АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 5, с. 675–683

УДК 534.883+534.843.242

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННÁЯ СТРУКТУРА НИЗКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

© 2002 г. Н. В. Студеничник

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

Поступила в редакцию 29.03. 2001 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований тонкой структуры акустических полей в подводном волноводе в диапазоне инфразвуковых и низких звуковых частот. Исследования выполнены в Чёрном море на трассе протяженностью до 600 км с использованием взрывных источников. Проанализированы энергетические, пространственно-временные и частотные характеристики звукового поля. Экспериментально исследована геометрическая дисперсия первой нормальной волны. Исследована роль неоднородностей канала в нарушении когерентных свойств поля в различных диапазонах частот. На основании экспериментально полученных результатов найдено распределение критических частот волновода по глубине и определены границы применимости волновых и лучевых методов расчёта. Обсуждается корректность использования фазовых методов расчёта звуковых полей в условиях волноводов с дисперсией. Выявлена и объяснена частотно-угловая зависимость эффективного коэффициента затухания звука в подводном волноводе.

Достоверные сведения о тонкой структуре звуковых полей в подводных волноводах на дальних и сверхдальних расстояниях остаются до сих пор приоритетными направлениями в изучении акустики океана. Они необходимы для понимания физической сущности происходящих в океане явлений и для конкретных технических разработок. В этом плане главное место в проблеме занимает выявление доминирующих закономерностей звукового поля (в соответствующих диапазонах частот), которые определяют устойчивую структуру звукового поля, обусловленную детерминированными неоднородностями, и нерегулярных составляющих звукового поля, которые обусловлены случайными неоднородностями. Развиваемые автором, начиная с 50-х годов, методы исследований структуры звуковых полей, основанные на разделении и идентификации составляющих поля по временам распространения, углам прихода и частотам в каждой полосе частот, дали возможность экспериментально выявить и теоретически на основании фундаментальных разработок Л.М. Бреховских [1] объяснить ряд новых явлений и особенностей тонкой структуры звуковых полей в различных районах Мирового океана, изучить их механизм формирования [2–7]. В частности: изучить природу и частотные особенности звукового поля в зоне тени, волноводные свойства поверхностных слоёв океана, исследовать пространственно-временную и частотную зависимость суммарной длительности (времени затягивания) сигналов от расстояния и глубины, выявить и оценить возможность решения обратных задач акустики океана, разработать лучевой метод определения координат источника звука (на основе структуры звукового поля), открыть явление предреверберации и разработать его теорию, изучить ширину индикатрисы рассеяния рефракционных составляющих (в прямом направлении), обусловленную объёмными неоднородностями и поверхностным волнением, выявить зависимость протяжённости рефракционных циклов от частоты и, соответственно, частотной зависимости удалённости зон конвергенции от источника.

В представленной статье изучены пространственно-временнáя структура звукового поля и энергетическая ёмкость подводного звукового канала в данной полосе частот (используется 1/3-октавный фильтр), исследована "геометрическая" дисперсия скорости звука в подводном канале и обосновано вырождение его рефракционно-волноводных свойств, изучены фазовая устойчивость волновых фронтов в волноводе с дисперсией и условия для формирования нормальных волн в реальных условиях подводного звукового канала, исследованы причины и механизм нарушения когерентности регулярных составляющих звукового поля в зависимости от расстояния и частоты, экспериментально определены критические частоты различных волноводов и частотные границы применимости лучевых методов расчёта звуковых полей, границы применимости использования энергетических методов расчёта звуковых полей в волноводе с дисперсией, выявлена и объяснена частотно-угловая зависимость эффективного коэффициента затухания звука в подводном звуковом канале.

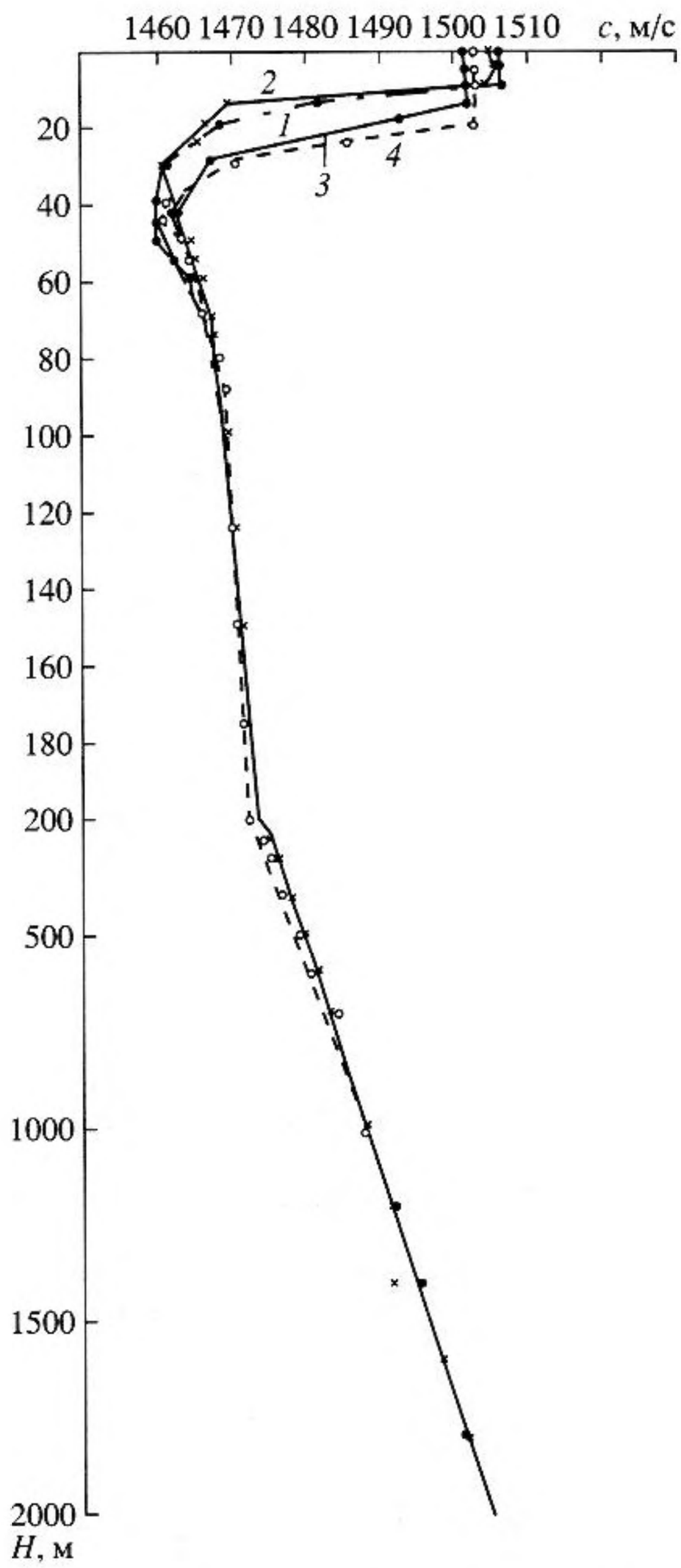

Рис. 1. Профили скорости звука по глубине вдоль трассы исследований на расстояниях 0 (1), 150 (2), 300 (3), 600 км (4) в Чёрном море.

Эксперименты были выполнены в центральной части Чёрного моря на трассе протяжённостью до 600 км. Трасса располагалась в широтном направлении под углом 285° от приёмного судна при глубине моря 2000 м. Гидрологические условия вдоль трассы довольно стабильны и характеризовались устойчивым подводным звуковым каналом с осью на глубинах 30–50 м и слабым приповерхностным каналом, толщиной 5–20 м. Профили скорости звука по трассе представлены на рис. 1. Волнение моря составляло 1–3 балла. Суда в точках приёма и излучения лежали в свободном дрейфе. Расстояние между судами определялось навигационными средствами и уточнялось по временам пробега акустических сигналов. Источниками звука служили взрывы зарядов (120 штук) весом 2.5 кг при глубине взрывов 10–80 м. Рабочие (номинальные) дистанции: 150, 300 и 600 км. Приём сигналов осуществляли на ненаправленные гидрофоны, размещённые на глубинах 10, 35, 50 и 80 м. Сигналы регистрировали в диапазоне частот 1 Гц–5 кГц.

Анализ пространственно-временнóй и частотно-энергетической структуры поля и дисперсионных свойств волновода проведём на примере низкочастотной широкополосной записи, полученной на расстоянии 600 км. Типичная форма взрывного сигнала у оси канала представлена на рис. 2 для глубины взрыва 35 м и приёма – 50 м. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат – амплитуда сигналов в линейном масштабе. Запись произведена в диапазоне частот 1–300 Гц. Вертикальные линии на рисунке – метки времени, проведенные через 100 мс.

Совокупность принятых составляющих системы сигналов, соответствующих четверкам лучей в диапазоне инфразвуковых и низких звуковых частот, порождена ударной волной и двумя пульсациям газового пузыря. Системы сформированы чисто водными лучами. Сигналы донно-поверхностных отражений отсутствуют. В начале записи видны раздельные регулярные составляющие двух систем – ударной волны (сигналы 1, 2, 3, ...) и первой пульсации (сигналы 1', 2', 3', ...) с периодом 125 мс. Составляющие, обусловленные второй пульсацией, обладая уровнем на 10–15 дБ ниже уровня ударной волны, маскируются ими и на записи выделяются слабо. Время затягивания в широкой полосе, или, что то же самое, по высокочастотной составляющей, равно 4.95 с (с пульсациями 5.2 с). Разности времён запаздывания первых регулярных составляющих равны 250, 240, 200, ... мс, а последующих – постепенно уменьшаются и в пределе стремятся к нулю.

Регистрируемому звуковому давлению как функции времени можно сопоставить квазисинусоидальную функцию, отображающую геометрическую дисперсию скорости звука в канале. Квазипериод этой функции равен удвоенной разности времен прихода сигналов по четверкам лучей, для которых число циклов различается на единицу. Наблюдаемые уровни отдельных составляющих, определяемые факторами фокусировки, изменяются в пределах 3–4 дБ. В области развитой дисперсии (частоты 40–300 Гц) общее повышение уровня, обусловленное синфазным сложением регулярных составляющих, не превосходит 2–3 дБ. На высокой частоте полный диапазон характеристических углов (углов пересечения лучами оси канала), удерживаемых каналом, лежит в пределах ±14°. В низкочастотной области он существенно зависит от частоты и стремится к нулю на критической частоте всего волновода.

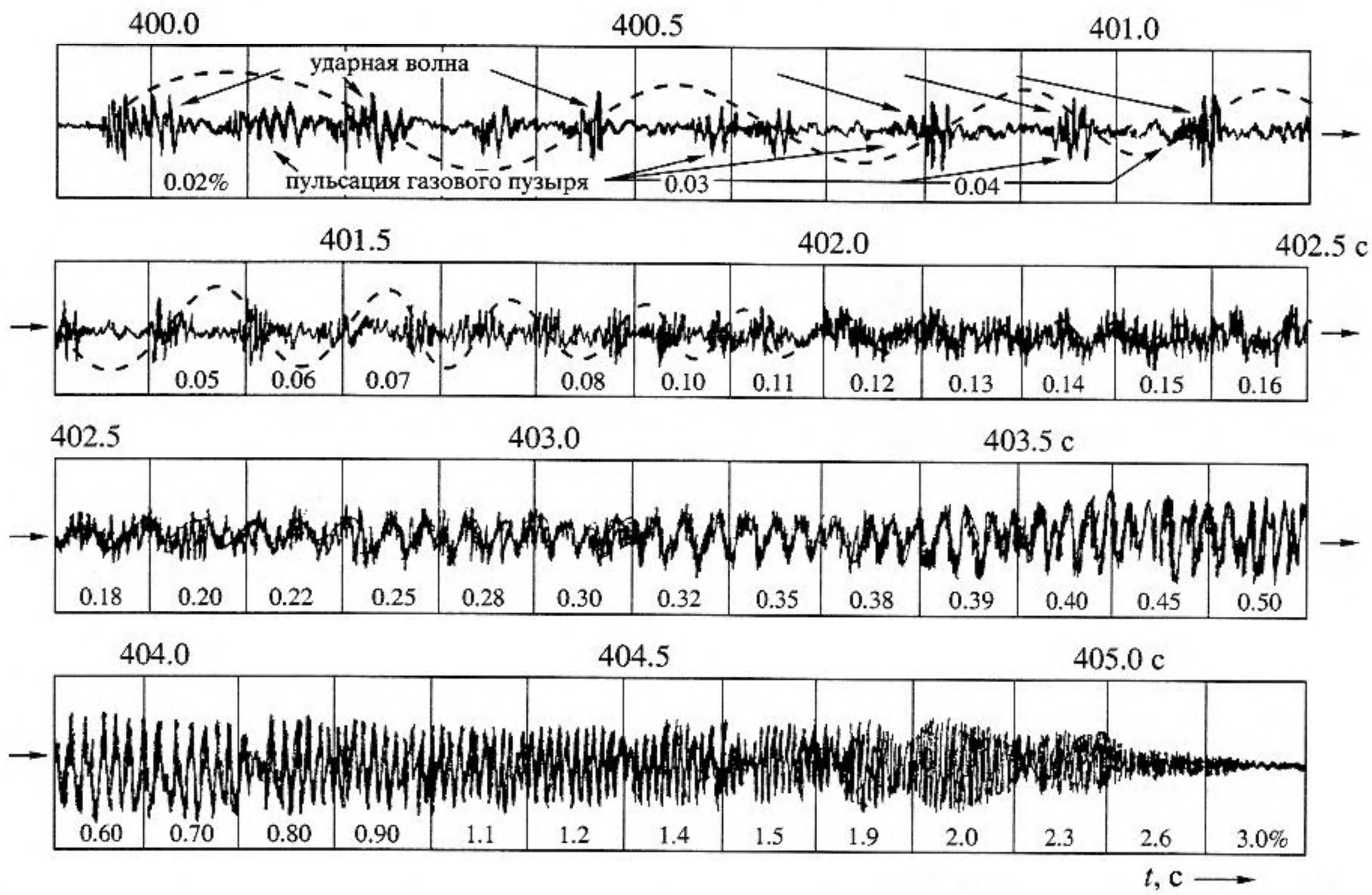

Рис. 2. Структура взрывного широкополосного сигнала в подводном звуковом канале в области низких частот. Расстояние 600 км. Глубина взрыва 35, приёма – 50 м. а–г – последовательные участки всей системы сигналов. 1, 2, 3 и т.д.– отдельные вступления четвёрок ударной волны; 1', 2', 3' и т.д. – четвёрки сигналов первой пульсации газового пузыря. f_0 = 100 Гц.

В начале записи отдельные составляющие, порожденные ударной волной, сопоставлены с квазисинусоидой, соответствующей самым низким частотам рефрагированных волн. Для достижения близкого к синфазному сложению составляющих и формирования явно выраженной дисперсии низкочастотного спектра необходимо расстояние, значительно превосходящее 600 км. Для критической частоты всего волновода оно должно быть таким, чтобы разности времён приходов первой и второй, а также второй и третьей четвёрок сигналов были равны, что выполнимо только на бесконечности. Численно в пределе это время равно разности времён пробега сигналов высокой частоты по оси канала и граничному лучу (в пределах одного цикла). Удвоенная эта величина определяет предельную критическую частоту всего волновода и равна 1.8 Гц. Последующие по времени составляющие, группируясь во всё более тонких приосевых слоях, обусловливают дисперсию и определяют критические частоты более высокочастотной области спектра. В отличие от дисперсии в мелком море, где первыми в водной волне приходят высокочастотные составляющие спектра и нормальные волны более низких номеров, в подводном (приповерхностном) канале первыми вступают низкочастотные составляющие и сигналы с более высокими номерами мод [1, 8, 9].

Временны́е интервалы в четвёрках сигналов определяются положением корреспондирующих точек. При выбранных глубинах источника и приёмника визуальное разрешение отдельных составляющих затруднено. Исключение составляют лишь несколько первых четвёрок, в которых можно различить каждый из сигналов. Для первой четверки суммарное расширение на расстоянии 600 км, совершившей на этом расстоянии 16 полных циклов, составляет 80 мс, в то время как в первом цикле, на расстоянии 37 км, оно равно 5 мс. Длительность сигналов в зависимости от расстояния и числа циклов растёт по закону, близкому к квадратичному и имеет пилообразный характер с периодом, равным длине граничного цикла, времена запаздываний в четвёрках и между четвёрками при фиксированных характеристических углах растут линейно с расстоянием. Существующие строго дискретные пространственно-временные и пространственно-угловые зависимости регулярных составляющих в слоистых волноводах дают возможность решения обратных задач акустики океана: по структуре поля определять координаты источника звука [5] и восстанавливать параметры канала.

При расширении полосы приёма до 2–5 кГц формы отдельных составляющих значительно изменяются. С одной стороны, крутизна фронтов сигналов в четверках обостряется, а с другой –

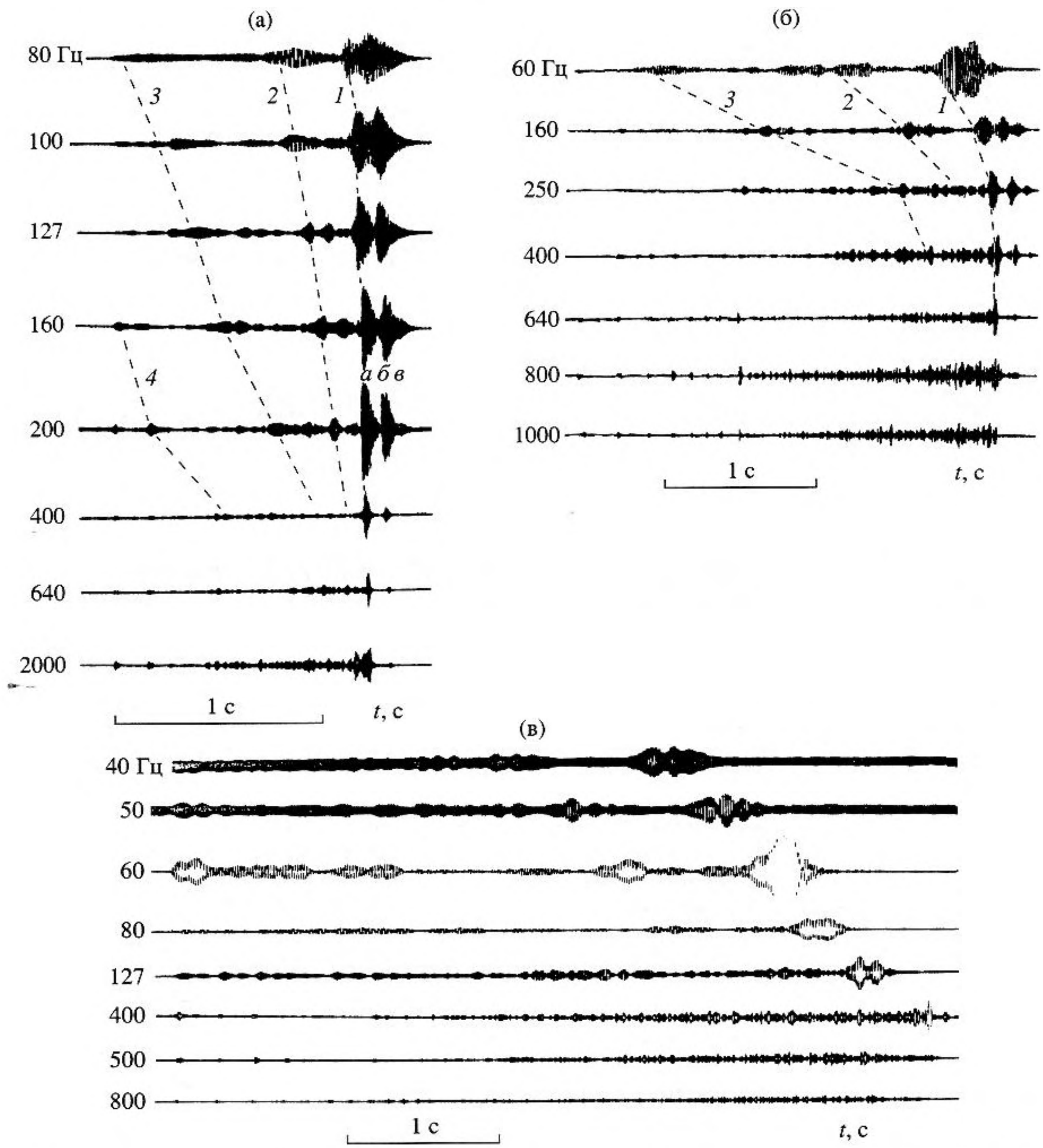

Рис. 3. Структура взрывных сигналов в подводном звуковом канале в зависимости от расстояния и частоты. Глубина взрывов 35 м, приёма – 50 м. а – 150 (частоты 80–2000 Гц); б – 300 (60–1000 Гц); в – 600 км (40–800 Гц). Кривые *1*, *2*, *3* аппроксимируют первую, вторую и третью нормальные волны. Частотная полоса анализа – 1/3 октавы.

чётко проявляющаяся дисперсия в низкочастотной области (рис. 2) при таком расширении маскируется дополнительными сигналами и становится менее выразительной. Это обусловлено обогащением регулярных составляющих высокими частотами и, соответственно, возросшей ролью предреверберации [2–7]. В результате временны́е интервалы между регулярными составляющими, начиная с 5–10 первых, полностью перекрываются предреверберационными составляющими. Особенно сильным изменениям подвержены приосевые составляющие, где уровни регулярных и предреверберационных составляющих сравниваются по амплитудам. Здесь, к концу системы сигналов, формируется сплошной шумоподобного вида конгломерат когерентных и некогерентных составляющих с равновероятным распределением фаз и амплитуд в диапазоне характеристических углов от 0° до ±5–7°. Исключение составляют лишь оконечные участки систем первых пульсаций (обеднённых высокими частотами), где чётко проявляется дисперсия на частотах 80–300 Гц. Отличие в уровнях сигналов, порожденных ударной волной и первой пульсацией

в широкой полосе частот (20 Гц–5 кГц) на расстояниях 150, 300 и 600 км составляет соответственно 15, 10, 6 дБ, против 3–4 дБ в суженной низкочастотной (1–300 Гц) области.

Проведенный анализ в широкой полосе частот отображает, в основном, наиболее общие, и в большей степени, качественные характеристики звуковых полей в подводном волноводе. Тонкая структура поля и основные количественные характеристики, соответствующие взаимодействию звуковых волн с неоднородностями волновода, могут быть получены с использованием спектрального анализа. С этой целью на рис. 3 а, б, в представлены записи сигналов в 1/3-октавных полосах частот в диапазоне от 40 Гц до 2 кГц при нахождении источника (на глубине 35 м) и приёмника (50 м) у оси канала. Амплитуды сигналов отображены в линейном масштабе. Длительность сигналов на высоких частотах на расстояниях 150, 300 и 600 км составляет соответственно 1250, 2790 и 4950 мс. При смещении в область низких частот она монотонно убывает, а на частотах 40–80 Гц становится равной 1110, 2105 и 3100 мс и далее уменьшается до нуля на критической частоте (1.8 Гц) всего волновода (рис. 2). Первые сигналы на высоких частотах разделяются по времени. Начиная со средины реализаций, профильтрованные сигналы перекрываются, и их уровни растут. В области низких частот (40–200 Гц) визуальное изменение формы связано с высокими уровнями пульсаций и частотными характеристиками фильтров. В конце реализаций вырисовываются чётко выраженные частотно-зависимые подъёмы уровней, отображающие дисперсионные свойства канала, из-за близкого к синфазному сложения регулярных составляющих, формирующих нормальные волны. Оконечные максимумы отображают дисперсию первой нормальной волны. Другие, менее заметные, соответствуют вторым и третьим (кривые 2 и 3), а на расстоянии 150 км (160, 200 Гц) – четвёртым модам.

На расстоянии 150 км (рис. 3а) синфазное сложение составляющих поля и устойчивое формирование первой нормальной волны реализуются во всём диапазоне частот от 80 Гц до 2 кГц. Положительная аномалия в максимумах достигает 15–25 дБ. Уровни наиболее интенсивных "квазисинфазных" составляющих характеризуются различной степенью их спада при распространении. Каждая из отдельных составляющих убывает с расстоянием по сферическому закону (с факторами фокусировок, близкими к нулю), а нормальные волны (для монохроматических процессов) – по цилиндрическому. Так как в экспериментах мы оперируем не с тональными, а с импульсными широкополосными сигналами, подверженными дисперсии, то спад уровней сфазированных диспергирующих составляющих происходит по закону для фазы Эйри: $J \sim r^{-5/3}$ [8]. Различие в закономерностях спада приводит к накоплению разницы

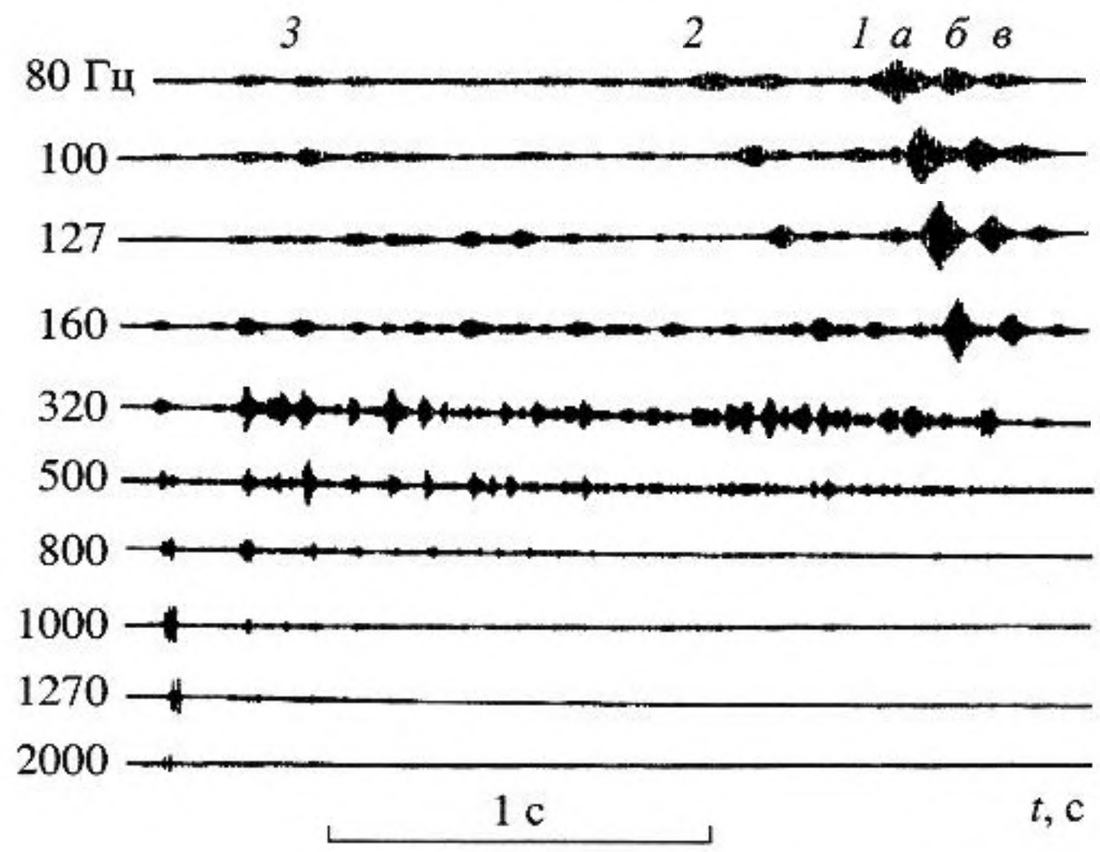

Рис. 4. Структура взрывного сигнала на расстоянии 300 км в диапазоне частот 80–2000 Гц. Глубина взрыва – 16 м, приёма – 50 м. Частотная полоса анализа – 1/3 октавы. Группы сигналов 1–3 отображают соответствующие номера нормальных волн. Максимумы *а*, *б*, *в* соответствуют ударной волне и первым двум пульсациям.

в уровнях соответственных сигналов при увеличении расстояния. Используя экспериментально полученные распределения амплитуд одиночных и сфазированных составляющих, легко найти частотную зависимость переходных расстояний r_0 [1] от сферического закона спада к "закону 5/3". Считая расстояние 150 км приемлемым для оценки достоверных величин аномалий распространения сфазированных составляющих в диапазоне частот 80–2000 Гц, находим, что r_0 лежит в пределах 0.5–5 км. С понижением частоты фильтрации r_0 растёт до десятков и сотен километров. В соответствии с наблюдаемыми (на расстояниях до 100–150 км) закономерностями спада, разница в уровнях составляющих, соответствующих несфазированным и сфазированным четверкам сигналов должна нарастать пропорционально расстоянию. Однако в реальных условиях (даже при довольно высокой стабильности условий распространения в Чёрном море) эта тенденция не сохраняется. Более того, достигнутое на расстоянии 150 км различие в уровнях сфазированных и несфазированных сигналов не только не растёт с расстоянием, а наоборот, уменьшается. Особенно сильное уменьшение происходит при повышении частоты фильтрации и уменьшении характеристических углов приосевых составляющих. Здесь нарушение когерентности и усиление затухания синфазных составляющих приводит к уменьшению их уровня значительно большему, чем при сферическом расхождении несфазированных составляющих. Так, если на расстоянии 150 км когерентные составляющие, формирующие первую нормальную волну, наблюдаются на всех частотах фильтрации вплоть до 2000 Гц с аномалией

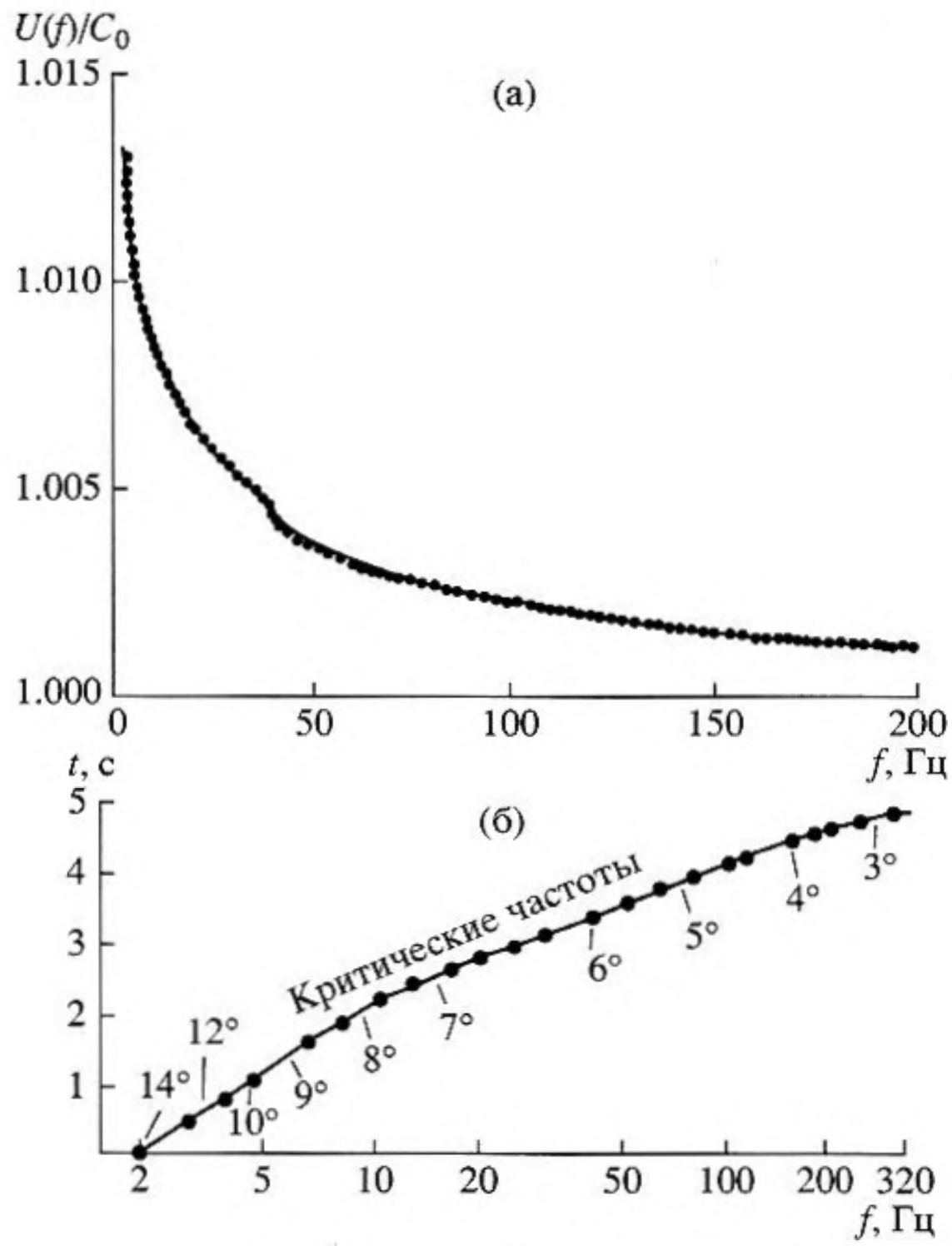

Рис. 5. Кривая дисперсии скорости звука (а) и зависимость длительности сигнала от частоты (б). На кривой (б) приведены значения характеристических углов в градусах и соответствующих им критических частот. C_0 = 1460 м/с.

+15–25 дБ, а на дистанции 300 км еле видны на частотах 600–800 Гц, то на расстоянии 600 км исчезают полностью даже на частоте 500 Гц. Выявляется чётко выраженная частотно-угловая зависимость "эффективного" коэффициента затухания (приосевых составляющих) в подводном звуковом канале. Сохранившиеся на расстоянии 600 км когерентные составляющие на частотах 40–400 Гц обладают положительной аномалией, не превосходящей 10–15 дБ, что значительно ниже аномалии достигнутой на расстоянии 150 км. Уменьшение уровня приосевых составляющих на частотах ниже критических для определённых толщин волновода достигают 30–50 дБ и более, что соответствует спаданию уровня по закону $J \sim r^{-4}$ [1]. В среднем по трассе на частотах 80–400 Гц уменьшение уровня приосевых сфазированных составляющих (относительно сферического закона спада) равно 0.02–0.05 дБ/км. На высоких частотах оно достигает значений 0.07–0.09 дБ/км.

На рис. 4 представлены структуры звукового поля на различных частотах в диапазоне 80–2000 Гц на расстоянии 300 км при нахождении источника у поверхности (на глубине 16 м), а приемника у оси канала (50 м). В этом случае, согласно лучевым представлениям, структура поля в слоистом волноводе должна содержать одну единственную четвёрку сигналов с характеристическим углом, близким к ±14°. И действительно, на частотах 1000–2000 Гц структура поля в какой-то степени соответствует расчётам. Однако даже на этих частотах в структуре проявляются вторая и последующие четвёрки сигналов, фигурирующие в виде дифракционных составляющих. Их амплитуды на 10–15 дБ ниже уровня прямых сигналов. На частоте 800 Гц количество четвёрок возрастает до 3 и дополнительно присутствует до 10 четвёрок в виде дифракционных составляющих. На частотах 320 и 500 Гц виден полный набор рефракционных сигналов, включая все приосевые составляющие, допустимые волноводом на этих частотах. Такого рода структура поля в лучевом приближении может образовываться только при нахождении обеих корреспондирующих точек на оси канала. Здесь, как и на рис. 3 (при нахождении источников и приёмника звука у оси канала), на частотах 80–320 Гц реализуются те же амплитудные и временны́е зависимости звукового поля от частоты. В конце систем сигналов выделяются сфазированные составляющие (убывающие по амплитуде максимумы). Они соответствуют первой моде и обусловлены ударной волной и первыми двумя пульсациями газового пузыря с периодами 185 и 165 мс. Видны также максимумы, соответствующие вторым и третьим номерам мод. Амплитуды максимумов первой нормальной волны на 10–15 дБ превосходят амплитуды несфазированных сигналов. Такая же структура поля реализуется и при замене местами источника и приёмника звука.

На основании представленных результатов в диапазоне звуковых и инфразвуковых частот видно, что в рассматриваемых условиях лучевая теория не пригодна для описания энергетических и пространственно-временны́х характеристик поля в подводном звуковом канале в низкочастотном диапазоне вплоть до 500–1000 Гц. Подводный канал на частотах ниже 100–500 Гц вырождается в приповерхностный с реализацией у поверхности определённой толщины "псевдооднородного" слоя с некоторой "эффективной" минимальной скоростью. Этот слой охватывает глубины выше и частично ниже оси канала. Низкочастотные составляющие не испытывают рефракции в верхних слоях. Структура поля в этом диапазоне частот формируется составляющими, рефрагированными только в глубинных слоях канала. Полученные в экспериментах временны́е и амплитудные закономерности формирования структуры звукового поля в зависимости от частоты могут быть объяснены только с использованием волновых представлений. В соответствии с полученными данными, граничная частота, на которой применимо лучевое приближение, соответствует диапазону частот 2–2.5 кГц. Согласно критерию приме-

нимости лучевых представлений [9], граничная частота, на которой сохраняются рефракционные явления при прохождении сигналами слоя скачка при малых углах скольжения, определяется из соотношения $f = 0.4\ Ch^{-1}(\Delta C/C)^{-0.5}$, где C – скорость звука, h – толщина слоя скачка. При $h = 5$ м и разности скоростей звука $\Delta C = 37$ м/с критическая частота $f = 750$ Гц, что более чем на октаву ниже данных, полученных в эксперименте. Аналогичные закономерности формирования звуковых полей в низкочастотной области реализуются и в других районах Мирового океана. Изменяется только диапазон критических частот и частот, на которых имеет место синфазное сложение когерентных составляющих, и как следствие этого, возможность формирования нормальных волн. Например, в северо-западной части Тихого океана, где условия более изменчивы, формирование первой нормальной волны становится проблематичным даже на частотах 60–100 Гц [7].

Если в высокочастотной области преимущественное дополнительное затухание в диапазоне малых характеристических углов обусловлено поглощением и рассеянием звука на неоднородностях канала, то в низкочастотной области уменьшение уровня приосевых составляющих обусловлено противофазным взаимным их гашением на частотах, лежащих ниже критических (для определённых толщин приосевых слоёв). Это означает, что в этих слоях в канале нет рефракционных составляющих с малыми характеристическими углами. По мере смещения в область низких частот сужается диапазон углов, в пределах которых могут удерживаться рефрагированные составляющие. На частотах ниже предельной критической (1.8 Гц) в канале нет таких составляющих вообще. Волновод вырождается в однородный слой, в котором могут распространяться волны, соответствующие только прямолинейным лучам при закономерностях мелкого моря [8].

Заканчивая описание структуры поля с использованием взрывных источников звука, следует отметить, что соотношения амплитуд ударной волны и пульсаций газового пузыря на различных частотах изменяются в пределах от нуля до 25 дБ и более. На частоте 2 кГц разница в уровнях ударной волны и первой пульсации в среднем равна 20–25 дБ, на частоте 400 Гц не превосходит 10 дБ, а на частотах 40–200 Гц она близка к нулю. При разных весах зарядов эти соотношения несколько меняются.

Используя пространственно-временны́е характеристики звукового поля в волноводе, рассчитанные по лучевой теории и реализуемые в экспериментах на высоких частотах, легко проанализировать и объяснить дисперсионные свойства канала. Последовательность временны́х интервалов между отдельными сигналами в исследуемых структурах (рис. 2–4), которые могут быть рассчитаны по лучевой теории (например, [4]), отображает частотную зависимость групповой скорости первой нормальной волны. Фазовой скорости соответствует скорость звука в точках заворота лучей с характеристическими углами, образующими данную нормальную волну на соответствующей частоте. Эта последовательность приходящих четверок сигналов образует квазипериодический процесс, период которого равен удвоенной разности времён прихода двух соседних составляющих, которые, складываясь в фазе или в противофазе, образуют первую нормальную волну на соответствующей частоте. Искомая частота определяется из условия

$$f_n = 2(t_{n+1} - t_n)^{-1}, \qquad (1)$$

где $t_{n+1} - t_n$ – разность времён прихода сигналов по двум соседним четвёркам лучей, или двух соседних максимумов или минимумов на дисперсионной кривой рис. 2.

Соотношение (1) идентично условию определения критической частоты первой нормальной волны для приповерхностного или подводного звуковых каналов:

$$f = 3(l - 1/2)C_0/8h(ah)^{0.5},$$

где h – глубина приповерхностного канала, a – относительный градиент скорости звука, определяемый из соотношения $\tilde{a} = \Delta C/C_0\Delta h$, C_0 – скорость звука на оси канала, l – номер нормальной волны. В случае подводного канала (билинейный профиль), $\tilde{a}$ – эффективный относительный градиент скорости, определяемый из соотношения

$$1/\tilde{a} = 1/\tilde{a}_1 + 1/\tilde{a}_2,$$

где $\tilde{a}_1$ и $\tilde{a}_2$ – значения относительных градиентов скорости звука в слоях выше и ниже оси канала, $h = h_1 + h_2$ – общая глубина канала, h_1 и h_2 – толщины слоёв выше и ниже оси канала.

Для установления явно выраженной дисперсии на данной частоте необходимо некоторое минимальное расстояние, только начиная с которого волновой процесс можно назвать установившимся. Для выполнения этих условий, синфазного сложения составляющих и формирования дисперсии необходимо, чтобы разности времён приходов последовательных сигналов на данной частоте были равны π, а разности времён прихода сигналов по соседним лучам стремились к нулю, т.е.

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = |\Delta t_n - \Delta t_{n-1}| - |\Delta t_{n+1} - \Delta t_n| \longrightarrow 0.$$

В пределе эти условия могут быть выполнены только на бесконечности. Если разность времён прихода трёх соседних составляющих меньше периода волны или равно полупериоду, сложение приходит в противофазе. В результате наступает их полное гашение. На каждой из частот будет свой диапазон углов, в пределах которых могут распространяться волны, приходящие в фазе или противофазе. Таким образом, реализуется частотно-зависимая структура сигналов в канале. На высоких частотах время затягивания составляю-

щих сигналов (в случае взрывных источников "длительность" – разность времен первого вступления и последнего осевого) является максимальным и их количество соответствует времени, рассчитанному по лучевому методу. По мере понижения частоты количество участвующих в формировании поля составляющих системы сигналов уменьшается до единицы и соответственно сужается время затягивания системы сигналов на критической частоте всего волновода до нуля. При волновых расчетах время затягивания (их длительность) определяется разностью групповых скоростей на соответствующих частотах для первой нормальной волны, а на данной частоте – количеством нормальных волн. Длительность сигналов на различных частотах будет различной. Если на высокой частоте диапазон характеристических углов сигналов, удерживаемых волноводом, равен ±14.2°, то по мере понижения частоты этот диапазон уменьшается и на самой низкой критической частоте всего канала (для рефрагированных волн) равен нулю. Эти закономерности в подводных волноводах важны при прогнозировании и расчетах звуковых полей, особенно в случае использования лучевых программ. Так, если на расстояниях сотен или тысячи километров на высоких частотах в канале может приходить в точку приёма несколько сот лучей, то на низкой частоте структура сигнала может обеспечиваться приходом только нескольких составляющих. Это, естественно, будет приводить к значительным ошибкам в расчетах полей, если не учитывать при этом волновых свойств канала. При волновых расчётах эти ошибки исключаются.

Кривая дисперсии, полученная по экспериментальным данным (рис. 2), представлена на рис. 5 а. По оси абсцисс отложена частота, по оси ординат – отношение групповых скоростей (первой нормальной волны) к скорости звука на оси канала. На рис. 5б отображены зависимость длительности системы сигналов от частоты на расстоянии 600 км при приёме на оси канала и критические частоты соответствующих толщин канала, определяемых величинами характеристических углов указанными на графике. Видно, что если на высокой частоте длительность системы сигналов достигает 5 с, то на частотах 100, 50, 10 и 4 Гц она падает соответственно до 4.15, 3.65, 2.25 и 1 с. Кривая, аппроксимирующая критические частоты, является границей раздела частотной "заполняемости" канала составляющими, соответствующими рефрагированным лучам, очерчивает диапазон углов и частот, в пределах которых применимы лучевые представления при расчётах звуковых полей в канале.

В зарубежных публикациях последнего времени исследования дисперсии нормальных волн содержатся в [10], где исследуются фильтрации нормальных волн в мелком и глубоком морях, и в [11], где исследования волноводного инварианта "B", определяющего интерференционную структуру поля в океанской среде и зависимость групповой скорости от фазовой для типичных условий.

Проанализированные выше различные виды затухания низкочастотных и высокочастотных составляющих в волноводе интерпретируется следующим образом. Любой участок сигнала на дисперсионной кривой, соответствующий узкому сфазированному диапазону углов и времён прихода (основное требование формирования нормальной волны), не превышает по времени одного периода волны на данной частоте. Являясь экстремальным, этот диапазон углов и текущих времён наиболее сильно подвержен воздействиям всякого рода неоднородностей и наиболее чувствителен к малейшим изменениям фазы в паре взаимодействующих составляющих. Это и естественно, так как слева от рассматриваемого момента (в области более низких частот) лежит отрезок времени, в котором сложение составляющих осуществляется в противофазе на близкой частоте и результирующая обращается в нуль. Справа (на более высоких частотах) идёт также сложение составных составляющих в противофазе, но связанное с проявлением устойчивого их фазового гашения, согласно которому спад результирующего уровня сигналов, как отмечалось выше, подчиняется закону $J \sim r^{-4}$ [1]. Таким образом, рассматриваемый временной интервал очень критичен к фазовым изменениям. Например, для полного гашения первой нормальной волны на частоте 1000 Гц суммарная разность путей распространения обеих составляющих должна составить всего 0.75 м. Отдельные же несфазированные составляющие, распространяющиеся по сферическому закону, не испытывают столь жёстких ограничений и обладают малыми потерями. Фазовое гашение приосевых когерентных составляющих приводит к полному их исключению из процесса распространения и определяет критические частоты соответствующих толщин волновода.

В высокочастотной области причиной интенсивного затухания приосевых составляющих, лежащих выше критических, являются эффекты предреверберации и прямого рассеяния и поглощения звука в неоднородной среде. Приосевые составляющие, имея короткие циклы и не проникая на большие глубины, весь путь проходят в слоях с активным турбулентным перемешиванием. Неоднородности температуры, плотности и скорости звука приводят к дополнительному затуханию и рассеянию, хорошо изученным в работах Л. Либермана [12], Д. Минтцера [13], Д.С. Поттера, С.Р. Мерфи [14], Л.А. Чернова [15] и др. Составляющие, складывающиеся синфазно на более низких частотах для какой-либо нормальной волны основной путь проходят в глубинных слоях, где неоднородности практически отсутствуют и дополнительные потери энергии на рассеяние и поглощение ничтожно малы. Путь, пройденный ими в

неоднородных поверхностных слоях, мал по сравнению с общей протяжённостью глубинных циклов. Индикатриса рассеяния этих составляющих (с большими характеристическими углами) значительно у́же индикатрисы рассеяния приосевых составляющих.

Рассмотренные причины более сильного затухания приосевых составляющих в высокочастотной области спектра из-за скопления неоднородностей вблизи оси канала приводят к ранее неизвестной частотно-угловой зависимости эффективного коэффициента поглощения в подводном звуковом канале. Абсолютные величины этих потерь значительно превосходят потери, связанные с диссипативными процессами. С повышением частоты эффект дополнительного затухания значительно увеличивается.

Представленные результаты экспериментальных исследований показывают многообразие факторов, определяющих структуру поля в канале в широком диапазоне частот и включающих случайные параметры, связанные с неоднородностями канала. Из анализа полученных материалов следует, что в случайно-неоднородных волноводах наиболее продуктивным может быть метод энергетического сложения составляющих сигнала с учетом предреверберационных и рассеянных компонент.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 99-02-18359, 01-02-16636).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
2. *Студеничник Н.В.* Явление предреверберации в подводном звуковом канале / Тезисы докладов 9 Всесоюзной акустической конференции (секция Д). М.: Акустический институт АН СССР, 1977. С. 45–48.
3. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В.* К теории предреверберации в океане // ДАН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 211–213.
4. *Студеничник Н.В.* Предреверберация в приповерхностном и подводном звуковых каналах / Труды третьего семинара "Акустические статистические модели океана." М.: Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева АН СССР, 1981. С. 48–64.
5. *Студеничник Н.В.* Предреверберация и некоторые механизмы затухания звука в подводном звуковом канале / Труды четвёртого семинара "Акустические статистические модели океана." Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева АН СССР. М., 1982. С. 19–39.
6. *Студеничник Н.В.* Предреверберация и когерентность поля при распространении сигналов на большие расстояния / Труды тринадцатой всесоюзной школы-семинара по статистической гидроакустике. М.: Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева АН СССР, 1984. С. 29–37.
7. *Студеничник Н.В.* Предреверберация и дисперсия скорости звука в неоднородном по трассе волноводе // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. ЦНИИ "РУМБ", 1984. Вып. 18. С. 39–47.
8. *Pekeris C.L.* Theory of propagation of explosive sound in shallow water. Mem // Geol. Soc. Amer. 1948. V. 27. Oct. 15.
9. *Kiblewhite A.C., Denham R.N.* Experiment on propagation in surface sound channels // J. Acoust. Soc. Amer. 1965. № 38. V. 1. P. 63–71.
10. *John R. Buck, James C. Preisig, Kathleen E. Wage.* A unified frame work for mode filtering and the maximum a posteriori mode filtr // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 103. № 4. P. 1813–1824.
11. *William A. Kuperman, Gerald L. D'Spain, Hee Chun Song, Aaron M. Thode.* Applications of the waveguide invariant approach // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 2. Pt. 2. P. 983.
12. *Liebermann L.* The effekt of temperature inhomogeneities in the ocean on the propogatieon of sound // J. Acoust. Soc. Amer. 1951. V. 23. № 5. P. 563–570.
13. *Mintzer D.* Wave propagatieon in a random inhomogeneous medium // J. Acoust. Soc. Amer. 1953. V. 25. № 5. P. 922–927.
14. *Potter D.S., Murphy S.R.* On wave propagation in a random inhomogeneous medium // J. Acoust. Soc. Amer. 1957. V. 29. № 2. P. 197–198.
15. *Чернов Л.А.* Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. Изд-во АН СССР, 1958. 185 с.

Space-Time Structure of the Low-Frequency Acoustic Field in the Underwater Sound Channel

N. V. Studenichnik

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: bvp@akin.ru

Abstract—Experimental data are presented on the fine structure of the sound field in the underwater sound channel for low and infralow sound frequencies. The experiments are performed in the Black Sea, on a 600-km-long path, with explosive sound sources. The intensity, space–time, and frequency characteristics of the sound field are analyzed. The geometric dispersion of the first normal wave is experimentally studied. The role of the channel inhomogeneities in the violation of the sound field coherence is determined for different frequency bands. On the basis of the experimental data, the vertical distribution of the critical frequencies of the waveguide is obtained, and the validity limits are established for the wave and ray calculation methods. The applicability of the phase methods for calculating the sound fields in waveguides with dispersion is discussed. The frequency–angular dependence of the effective sound attenuation coefficient in an underwater waveguide is revealed and explained.