

УДК 551.463+534.883+534.843.242.

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ И ЧАСТОТНО-ФАЗОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

© 2003 г. **Н. В. Студеничник**

*Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН*

*117036 Москва, ул. Шверника, 4*

*E-mail: vadov@akin.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2002 г.

Исследована пространственно-временная и частотно-фазовая устойчивость акустического поля при распространении в подводном звуковом канале на большие расстояния. Выявлена возможность расщепления компонент поля, обусловленная эффектом Доплера в суммарных интерференционных структурах монохроматических сигналов в зависимости от расстояния, параметров неоднородного канала и частоты. Опыты выполнены в летних условиях в Прикамчатском районе северо-западной части Тихого океана на трассе протяженностью до 2100 км. В опытах использовались высокостабилизированные источники звука с резонансными частотами 230 и 380 Гц, буксируемые на глубине 70 м со скоростью 5–6 узлов. Прием сигналов осуществлялся у оси канала на стационарную систему, установленную на дне на глубине 200 м. Исследована ширина звуковых пучков и определены границы расширения частотных спектров когерентных и некогерентных составляющих звукового поля при сверхдальнем распространении. Определены фазовые скорости расщепленных составляющих.

Акустическим институтом имени академика Н.Н. Андреева АН СССР совместно с Институтом прикладной физики АН СССР и Гидрографией ВМФ СССР при участии ЦНИИ “Морфизприбор” и других научных организаций и учреждений в 1980 году осуществлены комплексные исследования акустико-океанологических характеристик северо-западной части Тихого океана [1]. Работы выполнены в летний период в акватории южной оконечности полуострова Камчатка. Постановкой опытов предусматривалось получение экспериментальных материалов по широкому кругу ключевых характеристик акустических полей в звуковом и инфразвуковом диапазонах частот при дальнем и сверхдальнем распространении на трассах со сложным рельефом дна и сложной гидролого-акустической обстановкой в регионе. Среди поставленных задач, таких как исследование тонкой структуры звуковых полей и закономерностей спада силы звука с расстоянием, коэффициентов пространственного затухания, отражательной способности дна, корреляционных характеристик поля, влияния фронтальных зон и берегового клина, особый интерес представляли исследования пространственно-временной и частотно-фазовой устойчивости составляющих звукового поля в суммарных интерференционных структурах монохроматических источников в неоднородном волноводе. Это было обусловлено тем, что такого рода исследования в натуральных условиях неоднородных волноводов еще не прово-

дились. В этом плане выделение отдельных составляющих в сложных интерференционных структурах представлялось довольно проблематичным. Для этих целей нами были использованы тональные высокостабилизированные по частоте и взрывные широкополосные источники звука. В настоящей работе рассмотрены результаты исследований только с использованием тональных источников. Исследуемая трасса, протяженностью в 2100 км, располагалась перпендикулярно береговой линии полуострова Камчатка и ориентировалась по дуге большого круга в юго-восточном направлении. Рельеф дна по трассе включал небольшой мелководный участок шельфа (протяженностью 3–4 км), материковый склон с крутизной 10–15° и глубоководную акваторию, при изменении глубины от 200 до 5000–7000 м. На расстояниях 800–1000 км трасса пересекала гряду Императорских гор с глубинами 2000–3000 м.

Регион северо-западной части Тихого океана по разнообразию гидрофизических условий и пространственному распределению океанических характеристик водных масс представляется одним из сложнейших в Мировом океане. Характерной особенностью региона является значительная нестабильность глубинных слоев, обусловленная специфической динамикой водных масс, взаимодействием постоянных субарктических вод холодного течения Ойясио и субтропических теплых вод течения Куроисио, миграцией по-

ложений фронтальных зон и неустойчивостью гидрологических вихрей. В результате в регионе устанавливается характерный режим термической структуры прибрежных акваторий, состоящий в том, что на глубинах 50–100 м образуется устойчивая область холодных вод с температурой ниже одного градуса, а на глубинах 300–400 м – область относительно теплых вод с положительной температурой до 3–4°C. В результате детальных гидрографических исследований района было выявлено четыре основных гидрологических фронта: Камчатский фронт (северное течение Ойясио, 50–150 км от береговой черты), фронт Ойясио (противотечение Ойясио, 800–850 км), северный полярный фронт (1100–1300 км) и фронт Куроисио (2000–2100 км). Наличие первых трех фронтов не изменяет существенно общие черты профиля скорости звука. Все они определяются водными массами полярных и умеренных широт. Ось канала в этих структурах лежит на глубинах от 70 до 200 м на расстояниях вплоть до 2000 км. Скорость звука на оси канала изменяется при этом в пределах 1446–1474 м/с. Исключение составляет лишь участок трассы за грядой Императорских гор на расстояниях 1100–1300 км (северный полярный фронт), на котором простирается мощный, почти изоскоростной слой водной толщи, охватывающий глубины от 70–100 до 800–1000 м. Здесь еле заметный минимум скорости звука со значением 1474 м/с лежит на горизонтах 400–500 м. Переход к тропическим структурам с глубинным залеганием оси канала (1000 м) происходит на глубоководном фронте Куроисио на расстояниях 2000–2100 км. Скорость звука при этом на оси канала увеличивается до 1480 м/с и более, что на 25–35 м/с превосходит скорость звука на оси канала в прибрежной акватории. На глубинах 50–100 м разница в скоростях звука достигает 50–55 м/с. Выборочные профили скорости звука по трассе в поверхностных слоях (на глубинах до 500 м) представлены на рис. 1. Метеорологические условия во время опытов были довольно благоприятны: скорость ветра не превышала 10–12 м/с, а волнение моря – 3–4 баллов.

Непосредственно акустические эксперименты с тональными источниками проведены в период с 17 по 25 июля. Исследования выполнялись по хорошо отработанной нами ранее методике непрерывной буксировки нескольких излучающих систем одновременно. Используемые излучатели с резонансными частотами 100, 230, 380 и 1000 Гц монтировались на одной общей раме совместно с контрольным гидрофоном и глубиномером. При скорости буксировки 5–6 узлов глубина излучения поддерживалась в пределах 65–75 м. Буксировка осуществлялась непрерывно на участках трассы протяженностью до 300 км. В качестве задающих устройств использовались кварцевые генераторы со стабильностью  $10^{-6}$ . Для работы

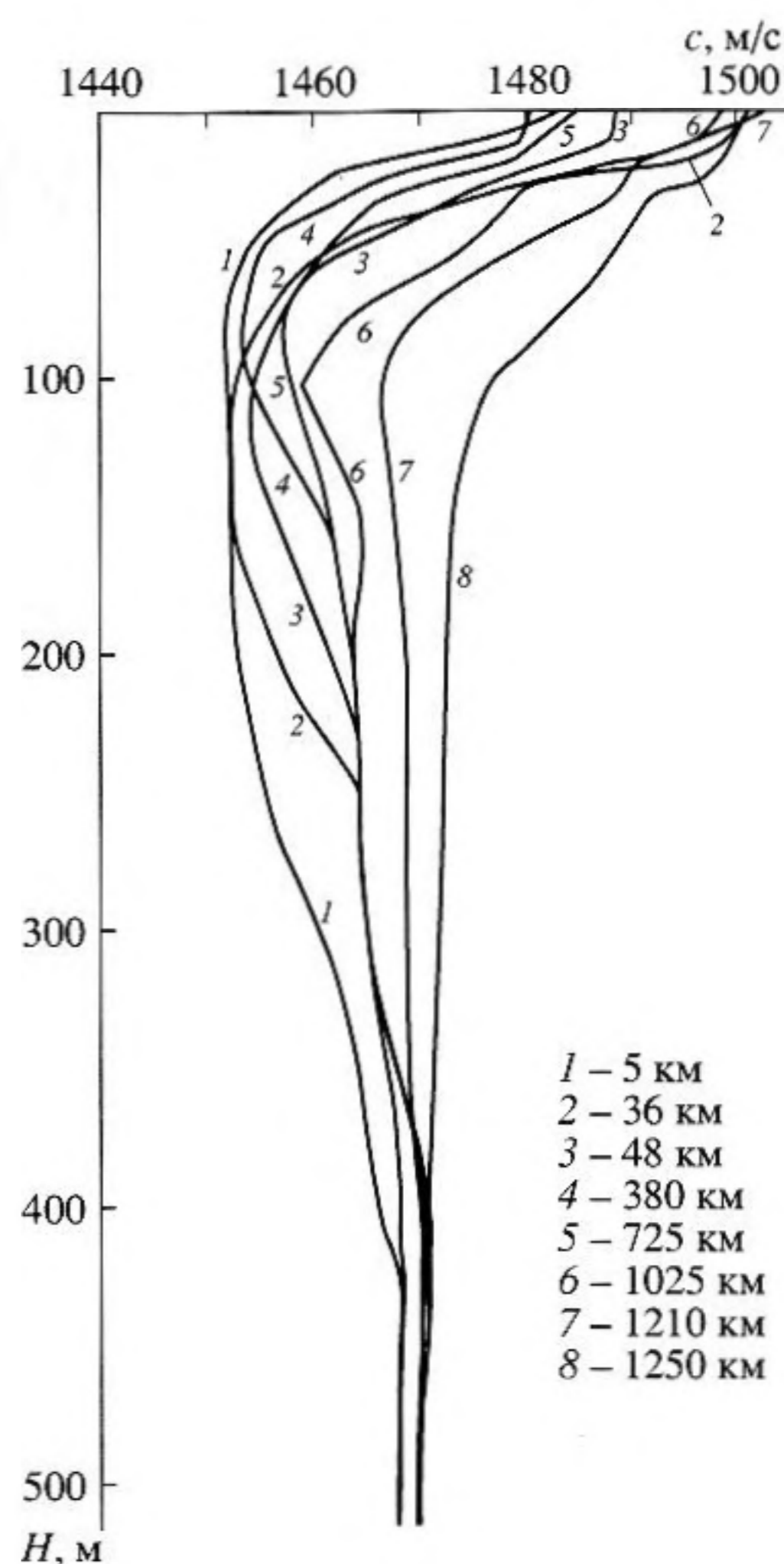


Рис. 1. Выборочные профили скорости звука по трассе исследований в поверхностных слоях на глубинах до 500 м.

был выбран близкий к непрерывному режим излучения с длительностью посылок 280 с при 10-секундных паузах. Все четыре излучателя работали синхронно от одного управляющего пульта, позволяющего непрерывно следить за режимом работы излучателей и их глубиной. Наличие сквозной калибровки гидрофонного тракта, которой были снабжены излучатели, позволяло определять акустическую мощность любого излучателя и поддерживать ее на заданном уровне. Прием сигналов осуществлялся на направленную систему, установленную в шельфовой зоне (на дне) на глубине 200 м. Расстояние между корреспондирующими точками определялось космическими навигационными средствами и контролировалось по временам пробега акустических сигналов. Более подробное описание постановки экспериментов, объема выполненных работ, гидролого-акустической обстановки в регионе и полученных результатов содержится в [1].

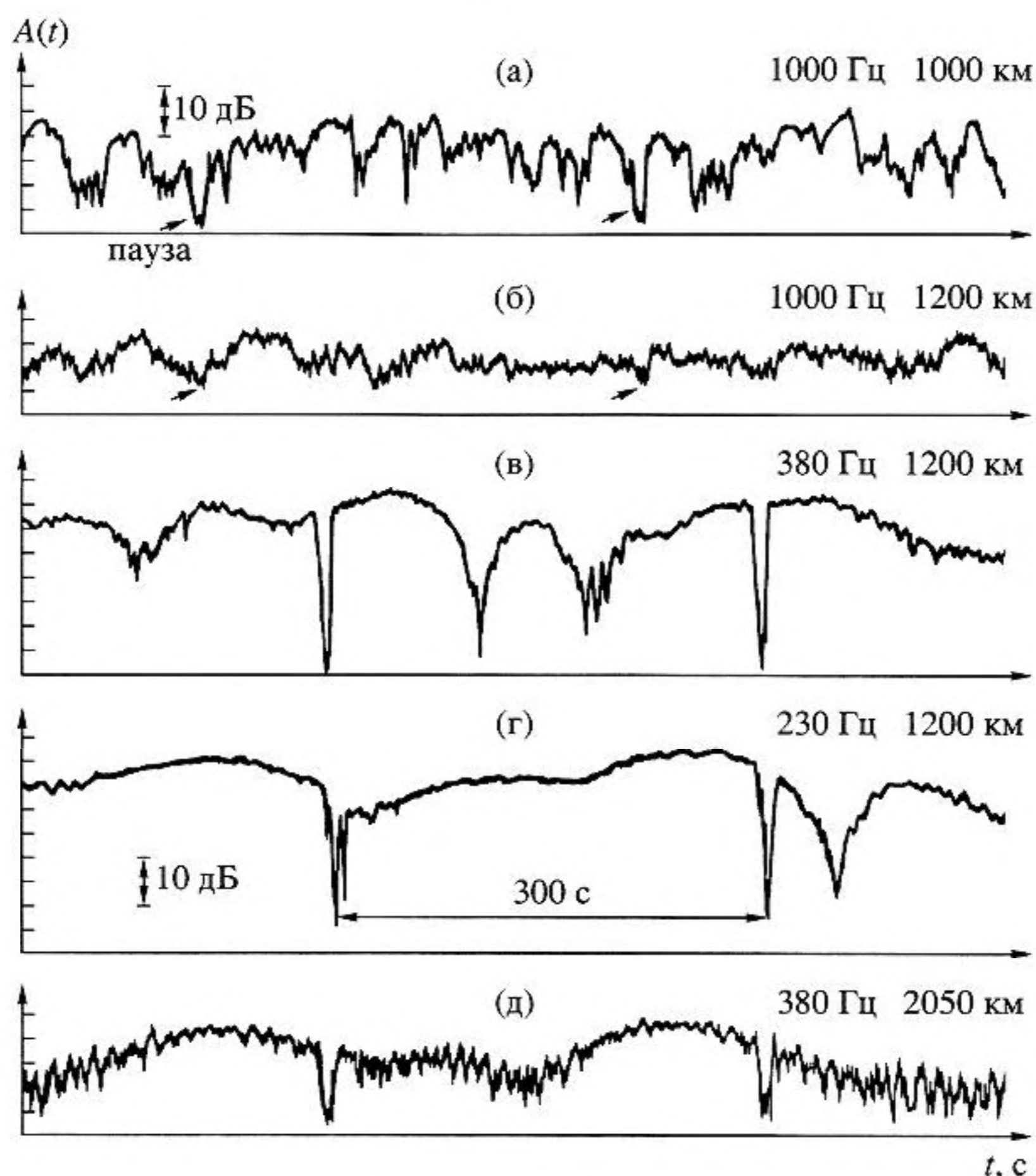


Рис. 2. Фрагменты записей тональных сигналов на частотах 230, 380 и 1000 Гц на расстояниях 1000–2050 км. Амплитуды даны в логарифмическом масштабе.

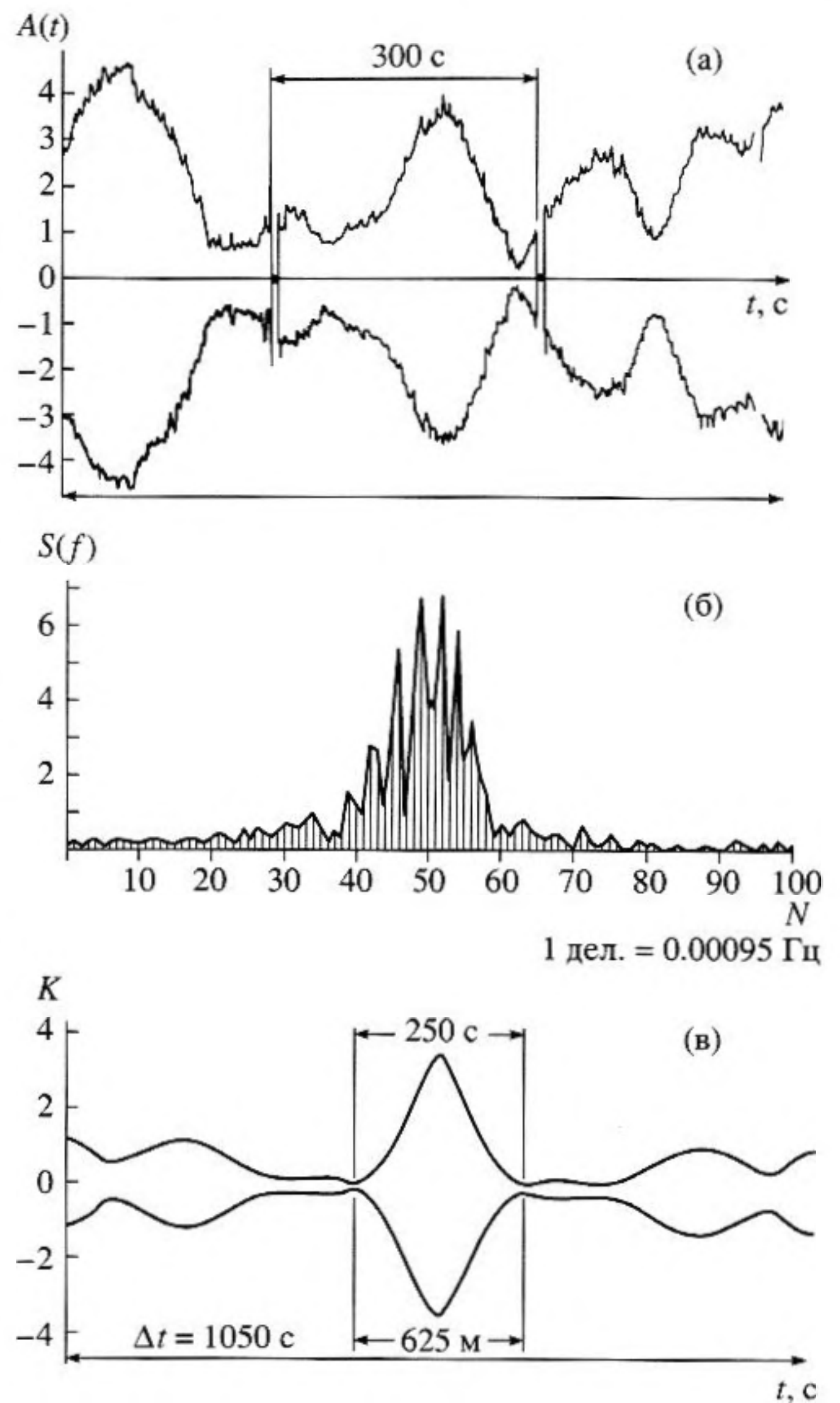
Уверенный прием сигналов на частоте 1000 Гц осуществлялся на расстояниях до 1200 км с превышением уровня помех до 8–10 дБ, а на частотах 100, 230 и 380 Гц – до 2100 км с превышением помех 10–25 дБ. В результате анализа полученных записей по структуре звукового поля установлено, что в форме огибающей амплитуд суммарных сигналов даже в условиях явно неоднородного волновода хорошо сохраняется довольно упорядоченный характер огибающих интерференционных структур на всех расстояниях вплоть до 1200–2100 км. Фрагменты записей сигналов длительностью 690 с на частотах 1000, 380 и 230 Гц и расстояниях 1000–2050 км представлены на рис. 2. Пространственный период интерференции (с глубиной модуляции до 30 дБ) на частоте 1000 Гц составляет в среднем 100–150 м, на частоте 380 Гц – 350–600 м, на частоте 230 Гц – 400–1000 м и на частоте 100 Гц – 500–1000 м. Наблюдаемая закономерность свидетельствует о высокой устойчивости фазовых фронтов и сохранении когерентных свойств составляющих систем сигналов (в определенном диапазоне характеристических углов), обеспечивающей их регулярное фазовое сложение. В противном случае (при сложении нерегу-

лярных составляющих) отмеченные закономерности, связанные с частотой, были бы нарушены и суммарное поле представляло бы шумоподобный процесс с постоянным в статистическом смысле уровнем. Это хорошо известно и было нами подтверждено в последующих опытах, проведенных в зимних условиях по этой же трассе и на тех же частотах, при существовании в акватории мощного приповерхностного канала (от поверхности до дна) и поверхностного волнения (по трассе) от 2–3 до 6–7 баллов. Реализуемые в этих экспериментах характеристики огибающих на больших расстояниях были совершенно не связаны с частотой и определенные модуляционные закономерности, наблюдаемые в летнем эксперименте, были полностью исключены. Параметр когерентности полного поля на расстояниях 700–1000 км уменьшался до 0.2. Кроме отмеченных особенностей в поведении огибающих амплитуд сигналов в подводном звуковом канале в летних условиях следует обратить внимание еще на одну характерную деталь. Заключается она в том, что в летних условиях на больших расстояниях (1000–2100 км) при уменьшении соотношения сигнал/помеха до 15–20 дБ наряду с регулярной низ-

копериодной огибающей в многолучевой системе сигналов отчетливо проявляется довольно устойчивая высокочастотная интерференционная изрезанность амплитуды сигналов (см., например, рис. 2д) с периодом от 5 до 11 с и глубиной модуляции до 8–10 дБ. Ее период не зависит от частоты. Природа и механизм этих интерференционных зависимостей не вполне очевидны, но, по всей видимости, они обусловлены влиянием мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей поверхностного волнения. В этом случае период огибающих будет близок к периоду низкочастотной океанской зыби (0.1 Гц) и периоду качки излучающего судна.

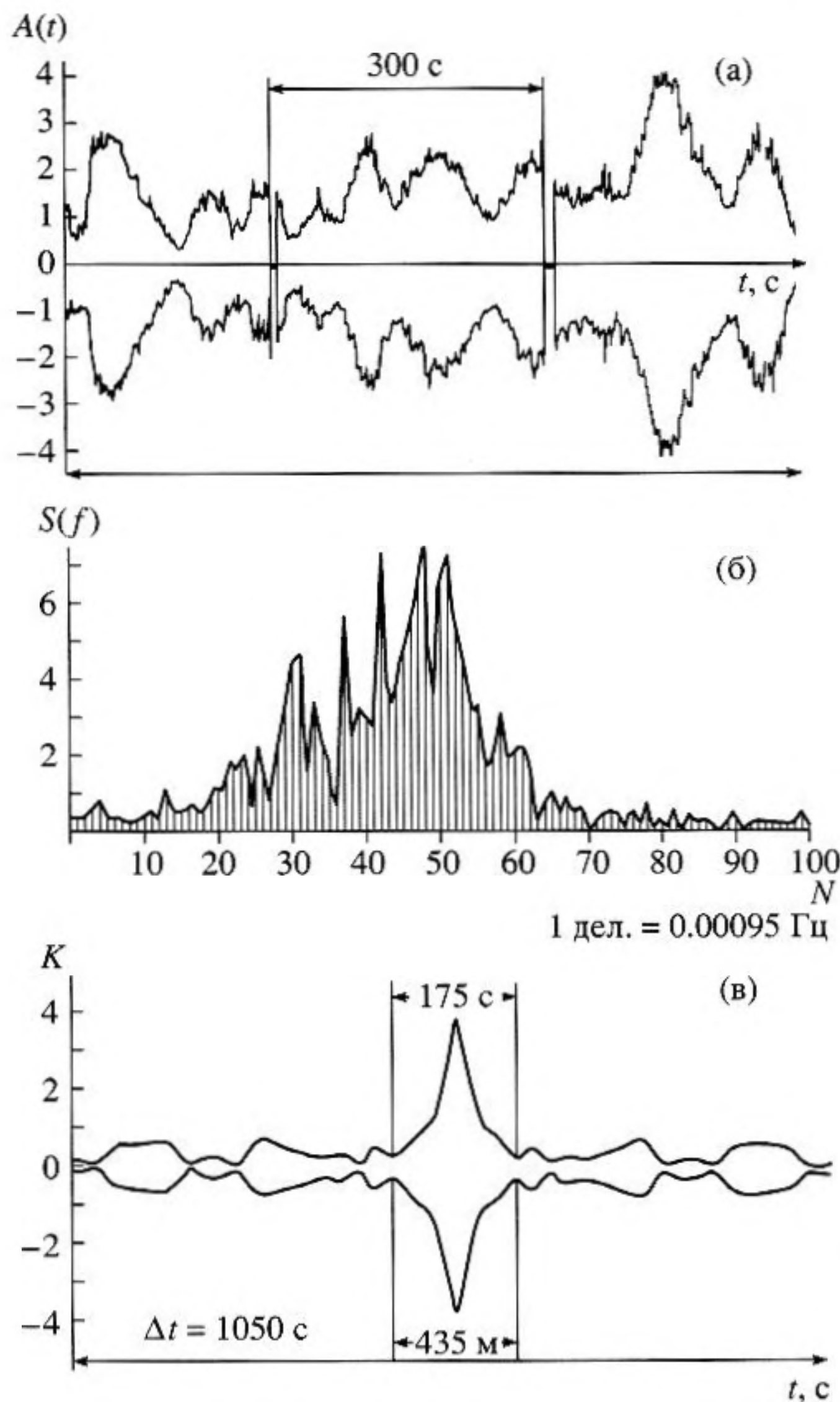
Для исследований пространственно-временных характеристик поля и получения количественных результатов по частотно-фазовой устойчивости его составляющих в суммарных интерференционных структурах использовались записи сигналов на частотах 230 и 380 Гц, полученные на расстояниях 1000, 1200, 1500 и 2000 км. Обработка данных производилась С.И. Дворниковым. Для ввода информации в ЭВМ брались 5- и 17.5-минутные выборки (300 и 1050 с) сигналов, что соответствовало изменениям расстояний между корреспондентами на 750 и 2625 м при скорости буксировки излучателей 2.5 м/с. Частотная разрешающая способность анализа составляла соответственно 0.003 и 0.00095 Гц. Так как в экспериментах использовались посылки сигналов длительностью по 5 минут при 20-секундном молчании, то при больших протяженностях выборок в анализируемых записях содержались паузы, которые обогащали частотный спектр анализируемых сигналов высокочастотными составляющими и снижали разрешающую способность используемого метода обработки. Для оценки влияния пауз в выборках на ЭВМ моделировался монохроматический сигнал соответствующих частот с 20-секундными окнами. Одновременно определялось влияние детонации магнитофона на характеристики отклика. Полученная при этом разрешающая способность метода, обусловленная наличием пауз в сигнале и детонацией магнитофона, при длительностях выборок 1050 с на частотах 230 Гц и 1000 Гц не превышала 0.001 Гц.

На рисунках 3 и 4 представлены записи сигналов, произведенные на частотах 230 и 380 Гц на расстоянии 1000 км (а), а также их частотные спектры (б) и автокорреляционные функции (в), полученные в результате обработки. Вертикальные линии на рисунках (б) проведены через 0.00095 Гц и соответствуют частотному разрешению метода. Период интерференции на частотах 230 и 380 Гц составляет соответственно 2–3 минуты и 1–2 минуты. Время автокорреляции оказалось близким периоду интерференции огибающих. Частотное расширение расщепленных четверок сигнала, обусловленное доплеровским сдвигом когерент-



**Рис. 3.** Фрагмент записи тонального сигнала на частоте 230 Гц на расстоянии 1000 км. Огибающие сигнала (а), его частотный спектр (б) и огибающие функции автокорреляции (в) при удалении источника звука со скоростью 2.5 м/с.  $N$  – номер доплеровского фильтра. Полоса пропускания фильтра 0.00095 Гц.  $N = 1$  соответствует частоте 229.66 Гц,  $N = 100$  – частоте 229.565 Гц.

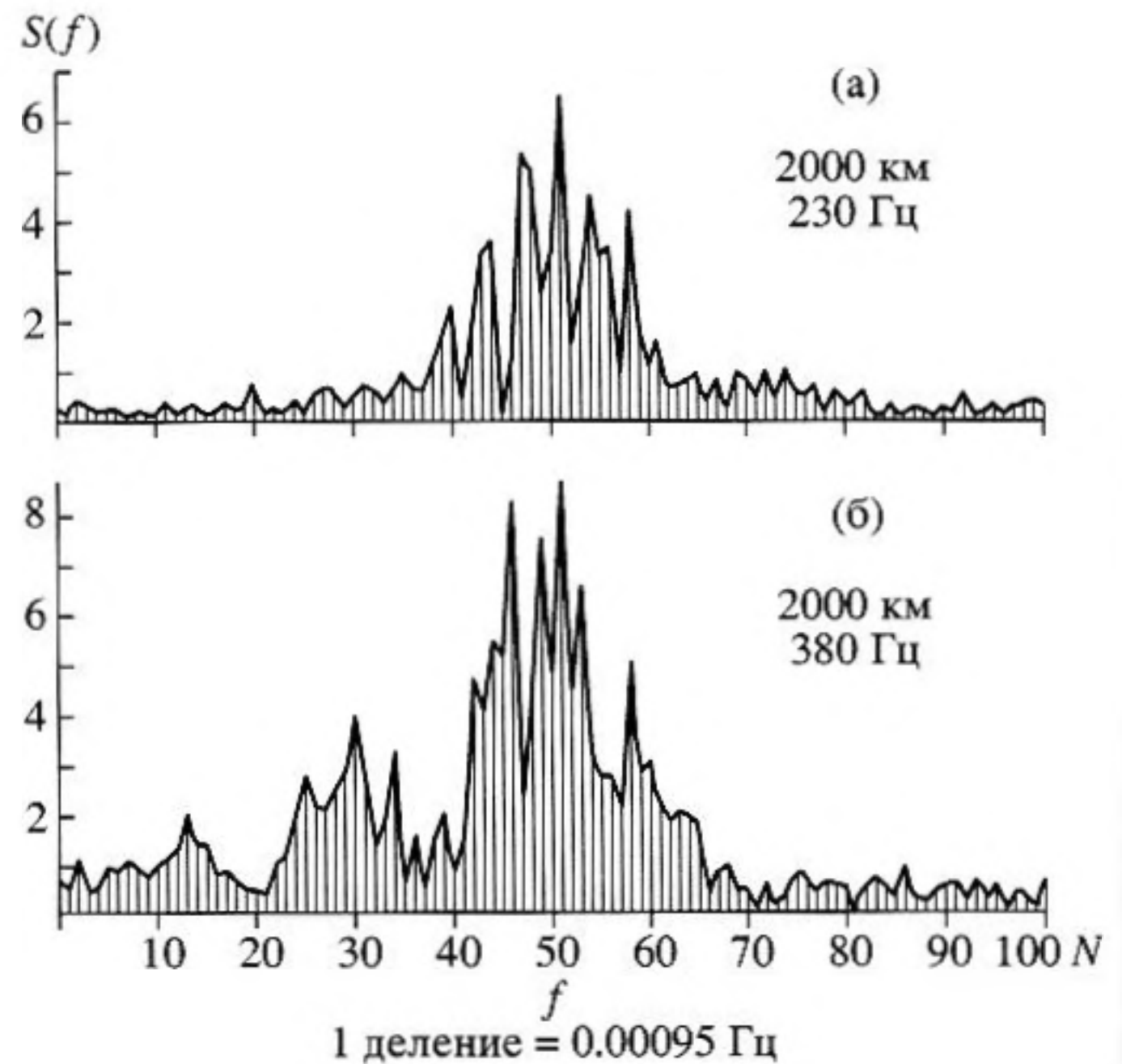
ных составляющих при различных характеристических углах, на частотах 230 мГц и 380 Гц соответственно равно 25 мГц и 40 мГц. Суммарное расширение спектра, включая некогерентные (и, естественно, нерасщепленные) составляющие, достигает соответственно 50 Гц и 60 мГц. В частотном спектре на обеих частотах видно до 8–9 хорошо разрешенных максимумов, соответствующих отдельным составляющим (четверкам) сигнала с фазовыми скоростями, изменяющимися в пределах 1457–1540 м/с (это будет показано ниже). Для расщепления самих четверок, при вы-



**Рис. 4.** То же, что и на рис. 3, на частоте 380 Гц.  $N$  – номер доплеровского фильтра. Полоса пропускания фильтра 0.00095 Гц.  $N = 1$  соответствует частоте 379.4 Гц,  $N = 100$  – частоте 379.305 Гц.

бранных положениях коррелирующих точек, необходимы разрешающие способности анализа на порядок выше использованных. При 5-минутных выборках и разрешающей способности 0.003 Гц расщепление отдельных составляющих на обеих частотах значительно ухудшается и даже становится затруднительным.

На рис. 5 представлены частотные спектры сигналов на частотах 230 и 380 Гц на расстоянии 2000 км при 17.5-минутных выборках. На записях, как и на рис. 3 и 4, видно до 8–9 хорошо разрешенных максимумов. На оси частот справа от когерентных составляющих в интервале номеров доплеровских фильтров  $N = 60$ –80 лежит спектр некогерентных составляющих приосевых четверок сигнала, соответствующих диапазону характерис-



**Рис. 5.** Частотные спектры сигналов на частоте 230 Гц (а) и 380 Гц (б) на расстоянии 2000 км. Разрешение 0.00095 Гц.

тических углов  $\pm 0^\circ$ – $9^\circ$ , слева – при  $N = 10$ –40 лежит спектр некогерентных составляющих в диапазоне характеристических углов, превышающих  $\pm 14^\circ$ – $20^\circ$ . Их низкий уровень обусловлен потерей когерентности и значительным поглощением и рассеянием при отражениях сигнала от неровной поверхности вдоль трассы распространения и дна при вхождении системы сигналов с крутыми углами в береговой клин. Невозможность расщепления приосевых составляющих в диапазоне углов  $\pm 0^\circ$ – $9^\circ$  обусловлена мощной предреверберацией (и соответственно этому потерей ими когерентности), малостью их относительных времен задержек и, кроме того, слабой и при этом хаотической зависимостью времен прихода приосевых составляющих от величины характеристического угла.

Полученные результаты демонстрируют частотно-амплитудную и пространственно-временную структуру звукового поля и фазовую устойчивость его составляющих в различных диапазонах характеристических углов в неоднородном волноводе при распространении монохроматических сигналов на большие расстояния и свидетельствуют о довольно высокой эффективности использованного метода обработки. Главное – они свидетельствуют о высокой пространственно-временной устойчивости фазовых характеристик звукового поля и сохранении когерентных свойств его составляющих в определенном, хотя и довольно узком ( $\pm 9^\circ$ – $13^\circ$ ), диапазоне характеристических углов на выбранных частотах (в летних

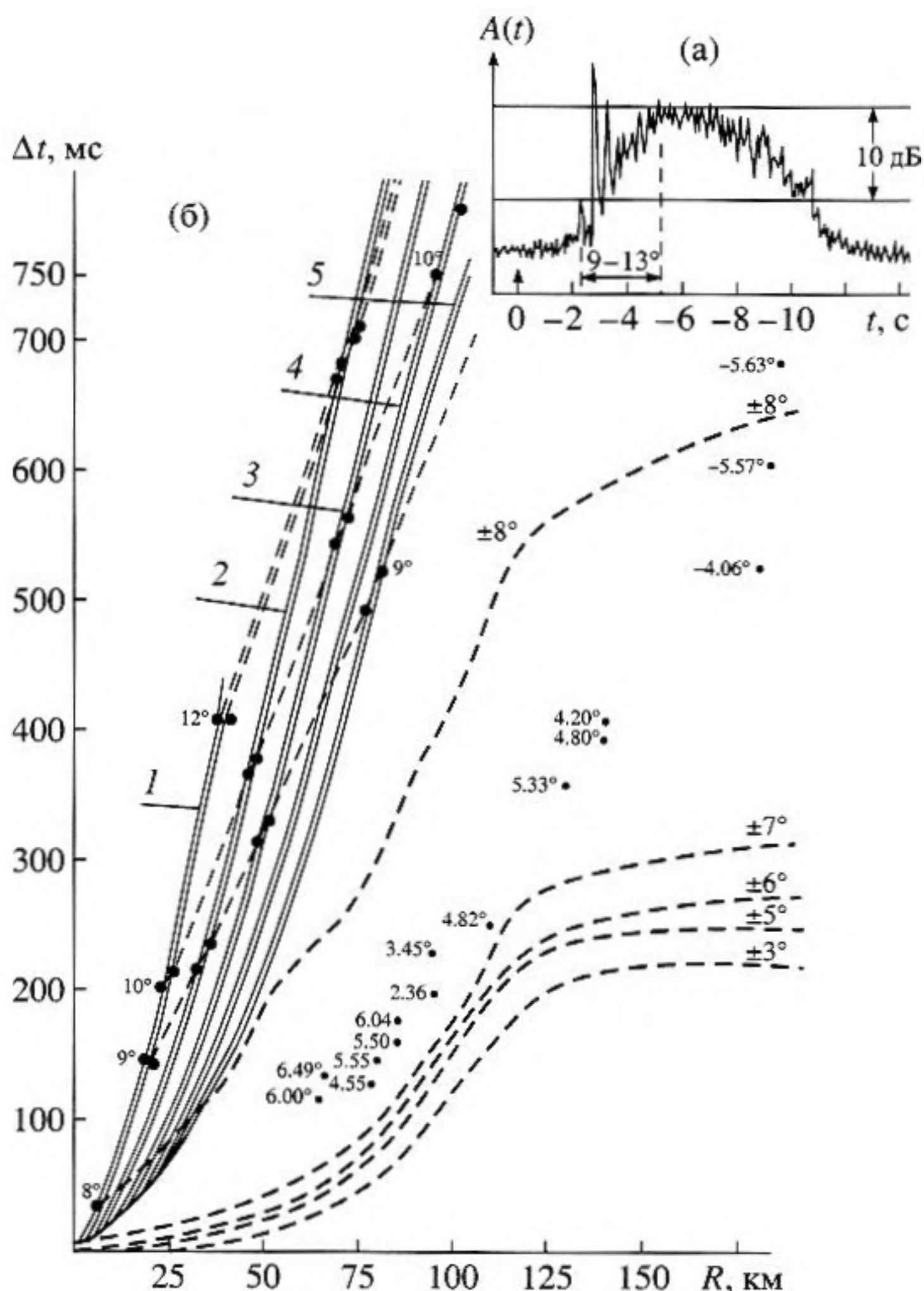


Рис. 6. Форма взрывного широкополосного сигнала на расстоянии 1000 км при глубине взрыва 100 м, приема – 200 м, в полосе 100–2000 Гц (а) (амплитуда сигнала дана в логарифмическом масштабе) и пространственно-временные характеристики звукового поля при переменных (полученных в экспериментах) условиях по трассе (б).

условиях) даже в неоднородном по трассе волноводе.

Более четко пространственно-временную и энергетическую структуру звукового поля на больших расстояниях можно продемонстрировать записью сигналов от взрывного источника звука, представленной на рис. 6а, где амплитудно-временная структура поля более очевидна и не требует особых пояснений. Запись произведена в то же время и на той же трассе на расстоянии 1000 км при глубине источника 100 м, а приемника – 200 м, в полосе частот 100–2000 Гц. Первыми в системе приходят сильно ослабленные при вхождении в береговой клин сигналы с крутыми характеристическими углами, опережающие приосевые составляющие на 10–12 с. После них вступают разделенные во времени когерентные составляющие (9 четверок) с характеристическими углами  $\pm 9^\circ$ – $13^\circ$ . Они лежат в промежутке времени, не превышающем 3 с. Последними прихо-

дят приосевые, перекрывающиеся во времени, некогерентные составляющие в диапазоне характеристических углов  $\pm 0^\circ$ – $9^\circ$  с суммарной длительностью свыше 7 с. Следует отметить, что согласно многочисленным спектрограммам сигналов на частотах 230 и 380 Гц на расстоянии 1000–2100 км количество расщепленных компонент (8–9) и их угловые спектры были близки друг к другу и близки к представленным на рис. 3б, 4б, и 5б, и только на частоте 380 Гц на расстоянии 2000 км угловой диапазон составляющих несколько расширился за счет крутых углов (на шкале частот в пределах номеров фильтров  $N = 10$ – $30$ ).

Амплитуда этих не полностью расщепленных компонент только на 7–13 дБ лежит ниже максимальных значений. Анализируемые результаты исследований частотного расщепления звукового поля отмечались нами в [1] и частично докладывались на XII сессии Российской академического общества [2].

На рис. 6б представлены расчетные пространственно-временные характеристики звукового поля исследуемого волновода при изменяющихся условиях распространения по трассе. Расчет выполнен по лучевой программе А.В. Вагина [3] с учетом рельефа дна при глубине излучателя 100 м в диапазоне характеристических углов от  $-8^\circ$  до  $+13^\circ$  (учтены только лучи, не касающиеся дна при их вхождении в клин) по четырем профилям скорости звука этого региона. Профили скорости выбраны на расстояниях 0, 37, 75 и 430 км. Скорость звука на оси канала на этом участке трассы изменялась в пределах 1450–1460 м/с. Положение оси канала не выходило за пределы 70–100 м. Параметры канала по глубине и расстоянию аппроксимированы линейной зависимостью. По оси абсцисс отложено расстояние в километрах, по оси ординат – время опережения сигналов (относительно времени распространения сигнала вдоль оси волновода со скоростью  $c = 1450$  м/с) в зависимости от угла выхода лучей из излучателя. Кривые 1–5 соответствуют номерам циклов звуковых лучей при крутых углах выхода лучей из излучателя. Пунктирные линии аппроксимируют наиболее вероятные времена опережения при заданных углах выхода. Отдельные одиночные точки на графике с указанием угла выхода показывают диапазон разброса времен опережения и их отличия от среднестатистических значений. На рисунке видно, что средняя горизонтальная скорость распространения сильно зависит от углового диапазона составляющих в системе сигналов. Так, в диапазоне приосевых составляющих сигнала времена прихода лучей по расстоянию оказываются не связанными жестко с углами выхода лучей из излучателя. Наибольшие отличия наблюдаются при характеристических углах  $\pm(0^\circ-9^\circ)$ . В этом диапазоне углов лучи, вышедшие из излучателя под меньшими углами скольжения, могут приходиться к приемнику раньше лучей, вышедших под большими углами, и наоборот. При этом разница их времен приходов может достигать десятков и сотен миллисекунд, что демонстрирует потенциальные возможности использования фазовых методов расчета звуковых полей (например, метода нормальных волн и др.). Например, на расстоянии 175 км луч, вышедший под углом  $-5.63^\circ$ , приходит раньше луча, вышедшего под углом  $8^\circ$ , и отличается от средних значений прихода на 420 мс. Наблюдаемые зависимости, обусловленные крупномасштабными неоднородностями (в отличие от мелкомасштабных неоднородностей, формирующих предревверберацию), приводят не только к появлению мощной объемной предревверберации [4], но и к угловому и временному расщеплению и диффузии целых звуковых пучков и полному хаосу во временных и угловых зависимостях в структуре звукового поля океанического волновода. Это полностью разрушает когерентность и фазо-

вую устойчивость приосевых составляющих сигнала в диапазоне частот до десятков и единиц герц (в рамках лучевых представлений). При характеристических углах, превышающих диапазон  $\pm(8-9^\circ)$ , происходит резкое возрастание средних горизонтальных скоростей и упорядочение их угловых и временных зависимостей, а влияние неоднородностей ослабевает. Крутые лучи пересекают неоднородности, проявляющиеся в основном в поверхностных слоях, под большими углами и большую часть своего пути распространяются по траекториям, лежащим в основном в глубинных слоях океана при малых изменениях профиля скорости. В этом довольно ограниченном диапазоне углов реализуется четкая временная зависимость времен прихода составляющих сигнала и сохраняется их фазовая устойчивость. При дальнейшем возрастании углов начинает сказываться воздействие границ, что приводит к значительному понижению уровня сигналов и потере их когерентных свойств. При многократных отражениях от границ предревверберационные составляющие возрастают по амплитуде, а когерентные соответственно спадают. Действие отмеченных факторов приводит к формированию сложной структуры звукового поля в неоднородном волноводе, реализуемой в реальных условиях и наблюдаемой в экспериментах.

Определим далее фазовые скорости расщепленных компонент. При удалении источника звука от стационарно установленного приемника со скоростью  $V$  (2.5 м/с) частота составляющих поля, обусловленная эффектом Доплера, будет определяться соотношением:

$$f_n(\alpha) = f_0[1 - V/C(\alpha)],$$

где  $f_0$  – частота излучения,  $C(\alpha)$  – фазовая скорость отдельных дискретных по временам и углам вступлений (определяемых параметрами канала) составляющих (четверок) в системе сигналов пространственно-временной структуры поля,  $\alpha$  – их характеристический угол,  $n$  – порядковый номер. Отсюда доплеровское смещение частоты отдельных составляющих номеров  $n$  и  $m$  равно

$$\Delta f = f_n(\alpha) - f_m(\alpha) = f_0 V [1/C_m(\alpha) - 1/C_n(\alpha)],$$

так что

$$\Delta f/f_0 = V[C_n(\alpha) - C_m(\alpha)]/[C_m(\alpha)C_n(\alpha)].$$

Имея величины частотного смещения составляющих  $\Delta f$ , легко определить их фазовые скорости:

$$C_m(\alpha) = C_n(\alpha) f_0 V / [f_0 V + (f_m - f_n) C_n(\alpha)].$$

Определив фазовую скорость по частотному спектру составляющей, распространяющейся вблизи оси канала, равной, например, 1457 м/с, получим фазовые скорости отдельных рефракционных и частично отраженных от дна и поверхности (при вхождении на шельф) составляющих сиг-

нала. Надо обратить внимание на то, что принятая величина фазовой скорости приосевой составляющей довольно условна, так как скорость звука на оси канала вдоль трассы изменяется в пределах от 1450 до 1465 м/с. Однако это особого значения не имеет и мало влияет (и при этом линейно) на фазовые скорости других разрешенных составляющих сигнала, обладающих большими характеристическими углами.

На частоте 230 Гц на расстоянии 1000 км частотное смещение составляющих  $\Delta f_n$  приводит к изменениям фазовых скоростей в пределах 1464–1540 м/с. Это представлено в табл. 1:

$\Delta f$ , мГц	2	4	6	9	14	16	21
$C$ , м/с	1464	1471	1482	1493	1508	1520	1540

На частоте 380 Гц на расстоянии 1010 км частотное смещение составляющих приводит к изменениям фазовых скоростей в пределах 1463–1509 м/с. Это представлено в табл. 2:

$\Delta f$ , мГц	3	6	10	15	22	24
$C$ , м/с	1463	1470	1480	1492	1502	1509

Проведенный анализ показывает, насколько сложной является структура звукового поля в реальных (неоднородных) волноводах и насколько важным представляются выявление и идентификация в ней доминирующих в формировании структуры звукового поля факторов, содержащих когерентные и некогерентные составляющие. Принципиальным и особенно важным это является при прогнозировании звуковых полей с использованием фазовых методов расчета (нормальных волн и др.) и алгоритмов фазовых методов обработки информации.

Изучению когерентных свойств полей в подводных волноводах уделялось и уделяется до настоящего времени большое внимание [5, 6 и др.]. Однако следует заметить, что все исследования когерентных свойств сигналов велись на уровне анализа интегрального суммирования факторов и составляющих поля как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, без угловой или временной их идентификации, тем более без их частотно-углового разрешения. Так, в работе [5] исследована суммарная когерентность поля в глубоком океане и в мелком море. Показано, что в глубоком океане на расстояниях до 500 км на частоте 400 Гц сохраняется детерминированная модель сигналов с небольшим объемным рассеянием, что аналогично нашим результатам по предреверберации, полученным в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах в диапазоне сотен герц на расстоянии до 1500 км. В работе [6] исследуется структура поля в анизотропных условиях мелкого моря при наличии придонного канала. Исследованы потери при распространении,

горизонтальная рефракция и когерентные свойства сигналов с частотами 200 и 400 Гц на расстояниях до 10 км в продольном и до 1 км в поперечном направлениях.

В результате поставленных экспериментов и выполненных исследований тонкой структуры звукового поля впервые получены результаты по частотному расщеплению монохроматического сигнала, распространяющегося в сложных условиях неоднородного по трассе волновода. Показано, что на частотах 230 и 380 Гц на расстояниях вплоть до 2000 км в суммарном поле тональных сигналов в диапазоне характеристических углов  $\pm(9^\circ-13^\circ)$  сохраняются устойчивые фазовые характеристики его составляющих, позволяющие расщепить отдельные группы (четверки) лучей и определить их фазовые скорости.

В диапазоне характеристических углов  $\pm(0^\circ-9^\circ)$  расщепление составляющих невозможно, не только вследствие мощной предреверберации, но и полной потери ими когерентных свойств. Фазовые скорости расщепленных составляющих на частоте 230 Гц лежат в пределах 1464–1540 м/с, на частоте 380 Гц – 1463–1509 м/с. Расширение спектров регулярных составляющих на частотах 230 и 380 Гц составило соответственно 0.02 и 0.035 Гц, а суммарное расширение, включая нерегулярные составляющие, достигает 0.06 и 0.07 Гц.

В заключение выражаю глубокую благодарность С.И. Дворникову и Г.А. Студеничнику за помощь при проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 01-02-16636).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Студеничник Н.В. Комплексные исследования звуковых полей в Курило-Камчатском районе северо-западной части Тихого океана // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 6. С. 850–860.
2. Студеничник Н.В. Исследования пространственно-временной устойчивости звукового поля в подводном звуковом канале // Доклады IX школы семинара акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана" совмещенной с XII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2002. С. 179–182.
3. Вагин А.В., Мальцев Н.Е. Расчеты низкочастотных звуковых полей в слоистом океане // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1977. № 9. С. 61–81.
4. Студеничник Н.В. Исследование времен предреверберации в глубоководном и приповерхностном звуковых каналах // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 123–130.
5. Carey W.M. The determination of signal coherence length based on signal coherence and gain measurements in deep and shallow water // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 104. № 2. Pt. 1. P. 831–837.

6. Roger Oba, Steven Finette. Acoustic propagation through anisotropic internal wave fields: Transmission loss cross-range coherence, and horizontal refraction // J. Acoust. Soc. Amer. 2002. V. 111. № 2. P. 769–784.

## Space-Time and Frequency-Phase Stability of the 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: vadov@akin.ru*

The space-time and frequency-phase stability of the acoustic field is studied for the case of the long-range propagation in the underwater sound channel. A possibility of splitting the field components produced by the Doppler effect in the total interference structure of a monochromatic signal is revealed for different ranges, parameters of the channel inhomogeneities, and frequencies. The experiments are performed in summertime, in the northwestern part of the Pacific Ocean, near the Kamchatka Peninsula, on a path of 2100 km. Highly stable sound sources with resonant frequencies of 230 and 380 Hz are used for the measurements. The sources are towed at a depth of 70 m with a speed of 5–6 knots. To receive the signal near the channel axis, a bottom-moored (at a depth of 200 m) stationary system is used. The width of the sound beams is studied, and the broadening limits of the frequency spectra are estimated for the coherent and incoherent field components in the case of the super-long-range sound propagation. The phase velocities of the split components are determined.