АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 123–130

ИЗ ИСТОРИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

УДК 551.463

ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕН ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИИ В ГЛУБОКОВОДНОМ И ПРИПОВЕРХНОСТНОМ ЗВУКОВЫХ КАНАЛАХ

© 2002 г. Н. В. Студеничник

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: vadov@akin.ru

Поступила в редакцию 27.12.99 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований объемной и поверхностной предреверберации. Излагаются установленные основные характеристики и закономерности предреверберации. Обсуждаются механизм формирования и теория явления. Анализируется зависимость времен предреверберации от расстояния в различных регионах Мирового океана на удалениях до 180–1500 км. Приводятся количественные величины времен предреверберации. Исследуется ширина индикатрисы рассеяния в подводном и приповерхностном звуковых каналах.

При исследованиях тонкой структуры звуковых полей в Черном море автором было открыто явление предреверберации. Оно состоит в том, что в амплитудно-временной структуре поля в слоисто-неоднородном волноводе проявляется реверберационного вида звуковой фон, предваряющий приход основных компонент, регламентированных параметрами канала в детерминированных условиях. В дальнейшем предреверберация была исследована и в других районах Мирового океана, характеризующихся сплошной освещенностью и зональной структурой поля, включая умеренные широты и тропические зоны Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Полученные при этом пространственно-временные закономерности были идентичны. Учитывая общность явления в различных условиях природных волноводов, возникала естественная необходимость установления его природы и теоретического обоснования. С этой целью, по мере накопления экспериментальных данных в различных районах Мирового океана, получаемые результаты регулярно докладывались на научных семинарах и коллоквиумах. Однако физического объяснения наблюдаемые закономерности длительное время не находили, что в первую очередь было связано с тем, что явление не вписывалось в рамки классической теории распространения звука в стратифицированном океане [1]. Только спустя 16 лет после его открытия, автору удалось дать полное объяснение явления [2, 3] на примере простейшей модели волновода в виде приповерхностного канала с учетом поверхностного волнения (теория предреверберации в тезисах доклада не отображена). К этому времени уже довольно подробно были изучены основные закономерности звукового поля в различного рода волноводах с учетом предреверберационных компонент. Некоторые из этих результатов исследований изложены в работах [2–8]. Кроме, выбора подходящей модели волновода, для объяснения явления необходимо было построить лучи, по которым приходят предреверберационные сигналы, определить пути распространения регулярных и рассеянных составляющих поля и доказать, что время распространения соответствующих фоновых составляющих меньше времени распространения основных сигналов, обусловленных детерминированными условиями. Кроме того доказать, что предреверберация во временном интервале соседних циклов обеспечивается приходом только двух пар единственно возможных асимметричных (по длине циклов и углам рассеяния) составляющих. Это было не вполне очевидным в условиях подводного звукового канала. При использовании же модели приповерхностного канала со взволнованной поверхностью реализуемость наблюдаемых закономерностей стала естественной. После этого стало совершенно очевидным, что и в подводном канале механизм образования предреверберации имеет ту же физическую основу. Рассеивающими элементами в этих условиях являются объемные неоднородности. Работ, посвященных вопросам предреверберации, в литературе крайне мало. Кроме отмеченных выше [2–8], можно назвать только работу [9], в которой исследованы по существу предреверберационные составляющие (авторами они называются "шумовыми компонентами") в двух глубоководных районах океана в условиях сплошной освещенности. В зарубежных публикациях не содержится конкретных целенаправленных исследований звуковых полей с детальной идентификацией регулярных и сопровож-

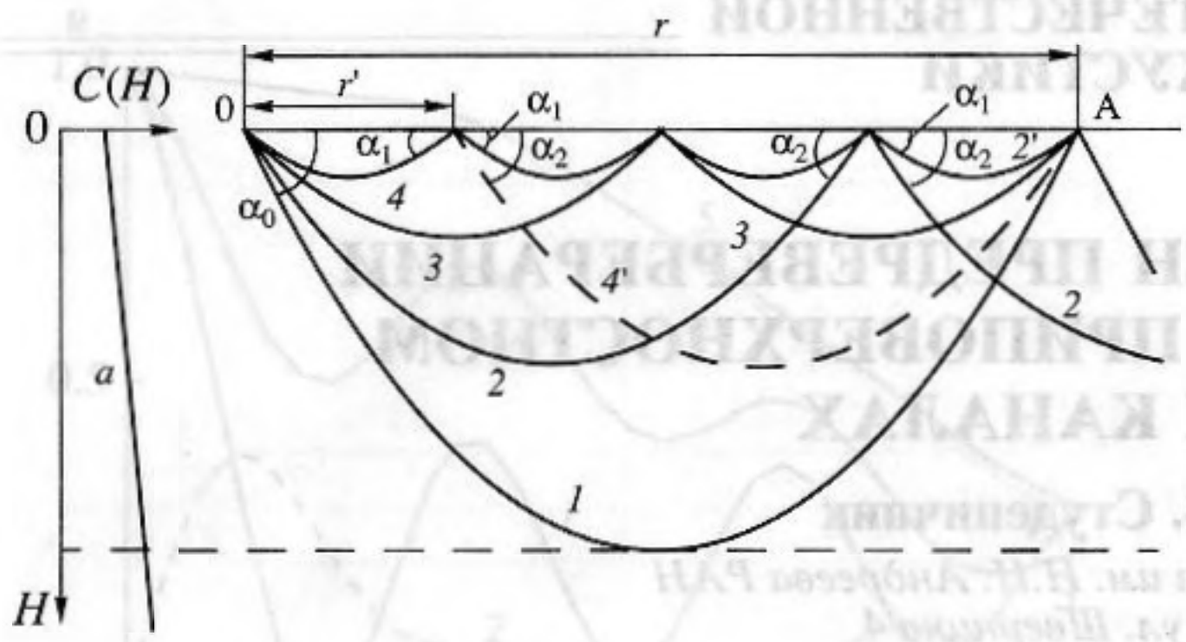

Рис. 1. Профиль скорости звука и лучевая картина, демонстрирующая механизм образования предреверберации в приповерхностном канале. Источник и приемник на оси канала. r – расстояние, H – глубина, a – относительный градиент скорости звука.

дающих их предреверберационных составляющих. В работе [10] отмечалось, что в принятом сигнале наряду с регулярной составляющей, присутствует и некоторый сопровождающий её шум, возникающий перед ней и продолжающийся некоторое время после нее. Из публикаций последнего времени можно отметить, может быть, только работы [11–13]. Но в них рассматриваться только когерентность интегральных уровней поля без идентификации его составляющих и временного разрешения регулярных и случайных компонент.

В результате изученности большого массива экспериментальных материалов, полученных в различных регионах Мирового океана, и выявленных закономерностей регулярных и рассеянных составляющих поля [2–8] было установлено:

1. Предреверберация представляет собой некогерентное звуковое поле, обусловленное рассеянием на объемных или поверхностных неоднородностях, предваряющее приход основных рефрагированных сигналов. В отличие от реверберации, заключающейся в рассеянии звука в обратном направлении, предреверберация обусловлена рассеянием в прямом направлении.

2. Если реверберация является процессом затухающим, то предреверберация представляет собой процесс с нарастанием сигнала по амплитуде, уровень которого к моменту прихода детерминированного сигнала достигает своего максимума, сливаясь фактически с регулярным сигналом. Отношение уровней предреверберационного сигнала и основной составляющей на больших расстояниях может достигать значений 0.1–1.0.

3. С ростом дистанции длительность предреверберации растет пропорционально номеру цикла и может достигать сотен миллисекунд на расстояниях в несколько сот километров. Максимальная длительность предреверберации лимитируется разностью времен прихода соседних компонент. По мере уменьшения характеристических углов (углов пересечения лучами оси канала) и вследствие трансформации регулярных компонент в рассеянные предреверберационные составляющие у оси канала реализуется непрерывный равновероятный приход перекрывающихся во времени когерентных и некогерентных сигналов. Поле вместо дискретной, четко квантованной по временам и углам прихода структуры [4–6], приобретает вид сплошного шумоподобного процесса с равновероятным распределением амплитуд, углов и времен прихода в довольно широких пределах. Поле становится полностью некогерентным.

4. В первом лучевом цикле сигналы, приходящие по лучам, касающимся дна, не имеют и не могут иметь предреверберации. Она формируется только для сигналов, совершивших по два и более рефракционных цикла. В условиях зональной структуры поля предреверберация слабо выражена на расстояниях вплоть до перекрытия зон конвергенции и отсутствует в экстремальных точках и в зонах каустик.

5. Индикатрисы рассеяния объемной и поверхностной предреверберации в прямом направлении при уровнях –30 дБ достигают значений ±0.5–2.5°.

6. Детерминированные сигналы могут сопровождаться предреверберацией, проявляющейся и после их прихода, приобретая в этом случае форму, близкую к симметричной, благодаря предреверберационным составляющим, обусловленным рассеянием вбок [3].

Для иллюстрации принципиальных закономерностей в структуре поля в подводных волноводах и механизма образования предреверберации, рассмотрим поле в приповерхностном канале при наличии поверхностного волнения. Источник и приемник звука поместим на оси канала. Лучевая картина, демонстрирующая процесс формирования поля в детерминированных условиях и сопровождающей его поверхностной предреверберации, представлена на рис. 1. При гладкой поверхности из точки излучения О в точку приема А, при ограниченной глубине канала, может прийти только четко квантованное по углам и временам прихода множество рефрагированных лучей, совершивших 1, 2, … полных циклов. В рассматриваемом случае квантование по углам и временам прихода на любом расстоянии может быть записано в простой аналитической форме, отображающей строго дискретный приход детерминированных компонент [3]. Первым, в единственно реализуемом варианте, в точку А придет граничный луч *1*, обладающий максимальной скоростью. Предреверберация у этого луча отсутствует. Вторым придет луч *3*, совершивший два полных цикла. Далее придут лучи, совершившие 3 и более полных циклов. При взволнованной же поверхности, в точку А могут приходить и лучи, не подчи-

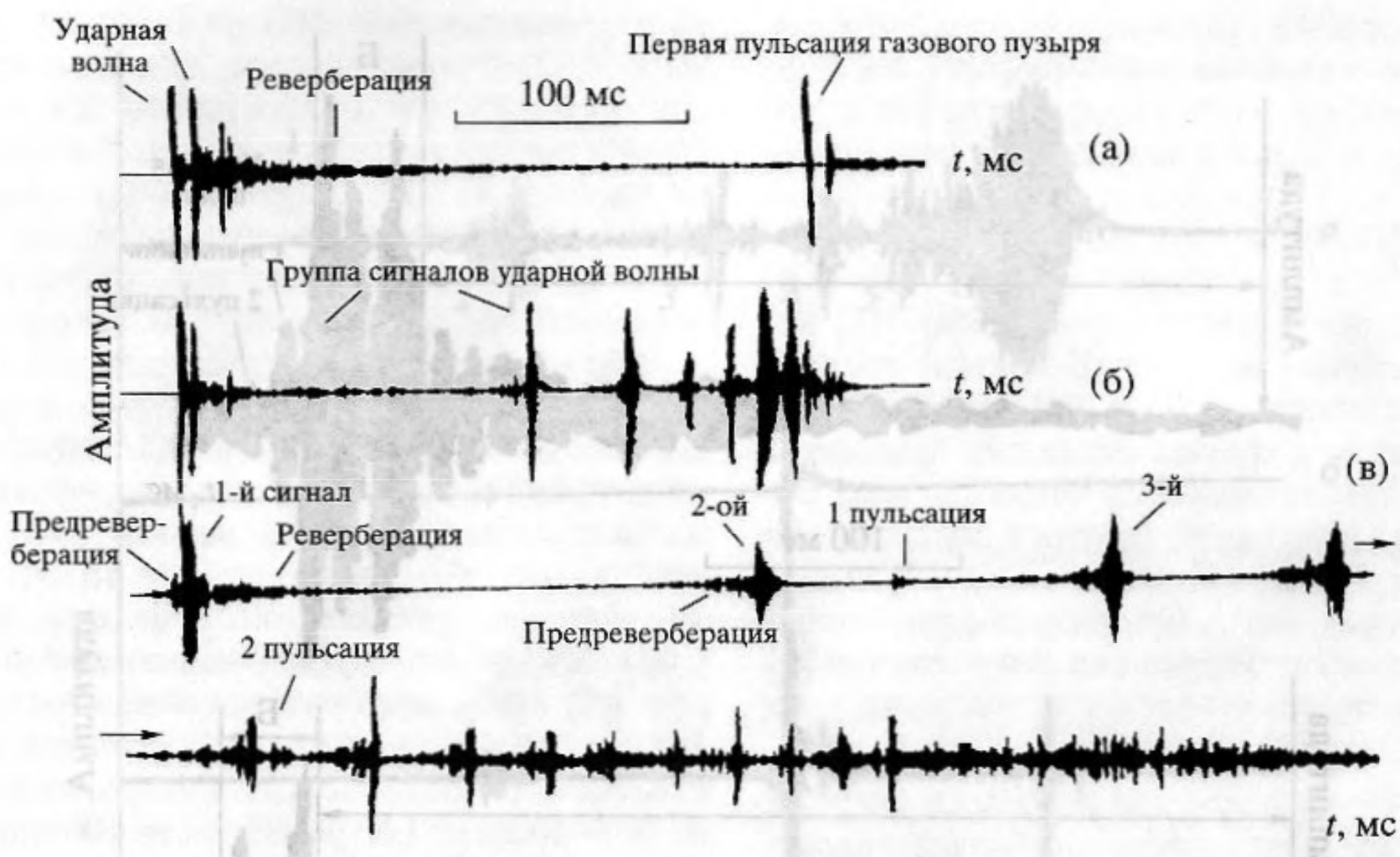

Рис. 2. Осциллограммы взрывных сигналов в подводном канале на расстояниях: 130 м (а), 37 (б) и 140 (в) км. Глубина взрывов – 35–40 м, приема – 60 м. Частота – 3 кГц.

няющиеся условию квантования в детерминированном волноводе. Опережая луч 3, в точку А могут приходить рассеянные, асимметричные по длине и углам прихода лучи *2* и *2'*, а также *4* и *4'*, имеющие одинаковые средние скорости и совершившие по одному отражению от поверхности. Их индикатрисы рассеяния лежат в пределах углов скольжения $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$. Любые другие комбинации пар рассеянных лучей при большем количестве отражений ведут к образованию предреверберации у последующих составляющих. При стремлении разницы в углах прихода и, соответственно, к равенству длин циклов *2–2'* и *4–4'*, предреверберационные компоненты трансформируются в детерминированный луч *3*. Аналогичен механизм образования предреверберации и в подводном канале. Только рассеивающими элементами там выступают объемные неоднородности. Для приповерхностного канала с линейным профилем скорости получено в простой форме выражение, отображающее зависимость относительной длительности предреверберации от расстояния в пределах первого граничного цикла [4]. В соответствии со степенью поверхностного волнения и концентрацией объемных неоднородностей изменяются частотно-зависимые абсолютные уровни, индикатриса рассеяния и длительность предреверберации.

Приведем несколько типичных структур звукового поля в подводном звуковом канале, демонстрирующих закономерности отдельных составляющих и всей пространственно-временной структуры поля в целом, и проанализируем основные характеристики предреверберации. Для этого используем данные, полученные в Черном море в осенний период в условиях подводного и устойчивого приповерхностного каналов. Глубина моря составляла 2000 м. Ось канала находилась на глубине 60 м. Скорость на оси 1460, у поверхности 1500, у дна 1505 м/с. Разница в скоростях у поверхности и дна обеспечивала выход к поверхности рефрагированных сигналов с углами скольжения 0–5° на расстояниях 34–40 км при разнице в углах выхода ±2°. Источниками звука служили взрывы зарядов весом 25 кг. Взрывы производились под слоем скачка на глубинах 30–40 м при скоростях звука 1470–1474 м/с. Прием сигналов осуществлялся на глубине 35 м. Частота 3 кГц. Полоса анализа 20%. Регистрация сигналов производилась с экрана электронно-лучевой трубки в линейном масштабе непосредственно из воды при волнении 2–3 балла. Скорость протяжки киноленты при записях – 326 мм/с. Пространственновременная и амплитудная структура звукового поля и вид ее отдельных составляющих, обеспечиваемых параметрами волновода в высокочастотной области, в ближней зоне (130 м), на расстоянии первого граничного цикла (37 км) и в зонах сплошной освещенности (140 км) представлены на рис. 2.

В ближней зоне видны одиночные сигналы ударной волны и первой пульсации газового пузыря. Период пульсации – 275 мс. Соотношения амплитуд ударной волны и первой пульсации на этой частоте лежат в пределах 20–25 дБ. На записи сигналы ударной волны, соответствующие прямой и отраженной от поверхности составляющим, ограничены по амплитуде соответственно на 20–22 и

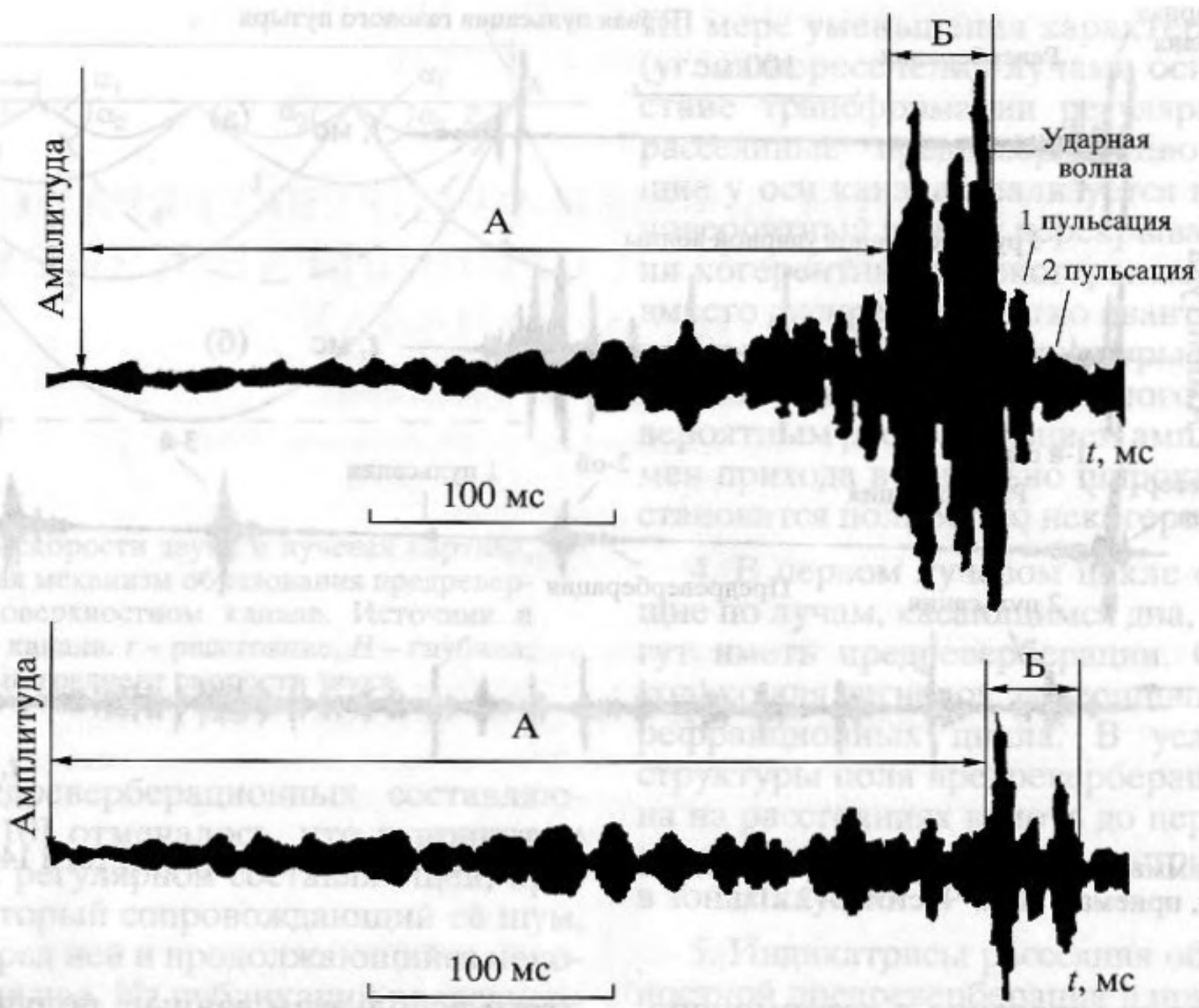

Рис. 3. Фрагменты осциллограмм сигналов в приповерхностном канале в северо-западной части Тихого океана на расстояниях 290 и 390 км. Глубина взрывов – 300 м, приема – 200 м. А – предреверберация, Б – основной сигнал. Амплитуды сигналов даны в линейном масштабе.

10–12 дБ. Сигналы пульсации записаны без ограничений. На малом расстоянии фронт сигналов характеризуется резким нарастанием их уровня. За сигналом видна продолжительная значительного уровня поверхностная реверберация. Объемная реверберация, наблюдаемая в промежутке между прямым и отраженным от поверхности сигналами, имеет уровень на 10 дБ меньше поверхностной реверберации. Эти же соотношения реализуются и от сигналов первой пульсации газового пузыря.

Сигналы в гидроакустическом волноводе обычно приходят группами по четыре сигнала, с относительно близкими временами прихода. На расстоянии 37 км, на расстоянии выхода в точку приема глубинного граничного луча и присутствия в системе сигналов всех допустимых компонент, обеспечиваемых параметрами данного волновода, первые составляющие достигают поверхности и сопровождаются, как и в ближнем поле, значительным уровнем реверберации. Их вступление по-прежнему характеризуется резким нарастанием уровня. Последующие сигналы, являясь чисто рефракционными, и не взаимодействующие ни с дном, ни с поверхностью, совершив по два и более полных цикла, сопровождаются отчетливо проявляющимися перед каждой из них дополнительными шумоподобными составляющими и размытием крутизны фронтов детерминированных компонент. Уровень их с течением времени растет и достигает максимума к моменту прихода основного сигнала. Выявленные характеристики рефракционных составляющих и получили название предреверберации. Реверберация у этих составляющих выражена значительно слабее. Временное разрешение четверок сигналов затруднено вследствие незначительных заглублений корреспондирующих точек. Частичное разделение (двоек) видно только у первого вступления.

На расстоянии 140 км промежуток времени между первым и последним сигналами возрос примерно пропорционально расстоянию (полная пропорциональность сохраняется только на отдельных расстояниях, кратных количеству рефракционных циклов, и при фиксированных характеристических углах). Реструктуировались времена прихода составляющих. Первый сигнал, достигающий поверхности, имеет четко выраженную реверберацию и незначительную по времени предреверберацию. Последующие сигналы, четко разделяющиеся по времени, сопровождаются значительным уровнем предреверберации. Их амплитуды к моменту вступления детерминированных сигналов достигают значений 0.3–0.4 от их максимумов. Времена предреверберации лежат в пределах 40–60 мс. Первый сигнал имеет

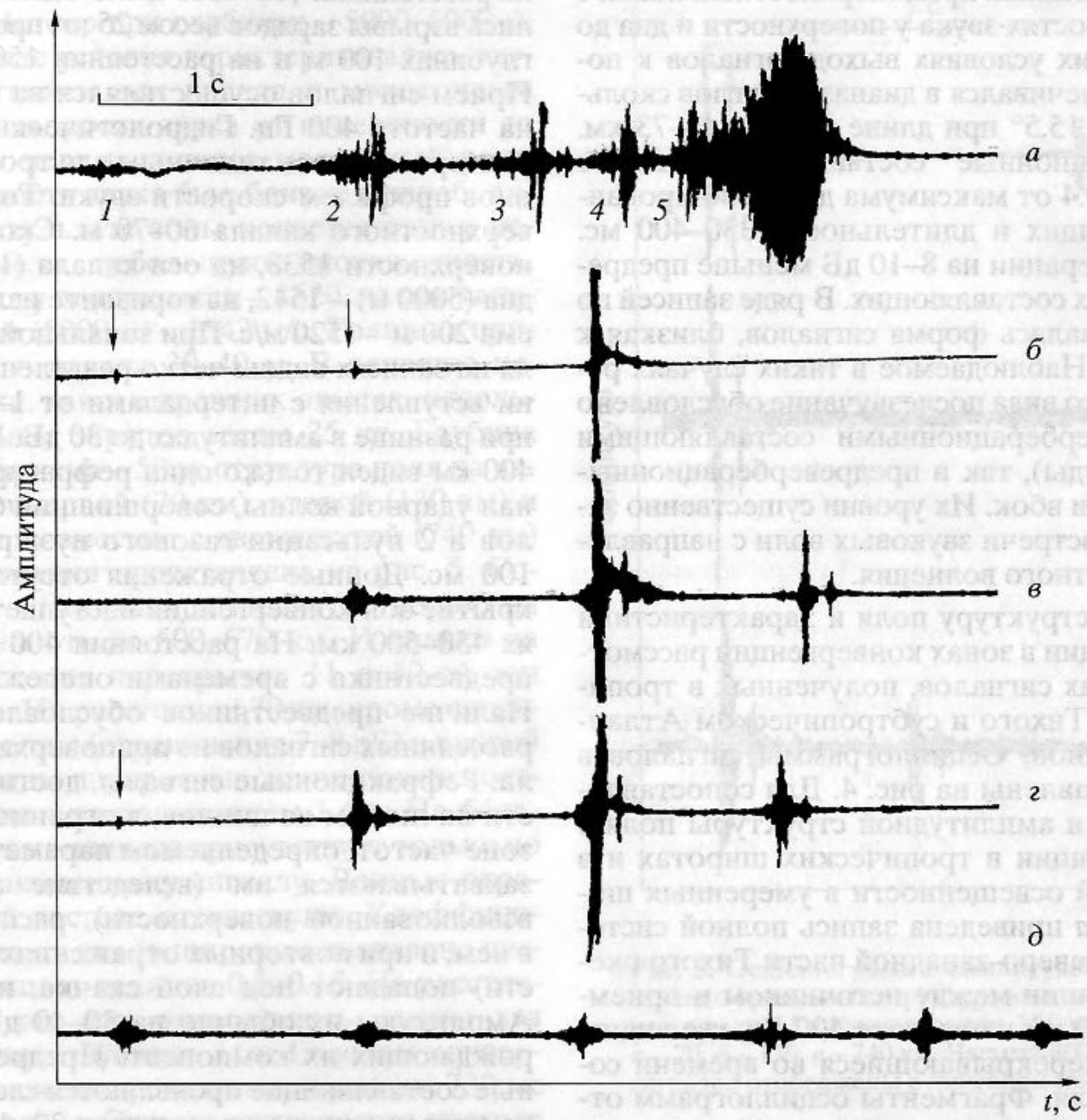

Рис. 4. Осциллограммы амплитудных и пространственно-временных структур сигналов в северной и центральной частях Тихого океана. Частота 400 Гц. *а* – северная часть. Расстояние – 500 км. Глубина взрыва и приема – 100 м. *б–д* – центральная часть. Глубина приема 200 м. *б* – расстояние – 400, *в* – 590, г – 735 км. *д* – 1500 км. *б–г* – глубина взрывов 100 м, *д* – 200 м. Амплитуды сигналов отображены в линейном масштабе.

предреверберацию длительностью 12 мс, что обусловлено прохождением его на некотором удалении от дна (40 м). Приосевые составляющие с увеличением расстояния, вследствие возрастающего действия предреверберации, теряют свои регулярные свойства, трансформируясь в случайные, перекрывающиеся во времени составляющие при равенстве их уровней. Поле становится полностью диффузным с равновероятным распределением фаз и амплитуд в диапазоне характеристических углов до ±5° и времен прихода до 200–300 мс.

На рис. 3 представлены фрагменты осциллограмм составляющих поля (четверок сигналов) взрывных источников на расстояниях 290 и 390 км в условиях, соответствующих фактически приповерхностному каналу. Частота 500 Гц. Углы скольжения у поверхности 13–14°. Записи получены в северных широтах центральной части Тихого океана на трассе протяженностью 1000 км при волнении поверхности океана – от 2–3 до 5–7 баллов. Трасса располагалась в широтном направлении за грядой Императорских гор вдоль поверхностных изотерм океана при температуре верхних слоев воды 15–16° по широте 45°. Начало трассы находилось при 173° восточной долготы, конец – на 175° западной долготы. Профили скорости звука характеризовались малым заглублением оси канала по трассе (40–100 м). Скорость звука у поверхности на расстояниях от точки приема до 500 км была равна 1490 м/с и только на расстоянии 1000 км увеличилась до 1495 м/с. В то же время на оси канала она изменялась в пределах от 1450 в точке приема до 1464 м/с в конечной точке на расстоянии 1000 км. У дна на глубине 5000 м скорость звука равнялась 1542 м/с. В опытах использовались взрывы зарядов весом 25 кг. Глубины взрывов – 300, приема – 200 м. Глубина океана вдоль трассы лежала в пределах 5000 м и только в точке приема превосходила 6000 м. При глубине источников 300 м (скорость звука 1460–1468 м/с)

реализовался мощный приповерхностный канал с разницей в скоростях звука у поверхности и дна до 50–55 м/с. В этих условиях выход сигналов к поверхности обеспечивался в диапазоне углов скольжения от 0° до 15.5° при длине циклов 45–73 км. Предреверберационные составляющие имеют уровни до 0.3–0.4 от максимума детерминированных составляющих и длительности 330–400 мс. Уровни реверберации на 8–10 дБ меньше предреверберационных составляющих. В ряде записей по трассе реализовалась форма сигналов, близкая к симметричной. Наблюдаемое в таких случаях реверберационного вида послезвучание обусловлено как чисто реверберационными составляющими (малой амплитуды), так и предреверберационными, рассеянными вбок. Их уровни существенно зависят от углов встречи звуковых волн с направлением поверхностного волнения.

Временную структуру поля и характеристики предреверберации в зонах конвергенции рассмотрим на примерах сигналов, полученных в тропическом районе Тихого и субтропическом Атлантического океанов. Осциллограммы сигналов в районах представлены на рис. 4. Для сопоставления временной и амплитудной структуры поля в зонах конвергенции в тропических широтах и в зонах сплошной освещенности в умеренных широтах на рис. 4*а* приведена запись полной системы сигналов в северо-западной части Тихого океана при расстоянии между источником и приемником звука 500 км на частоте 400 Гц, где видны раздельные и перекрывающиеся во времени составляющие поля. Фрагменты осциллограмм отдельных составляющих для этих серий взрывов в развернутом виде представлены на рис. 3. Первые 4 разделяющиеся по времени вступлений четверки сигналов распространяются в волноводе с отражениями от поверхности. Перекрывающуюся во времени, оконечную часть записи составляют чисто рефракционные сигналы, распространяющиеся у оси канала без отражений от поверхности. Общее время прохождения сигналов – 3.5 с. Приосевая шумоподобная нерегулярная часть сигналов, формирующаяся составляющими с характеристическими углами ±11–12° и при значительном влиянии предреверберационных компонент, составляет 800 мс. Время предреверберации разделяющихся компонент лежит в пределах 100–350 мс. Первая четверка сигналов, опережающая последующие на 1.26 с и отражающаяся от поверхности при углах скольжения 16°, на 15–20 дБ слабее последующих и содержит ее заметную когерентную часть. Уровни некогерентных приосевых перекрывающихся во времени составляющих превосходят уровни отдельных составляющих на 5–6 дБ.

На рис. 4*б–д* представлены амплитудные и пространственно-временные структуры поля в Тихом океане (юго-восточнее Гавайских островов) на расстояниях 400–1500 км. В опытах использовались взрывы зарядов весом 25 кг, производимые на глубинах 100 м и на расстоянии 1500 км – 200 м. Прием сигналов осуществлялся на глубине 200 м на частота 400 Гц. Гидрологические условия характеризовались типичным для тропических районов профилем скорости звука. Толщина приповерхностного канала 60–70 м. Скорость звука у поверхности 1538, на оси канала (1000 м) 1490, у дна (5000 м) – 1542, на горизонте излучения и приема 200 м – 1520 м/с. При зональной структуре поля на записях видны четко разделенные по времени вступления с интервалами от 1–1.14 до 0.55 с при разнице в амплитудах до 30 дБ. На расстоянии 400 км виден только один рефрагированный сигнал ударной волны, совершивший 6 полных циклов и 2 пульсации газового пузыря с периодом 100 мс. Донные отражения отсутствуют. Перекрытие зон конвергенции наступает на дистанциях 450–500 км. На расстоянии 400 км видны два предвестника с временами опережения по 1.1 с. Наличие предвестников обусловлено приходом рассеянных сигналов из приповерхностного канала. Рефракционные сигналы, достигая поверхности на любом из циклов, в ограниченном диапазоне частот, определяемом параметрами канала, захватываются им (вследствие рассеяния на взволнованной поверхности), распространяются в нем, и при повторных отражениях (от поверхности) попадают под слой скачка, на приемники. Амплитуды их обычно на 30–40 дБ меньше порождающих их компонент. Предреверберационные составляющие проявляются слабо. Их времена опережения не превосходят 30–40 мс, а уровни на 30–40 дБ меньше уровня детерминированных составляющих. На расстояниях 590–1500 км количество сигналов возрастает до 6. Предреверберация наиболее четко проявляется на расстояниях 590 и 735 км у вторых компонент. Время предреверберации достигает 120 мс, а уровень не превосходит 0.10–0.15 уровня детерминированных составляющих. У других составляющих время и уровень предреверберации меньше. Только на расстоянии 1500 км в 25–30 зонах конвергенции у отдельных компонент время предреверберации достигает 150 мс, а амплитуда возрастает до 0.3–0.4 от максимума. Разница времен вступлений между первым и вторым сигналами как в умеренных, так и в тропических районах, составляет 1.1–1.26 с. Эта удвоенная разность времен прихода рефрагированных компонент определяет длину волны критической частоты волноводов. Отсюда следует, что в Тихом океане при глубине 5000 м в зависимости от профиля скорости звука она изменяется в пределах 0.4–0.45 Гц.

Структуру поля в зонах конвергенции в Атлантическом океане рассмотрим на записях, полученных на трассе протяженностью 740 км. Трасса лежала в глубоководной Канарской котловине юго-

западнее острова Мадейра, по направлению к банке Большой Метеор при глубинах – 5000–6000 м. Гидрологические условия характеризовались глубинным залеганием оси канала и монотонным уменьшением скорости звука от поверхности до 1700 м, после чего начинался медленный рост. Профиль скорости звука был близок к параболическому. В результате зоны конвергенции у поверхности имели небольшую протяженность. Скорость звука у поверхности – 1520, на оси канала – 1497, у дна (5000 м) – 1542 м/с. Толщина приповерхностного канала 30–40 м. В качестве источников звука, как и в прежних опытах, использовались взрывы зарядов весом 25 кг. Глубина взрывов 150, приема – 50 м. структура поля на частоте 400 Гц в первой (70 км), второй (130 км) и одиннадцатой, совместно с двенадцатой (740 км) зонах конвергенции представлена на рис. 5. Состоит она из единичных сигналов (четверок) на расстояниях вплоть до 600–670 км. И только на 740 км происходит перекрытие 11 и 12-ой зон конвергенции. На расстоянии 70 км, кроме сигналов ударной волны (ограничение 7–8 дБ) и первой пульсации, видны двукратные донно-поверхностные отражения с запаздыванием 1.4 с. На бóльших удалениях на записях присутствует только по одному рефракционному сигналу. Донные отражения на этой частоте отсутствуют. Коэффициент отражения от дна (в широком диапазоне частот) не превышает величин 0.1–0.15. На расстоянии 740 км, как уже упоминалось, видны два сигнала, соответствующие 11 и 12 зонам конвергенции. Разность их времен запаздывания 730 мс или около 1 мс/км. Отсюда критическая частота канала равна 0.67 Гц против 0.4–0.45 Гц в Тихом океане при той же глубине (5000 м). Соотношение уровней ударной волны и первой пульсации на частоте 400 Гц составляет 8–12 дБ. Из рассмотренных записей видно, что в этом регионе Атлантического океана, предреверберация в зонах конвергенции с уровнем –20–40 дБ не проявляется. Это в первую очередь связано с большой устойчивостью и однородностью профиля скорости звука по трассе, монотонностью градиента скорости по глубине в верхних и нижних слоя океана и приемом сигналов у каустики. Размытие зон конвергенции описывается функцией Эйри. При приеме на больших глубинах (200–300 м), вне зоны каустик, предреверберация также незначительна и не превосходит по времени 10–20 мс. На расстоянии 740 км в 12 зоне конвергенции (вторая группа сигналов на рис. 5*в*) проявляется временное разделение четверки лучей. Разделение четверок составляющих видно и в донных отражениях (рис. 4*а*).

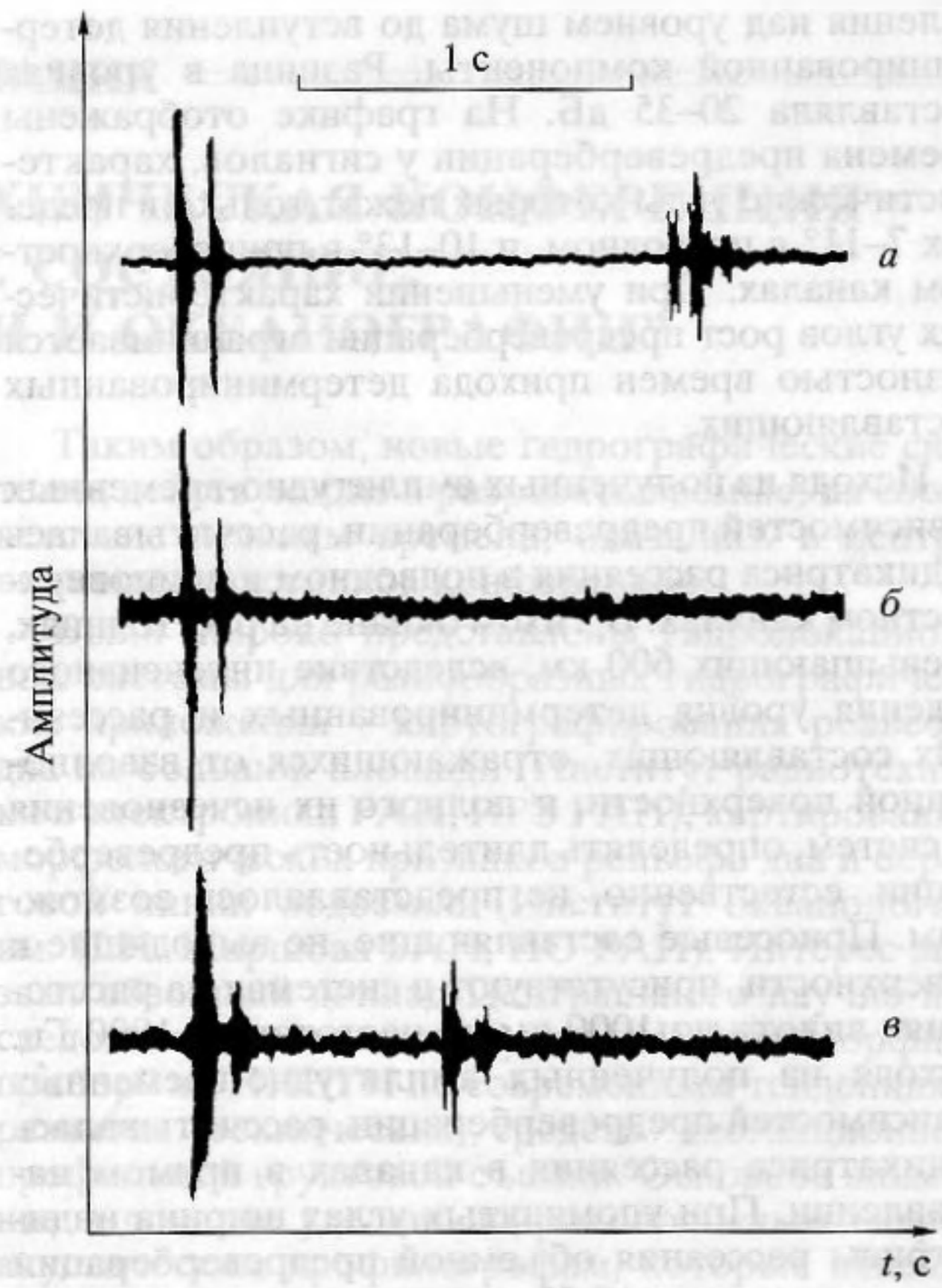

Рис. 5. Осциллограммы амплитудных и пространственно-временных структур сигналов в Атлантическом океане. Глубина взрывов 150 м, приема – 50 м. *а* – 70, *б* – 130, *в* – 740 км. Частота 400 Гц. Амплитуды сигналов отображены в линейном масштабе.

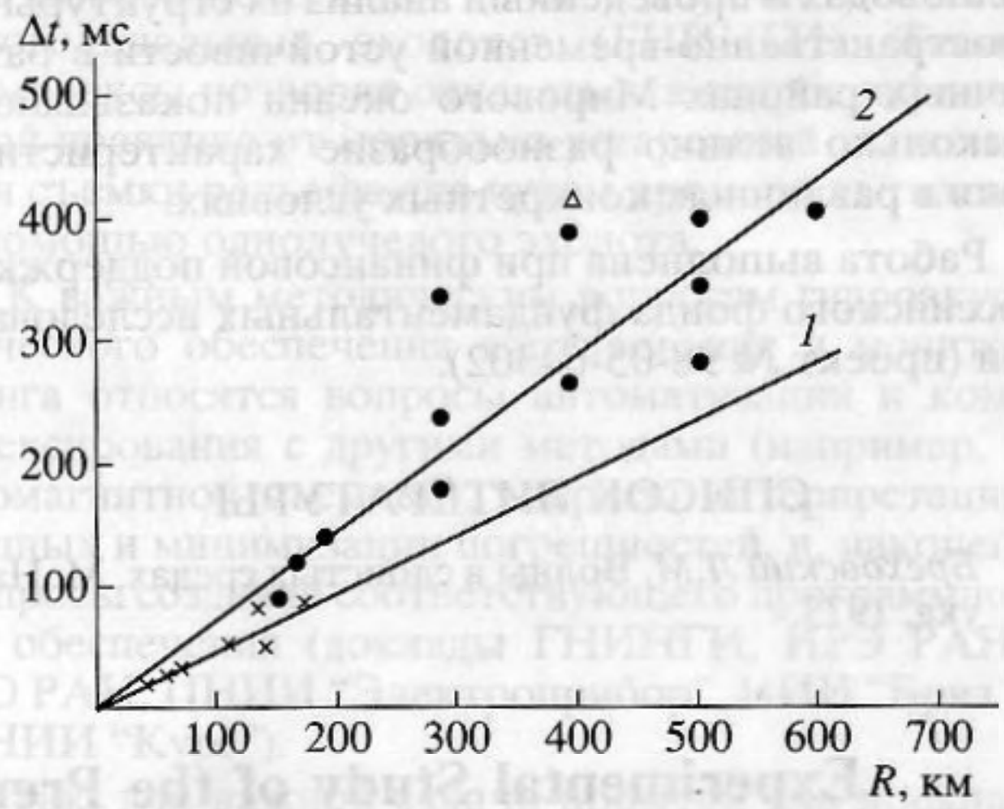

Рис. 6. Зависимость длительности предреверберации от расстояния в подводном (крестики) и приповерхностном (точки) звуковых каналах. Треугольник – данные работы [9].

На рис. 6 представлены усредненные, наиболее четко проявляющиеся зависимости длительности объемной предреверберации от расстояния в подводном канале Черного моря и поверхностной в северо-западной части Тихого океана. Прямая *1* аппроксимирует усредненный рост предреверберации (крестики) в подводном, прямая *2* (точки) – в приповерхностном каналах. Время предреверберации определялось в момента ее по-

явления над уровнем шума до вступления детерминированной компоненты. Разница в уровнях составляла 20–35 дБ. На графике отображены времена предреверберации у сигналов, характеристические углы которых лежат только в пределах 7–11° в подводном, и 10–13° в приповерхностном каналах. При уменьшении характеристических углов рост предреверберации ограничивается разностью времен прихода детерминированных составляющих.

Исходя из полученных амплитудно-временных зависимостей предреверберации, рассчитывалась индикатриса рассеяния в подводном и приповерхностном каналах. В Тихом океане на расстояниях, превышающих 600 км, вследствие интенсивного падения уровня детерминированных и рассеянных составляющих, отражающихся от взволнованной поверхности, и полного их исчезновения из систем, определять длительность предреверберации, естественно, не представлялось возможным. Приосевые составляющие, не выходящие к поверхности, присутствуют в системах на расстояниях вплоть до 1000 км на частотах до 1000 Гц. Исходя из полученных амплитудно-временны́х зависимостей предреверберации, рассчитывалась индикатриса рассеяния в каналах в прямом направлении. При упомянутых углах ширина индикатрисы рассеяния объемной предреверберации лежит в пределах ±0.5°, приповерхностной достигает ±2.5°. Боковое поле ограничивалось уровнем –20–35 дБ от уровня зеркальной составляющей.

Представленные экспериментальные результаты исследований звуковых полей в подводных волноводах и проведенный анализ их структуры и пространственно-временной устойчивости в различных районах Мирового океана показывают насколько велико разнообразие характеристик поля в различных конкретных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 98-05-64302).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховский Л.М.* Волны в слоистых средах. М. Наука, 1973.
2. *Студеничник Н.В.* Явление предреверберации в подводном звуковом канале. Тезисы докладов 9 Всесоюзной акустической конференции (секция Д IV). М. Акуст. ин-т АН СССР. 1977. С. 45–48.
3. *Студеничник Н.В.* Предреверберация в приповерхностном и подводном звуковых каналах. Труды Третьего семинара "Акустические статистические модели океана". Акуст. ин-т. М. 1981. С. 48–64.
4. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В.* К теории предреверберации в океане. ДАН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 211–213.
5. *Студеничник Н.В.* Предреверберация и некоторые механизмы затухания звука в подводном звуковом канале. Труды четвертого семинара "Акустические статистические модели океана". Акуст. ин-т. М. 1982. С. 19–39.
6. *Студеничник Н.В.* Предреверберация и когерентность поля при распространении сигналов на большие расстояния. Труды тринадцатой Всесоюзной школы-семинара. Акуст. ин-т. М. 1984. С. 29–37.
7. *Студеничник Н.В.* Развитие методов исследования звуковых полей в подводных волноводах. Акуст. журн. 1997. Т. 44. № 2. С. 283–286.
8. *Студеничник Н.В.* Звуковые поля в подводных волноводах. Сборник трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М. ГЕОС. 1998. С. 330–335.
9. *Попов Р.Ю., Тюрин П.Г.* О вертикальной корреляции шумов, сопровождающих приходы сигнала по отдельным лучам от взрывного источника в глубоком море. Тезисы докладов 9 Всесоюзной акустической конференции (секция IV). М.: Акуст. ин-т АН СССР. 1977. С. 85–87.
10. *Kibblewhite A.C., Denham R.N.* Hydroacoustic Signals from the CHASE V Explosion. J. Acoust. Soc. Amer. 1964. V. 45. № 4. P. 944–956.
11. *Badiey M., Simmen J., Forsythe S.* Freguency dependence of broadband propagation in coastal regions // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 6. P. 3361–3370.
12. *Dahl P.H., Plant W.J., Nutzel B., Schmidt A., Herwig H.* Tearray E.A. Simultaneous acoustic and microwafe backscattering from the sea surface // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 5. P. 2583–2595.
13. *Dahl P.H., Plant W.* The variability of high-freguency asoustic backscatter from the region near the sea surface // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101. № 5. P. 2596–2602.

Experimental Study of the Prereverberation Times in Deep-Water and Surface Sound Channels

N. V. Studenichnik

Abstract—Experimental data on the volume and surface prereverberation are presented. The main prereverberation features and parameters are considered, and the mechanism and the theory of the phenomenon are discussed. The range dependences of the prereverberation times are analyzed for different ocean regions and for the distances from 180 to 1500 km. Quantitative data on the prereverberation times are presented. The widths of the scattering diagrams are estimated for the underwater and surface sound channels.