeam sonar monitoring: application in fisheries science. *Fish and Fisheries*, 20: 377–384.
- Burgos J.M., Home J.K., 2007, Sensitivity analysis and parameter selection for detecting aggregations in acoustic data. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 160–168.
- Burgos J.M., Home J.K., 2008, Characterization and classification of acoustically detected fish spatial distributions. *ICES J. Mar. Sci.* 65, 1235–1247.
- Carlson, T.J. and Jackson, D.R. (1980) Empirical evaluation of the feasibility of split beam methods for direct *in situ* target strength measurement of single fish. Seattle Applied Physics Laboratory, University of Washington, 43 pp.
- Chivers R.C., Emerson N. and Burns D.R. 1990. New acoustic processing for underway surveying. *The Hydrographic Journal*, 56: 9–17.
- Collins W.T., Gregory R. and Andersen J. 1996. A digital approach to seabed classification. *Sea Technology*, 37(8): 83–87.
- Collins W.T., McConnaughey R.A. Acoustic Classification of the Sea Floor to Address Essential Fish Habitat and Marine Protected Area Requirements. Canadian Hydrographic Conference 98, CHS, Victoria, Canada.
- Collins W.T., Rhinos K.R. Acoustic Seabed Classification using Echo Sounders: Operational Considerations and Strategies. Canadian Hydrographic Conference 98, CHS, Victoria, Canada.
- Collins W.T., Ninson J.M., Riesling R.W. 2004. Acoustic Seabed Classification for the Identification of Sensitive Very Shallow Water Habitat. *Hydro International*, April 2004.
- Calibration of acoustic instruments. ICES cooperative research report No.326, may 2015.
- Chi D., Wiebe P.H., Copley N.J., Lawson G.L. and Puvanendran Y. 2003. Material properties of North Atlantic cod eggs and early-stage larvae and their influence on acoustic scattering. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 508–15.
- Craig, R.E. and Forbes, ST. (1969) A sonar for fish counting. *FiskDir. Skr. Ser. Havunders.* 15, 210–19.

- Cochrane N.A., Li, Y. and Melvin G.D. 2003. Quantification of a multibeam sonar for fisheries assessment applications. *Journal of the Acoustical Society of America*, 114: 745–758.
- Coetzee J., 2000, Use of a shoal analysis and patch estimation system (SHAPES) to characterise sardine schools. *Aquat. Living Resour.* 13, 1–10.
- Cushing, D.H. 1973. *The detection of fish*, Pergamon Press, p. 200.
- Cordova J. and Paillaman A. Horse Mackerel Target Strength (TS) Estimation, presented at ICES Int. Symposium held in Aberdeen, Scotland, 12–16 June 1995
- Cressie, N. (1998) *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York.
- Cutter Jr. G.R., Demer D.A. 2007. Accounting for scattering directivity and fish behaviour in multibeam-echosounder surveys. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 1664–1674.
- Dagorn L., Holland K., Puente E., Taquet M., Ramo A., Brault P., Nottestad L. et al., 2006. FADIO (Fish Aggregating Devices as Instrumented Observatories of pelagic ecosystems): a European Union funded project on development of new observational instruments and the behaviour of fish around drifting FADs. Eighth Session of the IOTC Working Party on Tropical Tunas, Document IOTC-2006-WPTT-16.
- Dalen J., Nedreaas K., Pedersen R., 2003, A comparative acoustic- abundance estimation of pelagic redfish (*Sebastes mentella*) from hull-mounted and deep-towed acoustic systems. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 472–479.
- Degnbol P., Lassen Y., and Staehr K.J. In situ determination of target strength of herring and sprat at 38 and 120 kHz. *Dana*, 5, 45, 1985.
- De Robertis A., Hjellvik V., Williamson N.J., Wilson C.D. 2008 Silent ships do not always encounter more fish: comparison of acoustic backscatter recorded by a noise-reduced and a conventional research vessel. *ICES J. Mar. Sci.* 65, 623–635.
- De Robertis A. and Higginbottom, I. R. 2007. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. *ICES of Marine Science*, 64: 1282–1291.
- Demer D.A., Renfree J.S., 2008, Variations in echosounder- transducer performance with water temperature. *ICES J. Mar. Sci.* 65, 1021–1035.
- Demer D.A., Soule M.A. and Hewitt R.P. 1999. A multiple- frequency method for potentially improving the accuracy and precision of in situ target strength measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105: 2359–2376.
- Diner N. 2001. Correction on school geometry and density: approach based on acoustic image simulation. *Aquatic Living Resources*, 14: 211–222.
- Diner N. 2007. Evaluating uncertainty in measurements of fish shoal aggregate backscattering cross-section caused by small shoal size relative to beam width. *Aquatic Living Resources*, 20: 117–121.
- Diner N. 1999. Correction of school! geometry and density: an approach based on acoustic image simulation. *ICES Coop. Res. Rep.* 238, 27–51.
- Do M.A and Surti AM. (1990) Estimation of dorsal aspect target strength of deepwater fish using a simple model of swimbladder backscattering. *J. Acoust. Soc. Am.* 87, 1588–96.
- Doonan I.J., Coombs R.F. and McClatchie. 2003. The absorption of sound in seawater in relation to the estimation of deep-water fish biomass. *ICES Journal of Marine Science*, 60; 1047–1055.
- Downey et al. /2010 Downey N.J., Roberts M.J., Baird D. 2010. An investigation of the spawning behaviour of the chokka squid *Loligo reynaudii* and the potential effects of temperature using acoustic telemetry. *ICES Journal of Marine Science*, 67: 231–243
- Dzietzic A., Chorier C., Dubois J.P. and Vray D. Broadband target strength Functions of Three Species of Fresh Water Free-Swimming Fish, presented at ICES Int. Symposium held in Aberdeen, Scotland, 12–16 June 1995
9. The Echoview software. Myriax Pty Ltd, Hobart, Australia.
11. The Large Scale Survey System – LSSS. Marec, Bergen, Norway.
- Edwards J.I., Armstrong P., Magurran AE. and Pitcher T.J. (1984) Herring, mackerel and sprat target strength experiments with behavioural observations. *ICES CM 1984/B:34* (mimeo).

- Ehrenberg J.E. and Torkelson T.C. 1996. Application of dual-beam and split-beam target tracking in fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 329–334.
- Ehrenberg J.E. 1974. A review of in situ target strength estimation techniques. Proceedings of the Symposium on Fisheries Acoustics. (Bergen, Norway), 1982. FAO Fish. Rep. 300, 85–90.
- Ehrenberg J.E. and Steig T.W. (2003) Improved techniques for studying the temporal and spatial behaviour of fish in a fixed location. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 700–6.
- Ermolchev V.A. Methods and results of in situ target-strength measurements of Atlantic cod (*Gadus morhua*) during combined trawl-acoustic surveys. *ICES Journal of Marine Science*, Volume 66, Number 6, July 2009. Published by Oxford Journals, 2009. P. 1225–1232.
- Ermolchev V.A. and Zaferman M.L. Results of experiments on video-acoustic estimation of fish target strength in situ. *ICES Journal of Marine Science*, 2003, June, N3, p.544–548
- Fablet R., Lefort R., Karoui I., Berger L., Masse J., Scalabrin C. oucher J.M. 2009. Classifying fish schools and estimating their species proportions in fishery-acoustic surveys. *ICES J. Mar. Sci.* 66, 1136–1142.
- Fassler S.M.M., Santos R., Garcia-Nunez N., Fernandes P.G., 1 Multifrequency backscattering properties of Atlantic herring (*Clupea harengus*) and Norway pout (*Trisopterus esmarkii*).
- Fernandes P.G., and Simmonds, E. J. 1996. Practical approaches to account for receiver delay and the TVG start time in the calibration of the Simrad EK500. *ICES Document CM 1996/B: 17*. 8 pp. 47.
- Fernandes P.G. 2009. Classification trees for species identification of fish-school echotraces. *ICES Symposium on the Ecosystem Approach with Fisheries Acoustics and Complementary Techniques (SEAFACS)*. *ICES Journal of Marine Science*. V.66, N6, July 2009, pp. 1073–1080.
- Fish finding with sonar, part. 2. The basic operation, *World Fish*. November 1969, p: 40–43.
- Fish finding with sonar, part. 3. *World Fish*, 1969, 18, N2 12, p. 34–36
- Fish finding with sonar. Simrad. Oslo, 1964, p. 62.
- Fish finding with sonar. Part4. Condition on the fishing grounds. *World Fish*. 1970, 19 N2 p. 24–25.
- Fish News Intern.*, 2009. – Debut for new FAD buoy, c. 13
- Foote K.G. (1987) Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *J. Acoust. Soc. Am.* 82 (3), 981–7.
- Foote K.G. 1980. Importance of the swimbladder in acoustics scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strengths. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67: 2084–2089.
- Foote K.G. 1982. Optimizing copper spheres for precision calibration of hydroacoustic equipment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 71: 742–747.
- Foote K.G., Aglen A. and Nakken O. 1986 Measurements of fish target strength with a split-beam echosounder / *Acoust. Soc. Am.* 80 (2), 612–21.
- Foote K.G., Hansen K.A. and Ona E. 1993. More on the frequency dependence of target strength of mature herring. *ICES Document CM 1993/B: 30*, Fish Capture Committee, Ref. H – Pelagic Fish Committee. 8 pp.
- Foote K.G., Knudsen H.P., Vestnes G., MacLennan D.N. and Simmonds E.J. 1987. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. *ICES Cooperative Research Report*, 144. 69 pp.
- Foote K.G. 1984. Trial of a new split-beam echosounder // *Fish capture committee Intern. council for the expl. of the sea*. 1984. CM 1984/ B:21. 15c.
- Foote K.G. 1987. Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *J. Acoust. Soc. Am.* 82 (3), 981–7
- Foote K.G. 1991 Acoustic sampling volume. *J. Acoust. Soc. Am.* 90, 959–964.
- Foote K.G. (1998b) Measurement of morphology and physical properties of zooplankton. Recent advances in sonar applied to biological oceanography. Institute of Electrical Engineers, London, *IEE Rep.* 1998/227, 3/1–3/6.

- Forbes S.T. Progress in dual-beam target strength measurement on herring and blue whiting, presented at Int. Council for the Exploration of the Sea. Copenhagen, Denmark: CM 1985/B:22, 5 (mimeo).
- Foote K.G. and Traynor J.J. (1988) Comparison of walleye pollock target strength estimates determined from in situ measurements and calculations based on swimbladder form. *J. Acoust. Soc. Am.* 83, 9–17.
- Foote K.G., Knutsen T., Baekkevold A.E., Dalpado P. and Johannessen S.E. (1996) Initial, collateral measurements of some properties of *Calanus finmarchicus*. ICES CM 1996/L:21, 23 pp.
- Francois R.E. and Garrison G.R. 1982a. Sound absorption based on ocean measurements. 1. Pure water and magnesium sulphate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72: 896–907.
- Francois R.E. and Garrison G.R. 1982b. Sound absorption based on ocean measurements. 2. Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72: 1879–1890.
- Freon P., Gerlotto F. and Soria M. 1992. Changes in school structure according to external stimuli: description and influence on acoustic assessment. *Fisheries Research*, 15: 45–66.
- Galloway J., Collins W.T., Eng P., Geo P. Dual Frequency Acoustic Classification of Seafloor Habitat using QTC VIEW. Ocean 98, Nice, France.
- Galloway J. Acoustic seabed classification: Integration into hydrographic survey programmes. *Hydro International*, April 2004. p.12–16
- Georgakarakos, S. 2005. Investigation of the beam effect on fish school parameters. A simulation approach. In *Proceedings of the 1st International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results*, 28 June – 1 July 2005. Ed. by J.S. Papadakis and L. Bjorno. FORTH/IACM, Heraklion, Crete, Greece. 6 pp. ISBN 960–88702–08.
- Georgakarakos, S., and Paterakis, G. 1993. «School»: a software for fish school identification. ICES Document CM 1993/B: 08. 4 pp.
- Gerlotto F., Bertrand S., Bez N. and Gutierrez M. 2006. Waves of agitation inside anchovy schools observed with multibeam sonar: a way to transmit information in response to predation. *ICES J. Mar. Sci.* 63: 1405–1417.
- Gerlotto F., Castillo J., Saavedra A., Barbieri M.A., Espej M. and Cotel P. 2004. Three-dimensional structure and avoidance behaviour of anchovy and common sardine schools in central southern Chile. *ICES Journal of Marine Science*, 61: 1120–1126.
- Gerlotto F., 1993, Identification and spatial stratification of tropical fish concentrations using acoustic populations. *Aquat. Living Resour.* 6, 243–254.
- Gerlotto, F., Georgakarakos, S., and Eriksen, P. K. 2000. The application of multibeam sonar technology for quantitative estimates of fish density in shallow water acoustic surveys. *Aquatic Living Resources*, 13: 385–393.
- Gerlotto F., Soria M. and Freon P. 1999. From two dimensions to three: the use of multi-beam sonar for a new approach in fisheries acoustics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56: 6–12.
- Gerlott F. and Parano I. 2003. The three-dimensional morphology and internal structure of clupeid schools as observed using vertical scanning multibeam sonar. *Aquatic Living Resources*, 16: 113–122
- Getabu, A, Tumwebaze, R. and MacLennan, D.N. (2003). Spatial distribution and temporal changes in the fish populations of Lake Victoria. *Aqu. Living Resources* 16, 159–65.
- Gorska N., Ona E., Korneliussen R., 2005, Acoustic backscatter by Atlantic mackerel as being representative of fish that lack a swimbladder, backscattering by individual fish. *ICES J. Mar.Sci.* 62, 984–995.
- Gorska N., Korneliussen R.J. and Ona E. 2007. Acoustic backscatter by schools of adult Atlantic mackerel. *ICES Journal of Marine Science*, 64: 1145–1151.

- Gorska N., Ona E. and Korneliussen R.J. 2005. Acoustic backscattering by Atlantic mackerel as being representative of fish that lack a swimbladder. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 984–995.
- Greenlaw C.F. (1979) Acoustical estimation of zooplankton populations. *Limnology and Oceanography* 24, 226–42.
- Greenlaw C.F. and Johnson R.K (1982) Physical and acoustical properties of zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 72, 1706–10.
- Greenlaw C.F. and Johnson R.K (1983) Multiple frequency acoustical estimation. *Biological Oceanography* 2, 227–52.
- Greenstreet S.P. R., Holland G.J., Guirey E.J., Armstrong E., Fraser H.M. and Gibb I.M. 2010. Combining hydroacoustic seabed survey and grab sampling techniques to assess “local” sandeel population abundance. *ICES Journal of Marine Science*, 67: p.971–984
- Godo, O. R., Handegard, N. O., Browman, H. I., Macaulay, G. J., Kaartvedt, S., Giske, J., Ona, E., Huse, G., and Johnsen, E. // Marine eco-system acoustics (MEA): quantifying processes in the sea at the spatio-temporal scales on which they occur // *ICES J. Mar. Sci.*, 2014, 71. P. 2357–2369.
- Greenstreet S.P. R., Tuck I.D., Grewar G.N., Armstrong E., Reid D.G., and Wright P.J. 1997. An assessment of the acoustic survey technique, RoxAnn, as a means of mapping seabed habitat. *ICES Journal of Marine Science*, 54: 39–59
- Gutierrez M. and MacLennan D.N. (1998) Preliminary results of determination of in situ target strength of main pelagic species: Cruise of RV Humboldt 9803–05 from Tumbes to Tacna (in Spanish, English abstract). *In: Inst. Mar Peru* 135, 16–19.
- Hafsteinsson M. T. and Misund O.A. 1995. Recording the migration behaviour of fish schools by multibeam sonar during conventional acoustic surveys. *ICES J. Mar. Sci.* 52, 915–924
- Halldorsson O. and Reynisson P. (1983) Target strength measurements of herring and capelin in situ at Iceland. *PAO Fish. Rep.* 300,78–84.
- Hamano A., Sasakura T., Kieser R., Cooke K., Kubota K. and Clay A. Target-strength measurements of PACIFIC HAKE (*Merluccius productus*) in Canadian waters using quasi-ideal and conventional beam transducers. *ICES Journal of Marine Science*, 69, 1996, c 273–279
- Haralambous J., Georgakarakos S., 1996, Artificial neural nets as a tool for species identification of fish schools *ICES J Sci.* 53, 173–180.
- Haralambous, J., and Georgakarakos, S. 1996. Artificial neural network as a tool for species identification of fish schools. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 173–180.
- Haines R.G.: *Echo Fishing*, London, 1969, p.124
- Hashimoto T., Maniwa Y., Kato M., Research of telesounder, 3-rd FAO conference fish finding, purse seining und aimed trawling. Reykjavik, 1970, p. 8.
- Haslett R.W.G. Determination of the acoustic back-scattering patterns and cross section of fish. 1977. В сб. *J. Appl. Phys.*, 13, p. 249–357.
- Hedger R.D., Uglem I., Thorsyad E.B., Finstad B., Chittenden C.D., Arechavala-Lopez P., Jensen A.J., Nilson R. and Økland F. 2011. Behaviour of Atlantic cod, a marine fish predator, during Atlantic salmon post-smolt migration. *ICES Journal of Marine Science*, 68 (10): 2152–2162.
- Hester P.I. Studies on continuous transmission frequency modulated sonar, FWAS, Spec. Sci. Rep. Fish. 1970, N607, p. 26.
- Hewitt R.P., Smith P.E. and Brown J.C. 1976. Development and use of sonar mapping for pelagic stock assessment in California Current Sea. *Fishery Bulletin US*, 74: 281–300.
- Higginbottom, I. R., Pauly, T. J. 1997. Echo integration in low signal-noise regimes: methods of noise estimation and removal. Commission for Conservation of Antarctic Marine Living Resources, WG-EMM-97/74. 12pp.
- Higginbottom I.R., Pauly T.J and Heatly D.C. 2000. “Virtual echograms for visualisation and post-processing of multiple-frequency echosounder data”. Proc. of the fifth European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2000, 1497–1502.

- Higginbottom I.R., Pauly T.J., Heatley D.C. Visualisation and analysis of multibeam and multiple-frequency sonar data using Echoview software. 6thICES SYMPOSIUM "Acoustics in fisheries and aquatic ecology", 10–14 June 2002-Montpellier, France. 2002.
- Holliday D.V. Resonance structure in echoes from shoaled pelagic Fish, JASA, 1972, 51, N4 (part 2), p. 1322–1332.
- Holliday D.V. The use of swimbladder resonance in the sizing of schooled pelagic fish. Simp. On acoustic methods in fish researches. 1973, Bergen N9.
- Holliday D.V., Pieper R.E. and Kleppel G.S. 1989. Determination of zooplankton size and distribution with multifrequency acoustic technology. J. Cons. Int. Explor. Mer 46, 52–61
- Holliday D.V. and Pieper R.E. (1995) Bioacoustical oceanography at high frequencies. ICES J. Mar. Sci. 52, 279–296.
- Holliday D. Two applications of Doppler effect in the study of fish schools. Symposium on acoustic methods in fisheries, Bergen, Norway, 19–22 June, 1973, N10, pp.12
- Horne J.K (2000) Acoustic approaches to remote species identification: a review. Fish. Oceanog. 9, 356–371.
- Horne J.K., K Sawada, K. Abe, R.B. Kreisberg, D.H. Barbee and K. Sadayasu. Swimbladders under pressure: anatomical and acoustic responses by walleye pollock. ICES J. Mar. Sci., 2009. – V. 66. – p. 1162–1168.
- ICES Cooperative Research Report. No.326, 2015. Calibration of acoustic instruments. 133p.
- ICES Cooperative Research Report. No.286, August 2007. Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes, pp.185
- ICES Cooperative Research Report N287, 2007. Collection of acoustic data from fishing vessels. pp. 76.
- Jefferts, K, Burczynski, J.J. and Pearcy, W.O. (1987) Acoustical assessment of squid, *Loligo opalescens* off the Central Oregon coast. Can. J. Fish. Aqu. Sci. 44,1261, 1987.
- Iida, K, Mukai, T. and Ishii, K. (1991) Application of a dual beam echosounder to measuring fish length. *Nippon Suisan Gakkaishi* 57, 623–7.
- Kang M., Furusawa M. and Miyashita K. 2002. Effective and accurate use of difference in mean volume-backscattering strength to identify fish and plankton. ICES Journal of Marine Science, 59: 794–804.
- Jech J.M., Michaels W.L., 2006, A multifrequency method to collect and evaluate fisheries acoustics data. Can. J. Fish Aquat S. 2225–2235.
- Kang D. and Hwang D. (2003) Ex situ target strength of rockfish (*Sebastes schlegeli*) and red seabream (*Pagrus major*) in the Northwest Pacific. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 538–43.
- Kloser R.J., 1996, Improved precision of acoustic surveys of thopelagic fish by means of deep-towed transducer ICES J Sci. 53, 407–413. – из Тренкель.2009 Акв.Лив. Рес. 22, 435–445.
- Kloser R.J., Ryan T., Sakov A., Williams A., Koslow J.A., 2002. Species identification in deep water using multiple acoustic frequencies. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 59, 1065–1077.
- Kloser, 1996. International congress on acoustics, 8, London, July, 1974, pp. 32–47.
- Korneliussen, R. J. 2000. Measurement and removal of echo integration noise. ICES Journal of Marine Science, 57: 1204–1217.
- Korneliussen R.J. 2004. The Bergen Echo Integrator post-processing system, with focus on recent improvements. Fisheries Research, 68: 159–169.
- Korneliussen R.J., Diner N., Ona E., Berger L. and Fernandes P. 2008. Proposals for the collection of acoustic multifrequency acoustic data. ICES Journal of Marine Science, 65: 982–994.
- Korneliussen R.J. and Ona E. 2002. An operational system for processing and visualising multifrequency acoustic data. ICES Journal of Marine Science, 59: 293–313.
- Korneliussen R.J. and Ona E. 2003. Synthetic echograms generated from the relative frequency response. ICES Journal of Marine Science, 60: 636–640.

- Korneliussen R.J., Ona E., Eliassen I., Heggelund Y., Patel R., Godo O.R., Giertsen C., et al. 2006. The Large Scale Survey System – LSSS. In Proceedings of the 29th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, Ustaoset, 29 January-1 February 2006.
- Korneliussen R.J., Heggelund Y., Eliassen I.K., Johansen G.O. 2009. Acoustic species identification of schooling fish. ICES Journal of Marine Science. V.66, N6, July 2009, pp. 1111–1118.
- Korneliussen R.J. 2010. The acoustic identification of Atlantic mackerel. ICES Journal of Marine Science, 67:1749–1758.
- Kristensen, A and Dalen, J. (1986) Acoustic estimation of size distribution and abundance of zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 80, 601–11.
- Kudryavtsev V.I. 1971. Hydroacoustic fish finding and instrumented gear control in seining and trawling. In Kristjonsson. H. (Ed.). Modern fishing gear of the world 3. FAO. pp. 69–76.
- Kudryavtsev V.I. 1996. On remote monitoring of pelagic trawl fishing operations. Доклад для ICES Marine Science Symposia «Fisheries and Plankton Acoustics». poster. ICES J. Mar. Sci. 53. no.2. April 1996.
- Kudryavtsev V.I., Tarasov S. P, Timoshenko V.I. Application of non-linear acoustic systems in fisheries. 1987. In Int. Council for the Exploration of the Sea. Ed. Karp. W. A. poster
- Kudryavtsev V.I., Degtev A.I. Quantitative assessment of Baikal omul by hydroacoustic method. 2008. in ICES Symposium «The Ecosystem Approach with Fisheries Acoustics and Complementary Technologies», Bergen, Norway, poster
- Kudryavtsev V.I. Development of the equipment for improving quality of acoustic surveys. 2008. In ICES Symposium «The Ecosystem Approach with Fisheries Acoustics and Complementary Technologies», Bergen, Norway, poster
- Kuznetsov V.V., Kuznetsova E.N. 1999. Role of flatfishes in changes of the Okhotsk Sea fish community structure on the western shelf of Kamchatka // Fourth Intern. Symposium on Flatfish Ecology. Atlantic Beach. N. Carolina. USA. p.37
- Later sonar on show, Fish News Int., December, 1976, p. 8.
- Lecornu L., Burdin, V., Scalabrin, C., and Hamitouche-Djabou, C. 1998. Fish school analysis from multibeam sonar image processing. Proceedings of the Oceans '98 Conference, Nice, France, 1: 587–591.
- Lillo, S., Cordova, J. and Paillaman, A (1996) Target-strength measurements of hake and jack mackerel. *ICES J. Mar. Sci.* 53, 267–72.
- Long – range side-scan sonar finds herring, World Fish, July, 1973, p. 29–30.
- Love R.H. Dorsal-aspect target strength of an individual fish. – *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1971, 49, N3 (2), p. 816–823.
- Love R.H. Maximum side-aspect target strength of an individual fish. – *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1969, 46, N3 (2), p. 746–752.
- Love R.H. 1977. Target strength of an individual fish at any aspect. *J. Acoust. Soc. Amer.* 62, 1397–403.
- MacLennan D.N. 1990. Acoustic measurement of fish abundance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87: 1–15.
- MacLennan D.N., Copland P.J., Armstrong E., Simmonds E.J. 2004, trends on the discrimination of fish and seabed echoes. *Mar. Sci.* 61, 201–210.
- MacLennan D.N., Fernandes P.G. and Dalen, J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 365–369.
- Madureira L.S. P., Everson I. and Murphy E.J. 1993. Interpretation of acoustic data at two frequencies to discriminate between Antarctic krill (*Euphausia superba* Dana) and other scatterers. *Journal of Plankton Research*, 15: 787–802.
- Mayer, L. M., Li, Y., Melvin, G. D., and Ware, C. 1998. The application of 3-D visualisation technology to pelagic fisheries assessment and research. ICES Document CM 1998/S: 02. 12 pp.
- Melvin, G., Li, Y., Mayer, L., and Clay, A. 2002. Commercial fishing vessels, automatic acoustic logging systems and 3D data visualization. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 179–189.

- Melvin, G. D., Cochrane, N. A., and Li, Y. 2003. Extraction and comparison of acoustic backscatter from a calibrated multi- and single beam sonar. *ICES Journal of Marine Science*, 60: 669–677.
- Melvin, G. D., Li, Y., Mayer, L. M., and Clay, A. 1998. The development of an automated sounder/sonar acoustic logging system for deployment on commercial fishing vessel. *ICES Document CM 1998/S: 14*. 16 pp.
- Misund, O. A. 1992. Predictable swimming behaviour of schools in purse seine capture situations. *Fisheries Research*, 14: 319–328
- MacLennan D. N. и Holliday D.V. Fisheries and plankton acoustics: past, present and future. 1996. in *Proceeding of an ICES International Symposium on Fisheries and Plankton Acoustics*. *ICES Journal of Marine Science*, v.53, N2, p. 513–516
- MacLennan, D.N. and Menz, A. (1996). Interpretation of in situ target-strength data. *ICESJ. Mar. Sei.* 53, 233–6.
- MacLennan, D.N. and Svellingen, I. 1989. Simple calibration technique for the split-beam echosounder. *FiskDir. Skr. Ser. Havunders.* 18, 365–79.
- MacLennan D.N., Simmonds E.J. *Fisheries Acoustics*. London, Chapman & Hall, 1992, p.254
- Madureira, L. S. P., Everson, I., and Murphy, E. J. 1993. Interpretation of acoustic data at two frequencies to discriminate between Antarctic krill (*Euphasia superba* Dana) and other scatterers. *Journal of Plankton Research*, 15(7): 787–802.
- McClatchie, S., Macaulay, O., Hanchet, S. and Coombs, R.F. (1998) Target strength of southern blue whiting (*Micromesistius australis*) using swimbladder modelling, split beam and deconvolution. *ICES J. Mar. Sci.* 55,482–93.
- Matheron, G. (1971) The theory of regionalized variables and its application. *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*, Fasc. 5, Ecole Nat. Sup. Des Mines de Paris.
- Measuring target strength and back scattering strength. 1972. Simrad, Bulletin N5, Publication P 631 E, p. 14
- Melvin G., Li Y., Mayer L. and Clay A. 2002. Commercial fishing vessels, automatic acoustic logging systems and 3D data visualization. *ICES Journal of Marine Science*, v.59: 179–189
- Mukai T., K. Iida. Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law. *ICES J. Mar. Sci.*, 1996. – V. 53. – P. 245–248.
- Misund, O. A. 1997. Underwater acoustics in marine fisheries and fisheries research. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 7: 1–34.
- Misund, O. A., Aglen, A., and Fronaas, E. 1995. Mapping the shape, size, and density of fish schools by echo integration and a high-resolution sonar. *ICES Journal of Marine Science*, 52: 11–20.
- Misund, O.A and Beltestad, A.K (1996) Target-strength estimates of schooling herring and mackerel using the comparison method. *ICESJ. Mar. Sci.* 53,281–4.
- Misund, O.A and Øvredal, J.T. (1988) Acoustic measurements of schooling herring: estimation of school biomass and target strength. *ICES CM 1988/B:26*, 16 pp. (mimeo).
- Misund, O. A., Coetzee, J. C., Freon, P., Gardener, M., Olsen, K., Svellingen, I., and Hampton, I. 2003. Schooling behaviour of sardine *Sardinops sagax* in False Bay, South Africa. *African Journal of Marine Science*, 25: 185–193.
- Misund, O. A., Ferno, A., Pitcher, T., and Totland, B. 1998. Tracking herring schools with a high resolution sonar. Variations in horizontal area and relative echo intensity. *ICES Journal of Marine Science*, 55: 58–66.
- Misund, O. A., Totland, B., Floen, S., and Aglen, A. 1994. Computer-based detection of schools by multi-beam sonar. In *Proceedings of the 2nd European Conference on Underwater Acoustics*, pp. 815–820. Ed. by L. Bjorno. Elsevier, Amsterdam.
- Monstad, T. (1992) Report of the joint Norwegian-Russian acoustic survey on blue whiting, Spring 1992. *ICES CM 1992(H:6)*.

- Moreno, G., Dagorn, L., Sancho, G., and Itano, D. 2007. Fish behaviour from fishers' knowledge: the case study of tropical tuna around drifting fish aggregating devices (DFADs). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64: 1517–1528.
- Moss O.J., Walsh O.M. Correlation Signal Proceeding for Depth Sounding. *Navigation.*, U5A, 1970, 17, N2, p. 158–163.
- Mross S., Purnhagen H. Technology and its impact on performance and definition of new fish detection equipment for deep sea trawling, PAO, Techn.Conf. on fish finding, purse seining and aimed trawling. Reykjavik, 1970, p. 12.
- Mulligan, T.J. and Kieser, R. (1986) Comparison of acoustic population estimates of salmon in a lake with a weir count. *Can. J. Fish. Aqu. Sci.* 43, 1373–85.
10. Nikolayev, A. V. and Ubarchuk, I.A. Development of software for use in acoustic technology of fish abundance assessments and ecological studies. In: Improvement of instrumental methods for stock assessment of marine organisms. Proceedings of the Russian-Norwegian Workshop on Hydroacoustics, 11–14 November 2003, Murmansk, Russia (ed. Chernook, V.), PINRO Press, Murmansk, 2004. – P. 160–171.
- Nakken, O., and Ulltang, O. 1983. A comparison of the reliability of acoustic estimates of fish stock abundance and estimates obtained by other assessment methods in northeast Atlantic. *FAO Fish. Rep.*, 300: 249–260.
- Nesse, T. L., Hobaek, H., and Korneliussen, R. J. 2009. Measurements of acoustic-scattering spectra from the whole and parts of Atlantic mackerel. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1169–1175.
- New gear and equipment, *Fishing Gazette*, February 1976.
- New gear and equipment, *World Fishing*, 1975, 24, N10, p. 7–8.
- New sonar, *Fish News Intern.*, 1975, N2, p.15–16
- New sonar unit improves fish finding and navigational techniques. *Canadian Fisherman and Ocean Science*, V. 57, N3, 1971, p. 12–13.
- Nielsen, J.R. and Lundgren, B. (1999) Hydroacoustic ex situ target strength measurements on juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES J. Mar. Sci.* 56, 627–39.
- Nikolayev, A. V. and Ubarchuk, I.A. Development of software for use in acoustic technology of fish abundance assessments and ecological studies. In Improvement of Instrumental Methods for Stock Assessment of Marine Organisms. Proceedings of the Russian-Norwegian Workshop. Murmansk, 11–14 November 2003. Edited by Dr.V. Chernook. PINRO Press, Murmansk, 2004. – P. 160–171.
- Nøttestad L., Fernö A., Mackinson S., Pitcher T.J. and Misund O.A. 2002. How whales influence herring school dynamics in a hold-front area of the Norwegian Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 59, p. p.393–400
- Nunnallee E.R. 1987. An alternative method of thresholding during echo integration data collection. Paper presented at the Intern. Symposium on Fisheries Acoustics 22–26 June 1987, Seattle, Washington. 12 pp.
- Nunnallee, E.P. (1990) An alternative method to thresholding during echo-integration data collection. *Rapp. P. – v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer* 189, 92–4.
- Driscoll R.L. и Macaulay S. Using fish processing time to carry out acoustic surveys from commercial vessels. 2005. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 295–305
- Ona, E. (1994) Detailed in situ target strength measurements of O-group cod. *ICES CM 1994/B:30*, 9 pp.
- Ona, E. (2003) An expanded target-strength relationship for herring. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 493–9.
- Ona, E. Physiological factors causing natural variations in acoustic target strength of fish *J. Mar. Biol. Assoc.* – 1990. – V. 70. – P. 107–127.
- Ona, E., I. Svellingen. Target strength measurements of capelin (*Mallotus villosus*) // *ICES WGFAST.* – 2011. – 24 p.
- Ona, E. The equivalent beam angle and its effective value when applying an integrator threshold. *ICES Document CM 1987/B:35*

- Ona, E., and Barange, M. 1999. Single target recognition. ICES Cooperative Research Report, 235: 28–43.
- Ona, E. and Hansen, K. (1986) In-situ target strength observations on haddock. ICES CM 1986/B:39, 13 pp. (mimeo).
- Ona, E., and Hansen, D. 1991. Software for Target Tracking of Single Fish with Split Beam Echo-Sounders. User Manual. Institute of Marine Research, Bergen, Norway. 21 pp.
- Ona, E., Mazaauric V, Andersen L.N., 2009, Calibration methods for scientific multibeam systems. ICES J. Mar. Sci. 66, 1326-
- Ona, E. and Mitson, R.B. 1996 Acoustic sampling and signal processing near the seabed: the dead zone revisited. ICES J. Mar. Sci. 53, 677–90.
- Ona E. и Traynor J. 1990. Hull-mounted protruding transducer for improving echo integration in bed weather. ICES Document CM 1990/B:31
- Ona E., Zhao X., Svellingen I. and Foote K. 1996. Some pitfalls of short-range standard-target calibration. ICES Document CM 1996/B:36
- Ona, E. Target strength measurements of capelin (*Mallotus villosus*) / E. Ona, I. Svellingen // ICES WGFASST.– 2011.– 24 p.
- Ona и др., 2009
- Paramo, J., Bertrand, S., Villalobos, H., and Gerlotto, F. 2007. A three-dimensional approach to school typology using vertical scanning multibeam sonar. Fisheries Research, 84: 171–179.
- Pedersen, A. 2006. Effects of nonlinear sound propagation in fisheries research. PhD dissertation, University of Bergen, Norway. 308 pp.
- Pedersen, G., Godø, O. R., Ona, E., and Macaulay, G. J. A revised target strength-length estimate for blue whiting (*Micromesistius poutassou*): implications for biomass estimates. ICES Journal of Marine Science, 68, 2011. – P. 2222–2228.
- Petingas P. and Levenez J.J. 1996. Spatial organization of pelagic fish; echogram structure, spatio-temporal condition, and biomass in Senegalese waters. ICES Journal of Marine Science, 53; 147–153
- Petingas P. Geostatistics for fish stock assessment: a review and an acoustic application. 1993. ICES J. Mar. Sci. 50, 285–298
- Petingas P., Masse J., Beillois P., Lebarbier E., Le Cann, A., 2003. Sampling variance of species identification in fisheries-acoustic surveys based on automated procedures associating acoustic images and trawl hauls. ICES J. Mar. Sci. 60, 437–445
- Pieper, R. E., and Holliday, D. V. 1990. Quantitative zooplankton distributions from multifrequency acoustics. Journal of Plankton Research, 12: 433–441.
- Pitcher, T. J., Misund, O. A., Ferno A., Totland, B., and Melie, W. 1996. Adaptive behaviour of herring schools in the Norwegian Sea as revealed by high-resolution sonar. ICES Journal of Marine Science, 53: 449–452.
- Preston J.M., Collins W.T. Bottom Classification in very Shallow Water by High-Speed Data Acquisition. 2000. In Proc. Oceans, Newport.
- Quick и др. 2008
- Reid, D. G. 2000. Report on echo trace classification. ICES Cooperative Research Report, 238. 107 pp.
- Reid, D. G., Scalabrin, C, Petitgas, P., Masse, J., Aukland, R., Carrera, P., and Georgakarakos, S. 2000. Standard protocols for the analysis of school based data from echo sounder surveys. Fisheries Research, 47: 125–136.
- Reid, D. G., and Simmonds, E. J. 1993. Image analysis techniques for the study of fish school structure from acoustic survey data. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 50: 886–893.
- Report of the Workshop on the Determination of Acoustic Target Strength of Redfish (WKTAR). ICES WKTAR Report 2010, SCICOM Steering Group on Ecosystem Surveys Science and Technology, ICES CM 2010/SSGESST, 1–3 June 2010, Tromsø, Norway.– 15 p.

- Report of the Workshop in the implementation of a new TS relationship for blue whiting abundance estimates (WKTSBLUES), 23–26 January 2012, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2012/RMC:05.– 790 p.
14. Rose, G. A., and Porter, D.R. Target-strength studies on Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Newfoundland waters. ICES Journal of Marine Science, 53, 1996. – P. 259–264.
- Reynisson, P. Target-strength measurements of oceanic redfish in the Irminger Sea. ICES CM.– 1992. B. 8.– 13 p.
- Ricker W.E. Linear Regressions in Fishery Research. J. Fish. Res. Board Can. 1973. vol. 30, p. 409–434
- Rivoirard, J., Simmonds, E.J., Foote, P., Fernandes. P.G. and Bez, N. (2000) *Geostatistics for Estimating Fish Abundance*. Blackwell Science Ltd, Oxford.
- Robinson, B.J. (1982) An in-situ technique to determine fish target strength with results for blue whiting, *Micromesistius poutassou* (Risso). J. Cons. Int. Explor. Mer 40,153–60.
- Robinson, B.J. (1983) In situ measurements of the target strength of pelagic fishes. FAO Fish Rep. 300, 99–103.
- Rose, G.A. (1998) Acoustic target strength of capelin in Newfoundland waters. *ICES J. Mar.Sci.* 55, 918–23.
- Rose G.A. and Leggett W.C. Hydroacoustic signal classification on fish schools by species. *Can. Journal of Fish. Aqu. Sci.* 45,597, 1988.
- Rose, G.A. and Porter, D.R. (1996) Target-strength studies on Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Newfoundland waters. *ICES J. Mar. Sci.* 53,259–66.
- Rudstam, L.G., Clay, C.S. and Magnuson, J.J. (1987) Density and size estimates of Cisco (*Coregonus artedii*) using analysis of echo peak PDF from a single-transducer sonar. *Can. J. Fish. Aqu. Sci.* 44,811–21.
- Rudstam, L.G., Lindem, T. and Hansson, S. (1988) Density and in-situ target strength of herring and sprat: a comparison between two methods of analysing single-beam sonar data. *Fish. Res.* 6,305–15.
- Rudstam, L.G., Hansson, S., Lindem, T. and Einhouse, D.W. (1999) Comparison of target strength distributions and fish densities obtained with split and single beam echo sounders. *Fish. Res.* 42,207–14.
- Rudstam, L.G., Parker, S.L., Einhouse, D.W., Witzel, L.D., Warner, D.M., Stritzel, J.L., Parrish, D.L. and Sullivan, P.J. (2003) Application of in situ target-strength estimations in lakes: examples from rainbow-smelt surveys in Lakes Erie and Champlain. *ICES J. M*
- Rusby J.S.M. An experimental survey of a herring fishery by long-range sonar, Symposium on Acoustic Methods in Fisheries Research, 1973, N6, Bergen, p. 11.
- Rusby J.S. M. A long range side-scan sonar for use in the deep sea, Internal. Hydrographic. Rev., V. 47, N,2, 1970, p. 25–39.
- Rusby J.S. M., Dobson R., Edge R.H., Pierce P.E. and Somers M.L. Records obtained from the trials of a Long Range Side Scan Sonar (GLORIA project), 1969, Nature, 223, p. 1225–1227.
- Rusby J.S. M., Revie J. Long-range Sonar mapping of the continental shelf, Marine Geology, 19 (1975), p. 41–52.
- Rusby J.S. M., Somers M.J., Revie J., McCartney B. S. and Stubbs A.R., An Experimental Survey of Herring Fishery by Long-Range Sonar, Mar. Biol., vol. 22, N3, 1974, p. 271–291.
- Ryan T.E., Downie R.A., Kloser R.J., Keith G. Reducing bias due to noise and attenuation in open-ocean echo integration data. ICES Journal of Marine Science, v.72: 2482–2493
- Sasakura T. and Endo Y. Quasi-ideal beam transducer. Japanese Journal of Applied Physics, 26, Supplement 26–1, 1987, p. 94–96
- Sasakura T., Minohara K. and Kagawa J. Scientific sounder using quasi-ideal beam transducer. // Intern/ Symp. On fish. Acoustic/ 1987. Seattle, USA, 40p. poster
- Scalabrin C., Masse J., 1993, Acoustic detection of the spatial and temporal distribution of fish shoals in the Bay of Biscay. *Aquat. Living Resour.* 6, 269–283.

- Scalabrin C., Diner N., Weill A., Hillion A., Mouchot M.C., 1996, Narrowband acoustic identification of monospecific fish schools. *ICES J. Mar. Sci.* 53, 181–188.
- Scalabrin C., Marfia C., Boucher J., 2009, How much fish is hidden in surface and bottom acoustic blind zones? *ICES J. Mar. Sci.* 66, 1355–1363.
- Schwarz W. Tiefseeortung von einzelfischen. Vortrag für Fischerrei (Inribprom-1975, s. 14
- Shibata K.: Study on details of ultrasonics reflection from individual fish, *Bull: Fak. Fish. Nagasaki*, 29, 1975, p.1–82.
- SIMFAMI проект
Širovič и др. 2009
- Simmonds, E. J., Armstrong, F., and Copland, P. J. 1996. Species identification using wideband backscatter with neural network and discriminant analysis. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 189–195.
- Simmonds E.J. and MacLennan, D.N. *Fisheries Acoustics*. London, Chapman & Hall, 2005, p.437.
- Simrad Echo, Norway, November, 1974, p.5–6; 11–13.
- Socha, D. G., Watkins, J. L., and Brierley, A. S. 1996. A visualisation-based post-processing system for analysis of acoustic data. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 335–338.
- Somerton D.A., Williams K., von Szalay P.G. and Rose C.S. 2011. Using acoustics to estimate the fish length selectivity of trawl mesh. *ICES Journal of Marine Science*, 68: 1558–1565.
- Soria M., Bahri T. and Gerlotto, F. 2003. Effect of external factors (environment and survey vessel) on fish school characteristics observed by echosounder and multibeam sonar in the Mediterranean Sea. *Aquatic Living Resources*, 16: 145–157
- Soria M., Freon, P. and Gerlotto, F. 1996. Analysis of vessel influence on spatial behaviour of fish schools using a multi-beam sonar and consequences for biomass estimates by echosounder. *ICES J. Mar. Sci.* 53, 453–8.
- Stanton T.K., Chu D., Jech J.M., and Irish J.D. New broadband methods for resonance classification and high-resolution imagery of fish with swimbladders using a modified commercial broadband echosounder. 2010. *ICES of Marine Science*, 67: 365–378
- Stanton, T. K., Wiebe, P. H., Chu, D., Benfield, M. C., Scanlon, L., Martin, L., and Eastwood, R. L. 1994. On acoustic estimates of zooplankton biomass. *ICES Journal of Marine Science*, 51: 505–512.
- Szczucka J. Acoustic properties of fish as related to external conditions Gdansk. 2002. p.435–440.
- Tichy, F.E., Solli, H. and Klaveness, H. (2003) Nonlinear effects in a 200-kHz sound beam and the consequences for target-strength measurement. *ICES J. Mar. Sci.* 60, 571–574.
- Takao Y. and Furusawa M. 1995. Noise measurement by ch0 integrator. *Fisheries Science*, 61: 637–640.
- Torvald S., Gerhardsen Arnuld Borud, Per Peterson, Jon M. Sorlonol, A Systematic approach to the selection of acoustic fish-detection Instruments for fishery research vessels, Rome, 1968, p. 32.
- Totland A., Johansen G.O., Godp O R., Ona E., Torkelsen T, 2009, Quantifying and reducing the surface blind zone and the seabed dead zone using new technology. *ICES. Mar. Sci.* 66, 1370–1376.
- Trenkel V.M., Mazauric V, Berger L., 2008, The new multibeam fisheries echosounder ME 70: description and expected contribution to fisheries research. *ICES J. Mar. Sci.* 65, 645–655.
- Trevorrow, M.V. 1997. Detection of migrating fish in the Fraser River using 100 kHz sidescan sonar. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54, 1619–1629.
- Trevorrow M.V., Farmer D.M. Sea trials of Intermediate RANGE Fisheries Sidescan from CSS Vector, Aug. 4–15, 1997, p. 27.
- Trevorrow, M. V. 1998. Salmon and herring school detection in shallow waters using sidescan sonars. *Fish. Res.* 35: 5–14.
- Trigonis V., Georgakarakos S. and Simmonds E.J. 2009. An operational system for automatic school identification sonar echoes. *ICES Journal of Marine Science*, 66: 935–949.

- Trigonis V. 2009. Multibeam sonars as a tool for school identification and monitoring of the dynamic behaviour of large pelagic species the case of tuna species around FADs. PhD thesis. University of the Aegean, Greece.
- Tuck I., Hall S., Reid D., Amstrong E. Identification of benthic disturbance by fishing gear using RoxAnn. ICES Int. Symp. on Fisheries and Plankton Acoustics, 1995.
- Tucker D.G. Sonar in fisheries. London. 1967. p. 144.
- Tucker D.G. Underwater Observation using sonar, London, 1966, p. 144.
- Self R.F. L., Hearn A., Jumars P.A., Jackson D.R., Rihardson M.D. and Briggs K.B. 2001. Effects of macrofauna on acoustic backscatter from the seabed: fieldmanipulations in West Sound, Washington, USA. *Journal of Marine Research*, 59: 990–1020.
- Underwater acoustics, Preceeding satellite Symposium of the eighth International congress of acoustics, London, 1974, p. 300.
- Urik R.J., Prnciples of underwater sound for engineers, N.Y.-London-Toronto-Sydney, 1967, p. 342.
- Zedel L., Knutsen T. Measurement of fish Velocity Using Doppler Sonar. Proceeding Oceans 2000, September 2000.
- Zedel L., Knutsen T. and Patro R. Acoustic Doppler current profiler observations of herring movement. 2003. *ICES Journal of Marine Science*, 60: 846–859.
- Zedel L, and Cyr-Racine F-Y. 2008. A least squares approach to inverting Doppler beam data to world coordinates. In Proceedings of the 2008 IEEE/OES9th Working Conference on Current Measurement Technology. 17–19 Varch 2008 Charleston, SC, pp, 39–43. Ed. By J.R. White, Institute of Electrical and Engineers, Piscataway, NJ. 294pp.
- Zedel L. and Cyr-Racine F. – Y. 2009. Extracting fish and water velocity from Doppler profiler data. *ICES Journal Marine Science*. 66: 1846–1852.
- Zedel L. et al.
- Zhou M., Nordhausen W. and Huntley M. 1994. ADCR measurements of the distribution and abundance of euphausiids near the Antarctic Peninsula in winter. *Deep-Sea Research I*. vol.41, No.9, pp.1425–1445/
- Ziese R. Verfahren zur Verbesserung der Richtcharakteristik einer Echolot- Empfangsbasis und Vorrichtungen zum Ausüben diesen Verfahrens (Fried. Krupp. GmbH), Заявка ФРГ, кл. H04 R/44, H04 R1/40, N2516001, заявл. 12.04.75, опубли. 21.10.76.
- Zwolinski J., Morais A., Marques V., Stratoudakis Y. and Fernandes P.G. Diel variation in the vertical distribution and schooling behaviour of sardine off Portugal. *ICES Journal of Marine Science*, 64, 963–972.
- Walgh O M. The finite amplitude depth 50under JEEE Conf. Engineering Ocean Record 5, San Diego, Calif., 1971, New York, 1971, p. 197–201.
- Walline, P.D., Pisanty, S. and Lindem, T. (1992) Acoustic assessment of the number of pelagic fish in Lake Kinneret, Israel. *Hydrobiologia* 231, 153–63.
- Warner, D.M., Rudstam, L.G. and Klumb, R.A. (2002) In situ target strength of alewives in freshwater. *Trans. Am. Fish. Soc.* 131, 212–23.
- Watkins, J.L. and Brierley, AS. (1996). A post-processing technique to remove background noise from echo integration data. *ICES J. Mar. Sci.* 53,339–44.
- Weber T.C., Rooper C., Butler J., Jones D., Wilson C. 2013. Seabed classification for trawlability determined with a multibeam echosounder on Snakehead Bank in the Gulf of Alaska. *Fisheries Bulletin*, V.111(1) N1 January 2013, p.68–77
- Weill A., Scalabrin C., Diner N., 1993, MOVIES-B: an acoustic detection description software. Application to shoal species' classification. *Aquat. Living Resour.* 6, 255–267.
- Wesmar Sonar-Fishing Techniques – Bottom Trawling, Cat. Form. Son 398–876 R, USA.
- Wesmar Sonar-Fishing Techniques – Purse Seining-Herring, Алспову, Sardine, Cat. Form. Son. 459–276 R, USA.
- Wesmar SS230, Low Frequency Scanning Sonar with Chart Recorder Cat. Form. Son 2312–877, USA.

Weston D.E. and Revie J. "Fish echoes on a long range sonar display", 1971, J. Sound Vibr, 17. 0, p. 105–112.

Weston D.E., Revie J., Wearden G., Hocking P.D. Long-range sonar studies – Fish behaviour over a 23 day period, Underwater acoustics, Preceding Satellite Symposium, Birmingham, 1974, 1. 1., p. 131–135.

Yasuma H., Sawada K., Ohshima T., Miyashita K and Aoki I. Target strength of mesopelagic lanternfishes (family Myctophidae) based on swimbladder morphology. ICES J. Mar. Sci. 60, 584–91

www.scanmar.no

Witteveen и др. /2008 – метки

Кудрявцев В.И.

ГИДРОАКУСТИКА РЫБОХОЗЯЙСТВЕННАЯ

Главный редактор издательства Н.Э. Боровик

Редактор О.С.Юрова

Художественный редактор М.Е. Котова

Компьютерная верстка Ю.С. Яковлев

Подписано в печать 9.12.2018

Печ. л. 57,5. Формат 60×90/8

Тираж 300 экз. Заказ №

Адрес редакции: 107140, Москва, ул. Верхняя Красносельская, 17.

Тел.: +7 (499) 264-65-33;

Факс: +7 (499) 264-91-87;

E-mail: trudy@vniro.ru