АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 1, с. 46 - 51

УДК 551.463

ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВЫХ СПЕКТРОВ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ В ПРИКАМЧАТСКОМ РАЙОНЕ И В ЮЖНО-КИТАЙСКОМ МОРЕ

© 1996 г. О. П. Галкин, Л. В. Мартынова, Н. В. Студеничник

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 22.09.94 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований угловых спектров звукового поля в вертикальной плоскости в районах материкового склона с использованием линейной остронаправленной антенны в диапазоне частот 500 - 5000 Гц. Исследования выполнены в северо-западной части Тихого океана и в Южно-Китайском море на трассах протяженностью до 120 - 300 км. Описываются условия проведения опытов и использованная аппаратура приема, обработки и регистрации сигналов.

Создание аппаратуры подводного наблюдения для работы в сложных физико-географических условиях, включающих клиновидные области берегового шельфа и материкового склона, требует поиска физически обоснованных принципов их построения, базирующихся на конкретных особенностях и внутреннем строении звукового поля, обусловленных рельефом дна, гидрологическими условиями и параметрами грунта. В данных условиях, наряду с энергетическими характеристиками, первостепенное значение приобретают временные, угловые и корреляционные характеристики звукового поля и их пространственно-временная устойчивость, определяющие эффективность действия широкоапертурных антенн и аппаратуры обработки в целом.

В этом плане важным было исследовать устойчивость угловой и временной структуры звукового поля и возможность их измерения с помощью вертикально развитых антенных систем. Априори трудно утверждать, что в условиях активных динамических процессов водных масс при многократных отражениях от дна и поверхности сохраняется четко выраженная угловая структура звукового поля и возможность выделения преобладающего направления прихода сигналов с помощью антенн.

Для этих целей проведены эксперименты на двух квазистационарных трассах протяженностью 60 и 120 км в Южно-Китайском море и на материковом склоне северо-западной части Тихого океана Прикамчатского района на двух трассах протяженностью 300 км.

В Южно-Китайском море исследования проведены между банками Грейнджер, Райфлмен, Принс-Консорт с глубинами места в районе установок излучающих и приемных устройств на вершинах подводных гор – 80 - 100 м. Глубина моря по трассам изменялась в пределах 80 - 4800 м. Схема расположения трасс представлена на рис. 1.

В Прикамчатском районе Тихого океана исследования выполнены на трассах, ориентированных по направлению 112° и 150° от точки в Южной части восточного побережья Камчатки, глубина места в которой составляла 130 м. Глубина океана по трассе достигала 5000 - 7500 м. Эксперименты проведены в 1990 г. в ходе выполнения экспедиционного рейса на научно-исследовательских судах "Академик Борис Константинов" ("АБК") и и "Академик Николай Андреев" ("АНА").

Гидрологические условия в Южно-Китайском море (10 - 14 мая 1990 г.) характеризовались небольшим приповерхностным каналом толщиной 20 - 30 м и отрицательным градиентом скорости звука вплоть до 1000 м. Ниже шло нарастание скорости звука и образовывался подводный звуковой канал с осью на глубине 900 - 1000 м. Профиль рельефа дна на исследуемых трассах характеризовался наклонами, достигающими 10° - 15°, при выходе на мелководье, а на банке Принс-Консорт – 30° - 40°. Профиль скорости звука, рельеф дна и лучевая картина звукового поля на квазистационарной трассе № 1 представлены на рис. 2.

В Прикамчатском районе 23 - 28 июня 1990 г. приповерхностный канал отсутствовал или составлял не более 5 м, а отрицательный градиент скорости звука простирался до глубины 40 - 50 м, после чего происходило нарастание скорости звука с глубиной и образованием мелководного звукового канала с осью на глубине 40 - 50 м. Фрагмент гидрологических условий суточной станции 23 - 24 июня 1990 г. в точке размещения приемных устройств представлен на рис. 3.

В экспериментах использовались штатные излучающие системы НИС "Академик Борис Константинов", обеспечивающие эффективное излучение в диапазоне частот от 16 до 5500 Гц.

Прием сигналов осуществлялся на вертикально развитую шланговую антенну длиной 40 м спе-

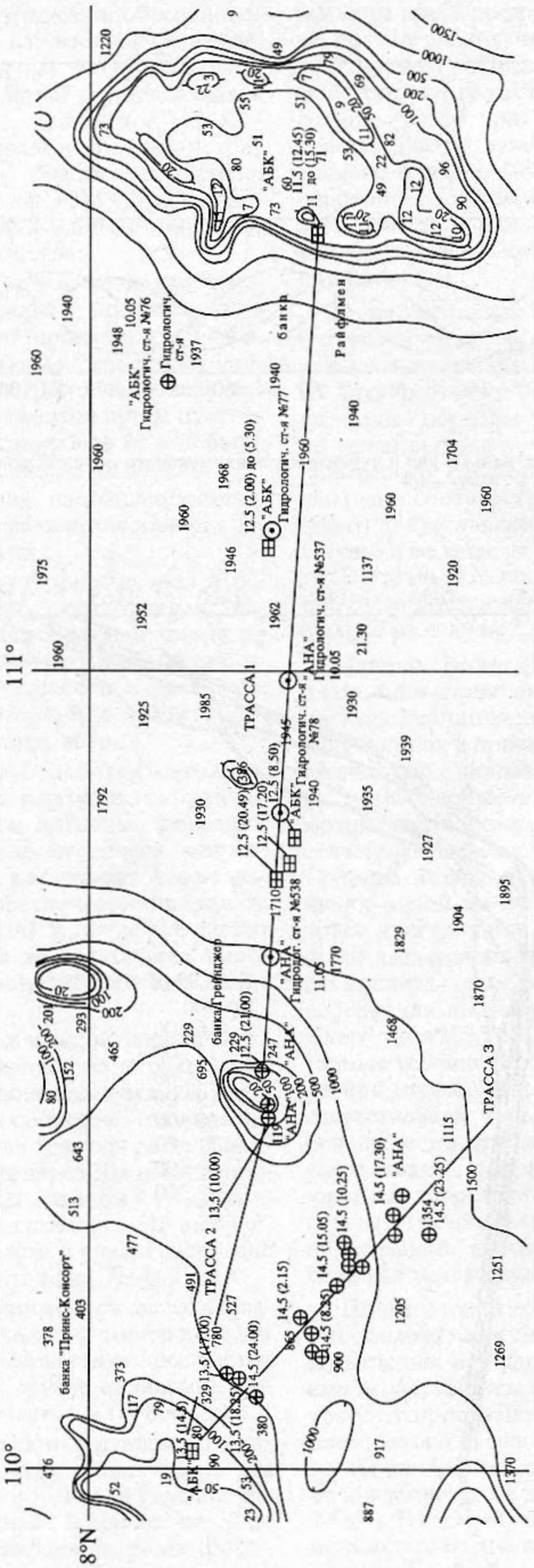


Рис. 1. Схема проведения опытов в Южно-Китайском море.

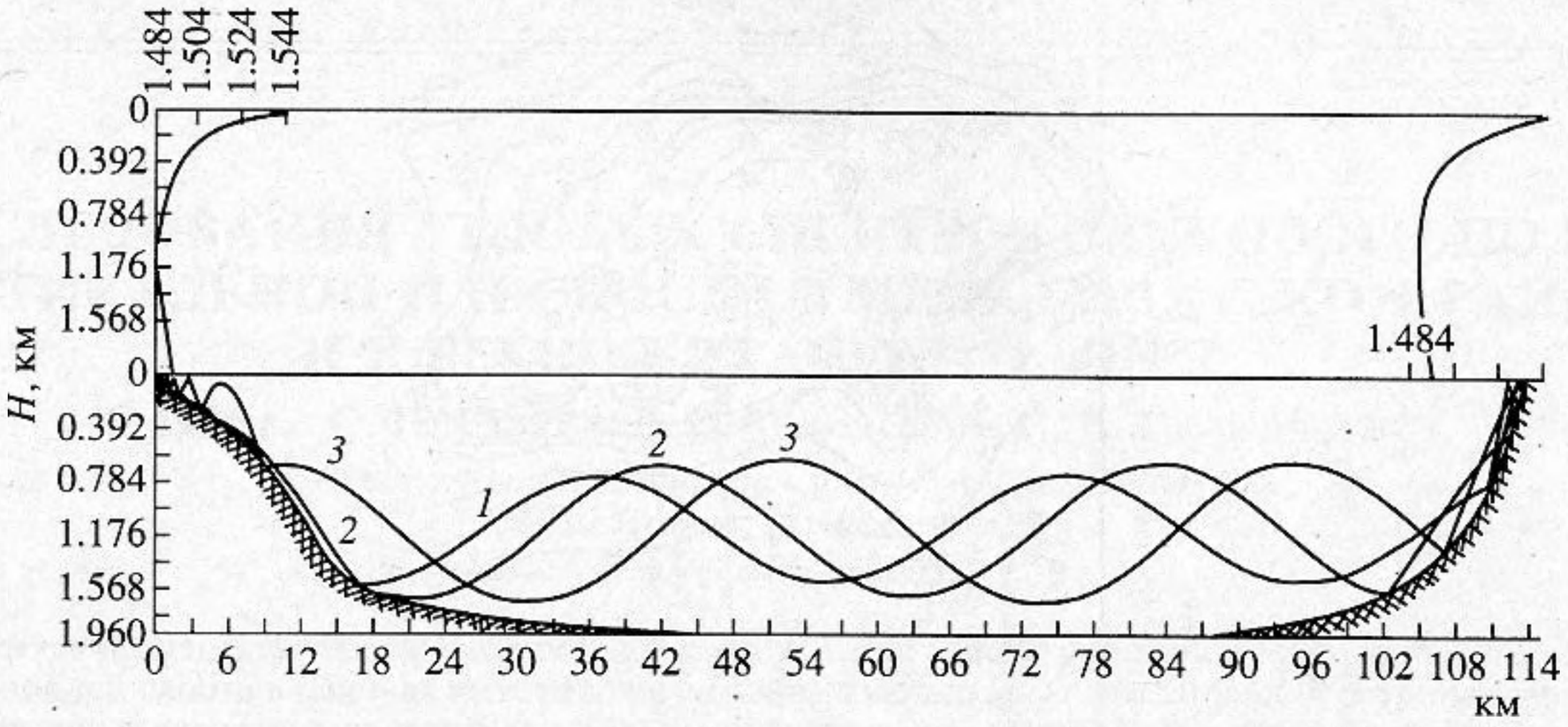
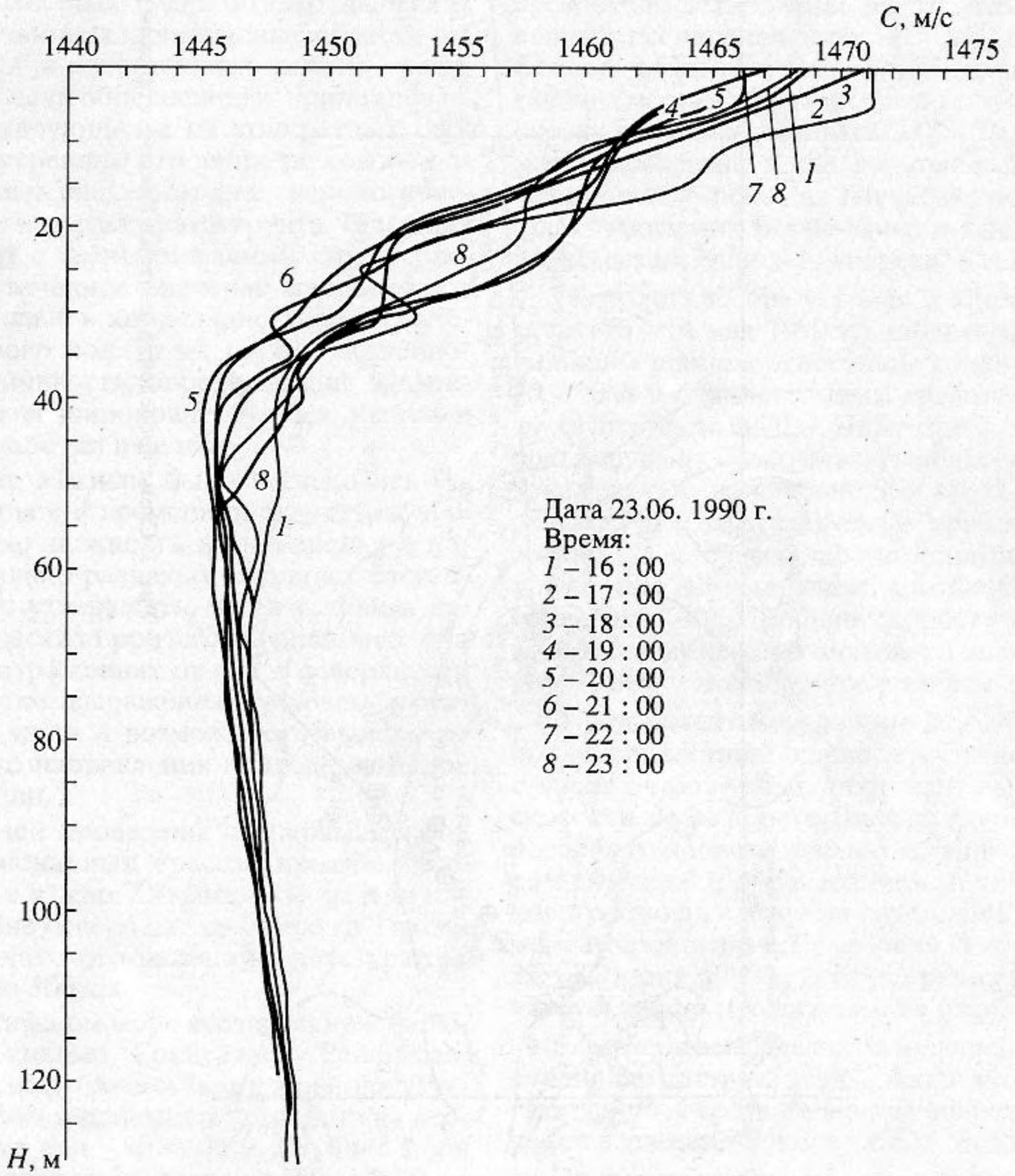


Рис. 2. Профиль скорости звука, рельеф дна и лучевая картина звукового поля в Южно-Китайском море при углах скольжения: *1* – $\alpha = 0°$; *2* – $\alpha = 2.6°$; *3* – $\alpha = 40°$.



Дата 23.06. 1990 г.
Время:
1 – 16 : 00
2 – 17 : 00
3 – 18 : 00
4 – 19 : 00
5 – 20 : 00
6 – 21 : 00
7 – 22 : 00
8 – 23 : 00

Рис. 3. Фрагмент гидрологических условий суточной станции в Прикамчатском районе в точке приема.

циально разработанного комплекса, обеспечивающего прием и измерение параметров сигналов, включая их угловые спектры в вертикальной плоскости. Регистрация сигналов осуществлялась на многоканальных магнитофонах типа TEAC – 71C (21 канал), – 50C (14 каналов), фоторегистрирующих камерах РФК-5, самописцах уровня "Брюэль и Кьер", а также на ЭВМ СМ-2 с дальнейшим отображением информации на широкоформатном печатном устройстве.

Приемная антенна состояла из неэквидистантно расположенных отдельных приемников в количестве 296 штук, сгруппированных в 74 фазовых центрах (по 4 гидрофона каждый) для формирования необходимых диаграмм направленности. При проведении экспериментов путем изменения числа используемых гидрофонов можно было менять рабочую длину антенны от 10 до 40 м.

Формирование диаграмм направленности в вертикальной плоскости осуществлялось аналоговым и цифровым методами.

При аналоговом методе формирования в основном использовалась одна сканирующая диаграмма (различной или постоянной ширины на разных частотах), обеспечивающая обзор пространства в вертикальной плоскости в диапазоне углов ±23° с периодом обзора 40 с (20 секунд – сверху вниз и 20 секунд – снизу вверх).

При цифровом методе обработки сигналов, поступающих из усилительных трактов отдельных 64-х фазовых центров антенны, формировался статический веер характеристик направленности (32 диаграммы), работающий в реальном масштабе времени и обеспечивающий прием сигналов в секторе углов ±90° в диапазоне частот от нескольких сотен герц до нескольких килогерц. В опытах работа проводилась в диапазоне углов обзора ±16° и ±32°.

Амплитуды сигналов от каждой парциальной диаграммы веера отображались на экране панорамного индикатора, что позволяло судить об угловом спектре приходящих сигналов. Полученный таким образом спектр углов прихода регистрировался с темпом 1 реализация через 30 с регистрирующей фотокамерой (РФК) и с темпом 4.4 с вводился в ЭВМ СМ-2. Выходные сигналы от 19 выбранных диаграмм направленности в аналоговом виде подавались на входы магнитофона TEAC.

При проведении экспериментов использовались различные типы сигналов: тональные (от 600 до 3150 Гц), псевдошумовые (в полосе частот 0.5 - 5 кГц, 1.2 - 2 кГц и другие вариации), импульсные ЛЧМ (в полосе частот 600 - 800 Гц).

При работе на банках Южно-Китайского моря излучающее и приемное суда ставились на два якоря при глубинах места 80 - 100 м. Глубина источников и приемников звука менялась от 20 до 80 м. Протяженность квазистационарных трасс – 120 (трасса *1*) и 60 (трасса *2*) км. Представленные выше на рис. 2 профиль скорости звука по глубине, рельеф дна и лучевая картина на трассе *1* между банками Грейнджер и Райфлмен наглядно демонстрируют геометрию формирования звукового поля в этих районах на квазистационарных трассах. Расчет лучевой картины выполнен в диапазоне углов до 40° (0; 2.6°; 40°). Хорошо видны особенности условий распространения – образование зон тени у поверхности и у дна (в глубоководной части) и концентрация лучей вдоль наклонного дна.

В наблюдаемых условиях распространения (реализованные соотношения величины отрицательного градиента скорости звука и углы наклона дна) формирование звукового поля происходит таким образом, что в определенном диапазоне углов выхода лучей из излучателя, начиная с некоторого расстояния (в зависимости от угла выхода и соответствующего количества отражений от дна) углы скольжения у дна приближаются к нулю и не зависят в дальнейшем от их кратности. В результате происходит высокая концентрация стелющихся вдоль дна лучей, лежащих (при выходе из излучателя) в пределах ±0 - 50°.

Однако, несмотря на эти в геометрическом плане благоприятные условия распространения, на квазистационарных трассах при нахождении излучающих и приемных устройств у вершин подводных гор в диапазоне указанных ранее рабочих частот обнаружение сигналов оказалось невозможным. Поэтому дополнительно было осуществлено излучение непрерывных сигналов на 11 частотах в диапазоне от 16 до 3150 Гц. Однако, ни на одной из выбранных квазистационарных трасс, и ни на одной из рабочих частот сигналы не были зафиксированы даже в самых узких полосах анализа с максимально допустимым временем осреднения на анализаторах фирмы "Брюэль и Кьер" типа 2033 и 2034. Следует заметить, что погодные условия при этом были штилевые и потери при отражениях от поверхности практически отсутствовали на всех частотах. Следовательно, основные потери энергии при распространении были связаны с отражением от дна. Согласно имеющимся гидрографическим данным, подводные горы этого района состоят из мощных коралловых образований, которые и обусловили аномально большие потери при распространении звука.

После окончательного вывода о невозможности обнаружения сигналов на всех частотах и всевозможных вариациях глубин излучения и приема эксперименты были проведены вдоль тех же трасс распространения сигналов, но с расположением одного из судов (приемного или излучающего) на банке, а второго – в открытом океане при нахождении его в дрейфе при глубинах места до 2000 м. В этом случае потери энергии сигнала при отражении от дна происходили только в одной из клиновидных областей.

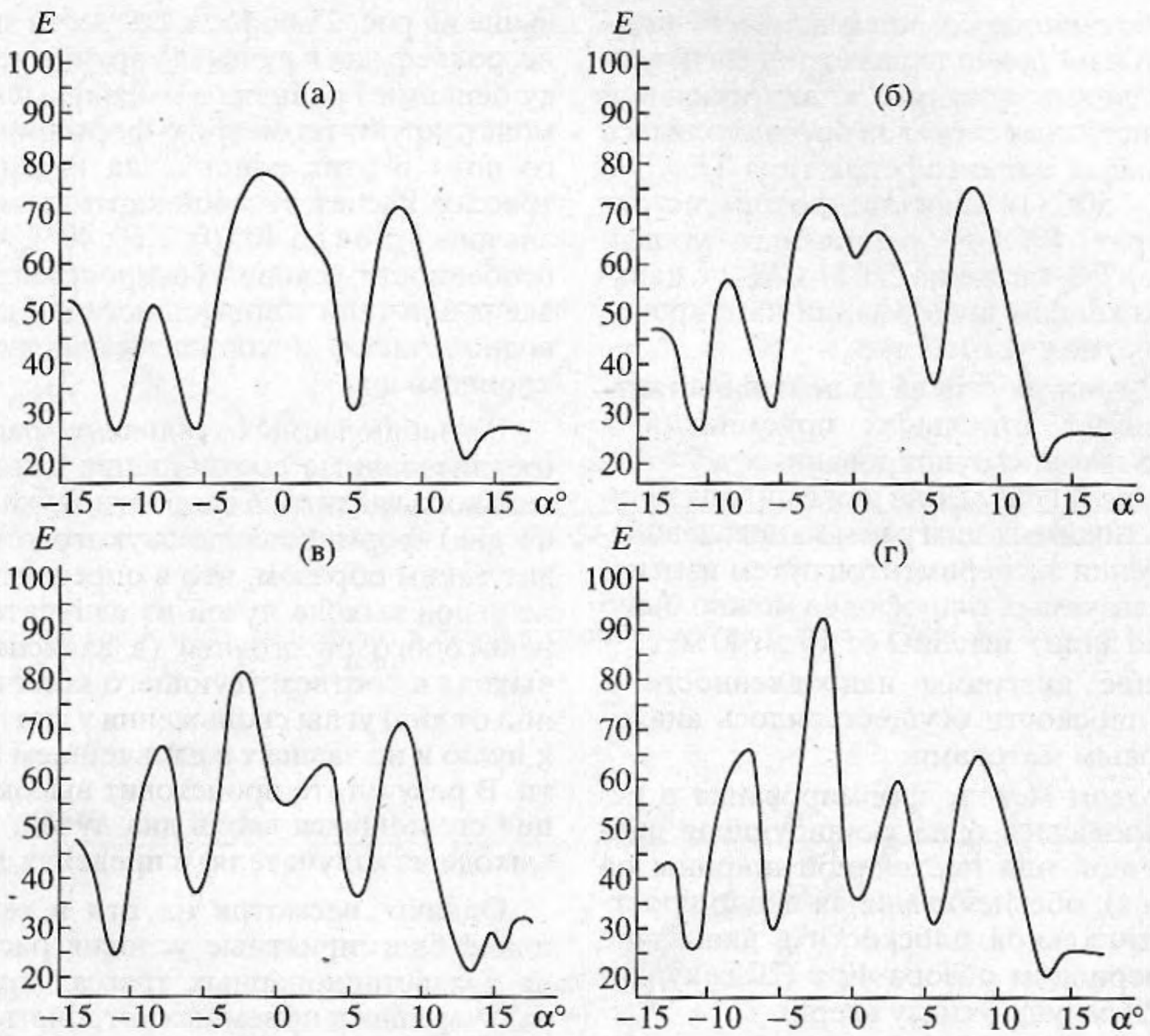


Рис. 4. Угловой спектр звукового поля в Южно-Китайском море. Расстояние – 10 км, глубина излучения – 60 м, глубина приема (центр антенны) – 400 м, частота – 1600 Гц.

На трассе *1* прием сигналов осуществлялся на вершине банки Грейнджер, а излучение – на расстояниях 80 и 40 км к востоку от точки приема в глубоководной части трассы при нахождении излучающего судна в дрейфе. На расстоянии 80 км сигналы обнаруживались только при глубине излучения 400 м на частотах 1.25 - 2 кГц и только при приеме на остронаправленную систему в узкой полосе частот (Δf = 3 Гц) с превышением уровня помех на 2 - 4 дБ. На расстоянии 40 км соотношение сигнал/помеха возросло до 10 - 12 дБ (при глубине излучения 400 м), что давало возможность производить уверенное измерение спектра приходящих сигналов в диапазоне углов от 0° до ±15°. При этом четко выделялись 5 - 7 групп лучей с максимумом, лежащим в пределах ±7° - 8°.

После работы на трассе *2* (курс 103°) излучающее судно ("АБК") продолжало стоять на якоре на банке Принс-Консорт, а приемное – удалялось по курсу 135° (несколько южнее квазистационарной трассы), производя прием сигналов в отдельных точках на расстояниях 10 (глубина 500 м), 20, 30 и 45 км (глубина 1300 м). На рис. 1 эта трасса обозначена как отдельная трасса – трасса *3*. Кружочки с крестиками показывают местонахождение приемного судна во время опытов, здесь же указано и время выполнения измерений.

Примеры четырех последовательных, осредненных по 6 реализациям (6 × 4.4 с), записей сигналов на расстоянии 10 км на частоте 1 кГц при глубине излучения 60 м, а приема на глубине 400 м представлены на рис. 4. Видна динамика изменений угловых спектров сигналов, вследствие дрейфа и нестабильности условий распространения, за время 105.6 секунды.

При работе в Прикамчатском районе устойчивый прием сигналов на частотах 0.5 - 2.5 кГц при глубине места в точке приема 130 м осуществлялся на обеих трассах на расстояниях вплоть до 300 км в различных частотных полосах с четким выделением до 3 - 6 отдельно приходящих групп лучей. Излучающее судно в рабочих точках (65, 120, 200 и 300 км обеих трасс) находилось в свободном дрейфе. Примеры отдельных осредненных по 6 реализациям записей угловых спектров сигналов на расстоянии 300 км и частоте 600 Гц представлены на рис. 5. Видно, что за время 105.6 с угловой спектр сигналов претерпел существеннейшее изменение. Если на рис. 5а основной максимум прихода сигналов лежит в области почти горизонтальных лучей, то на рис. 5г максимум

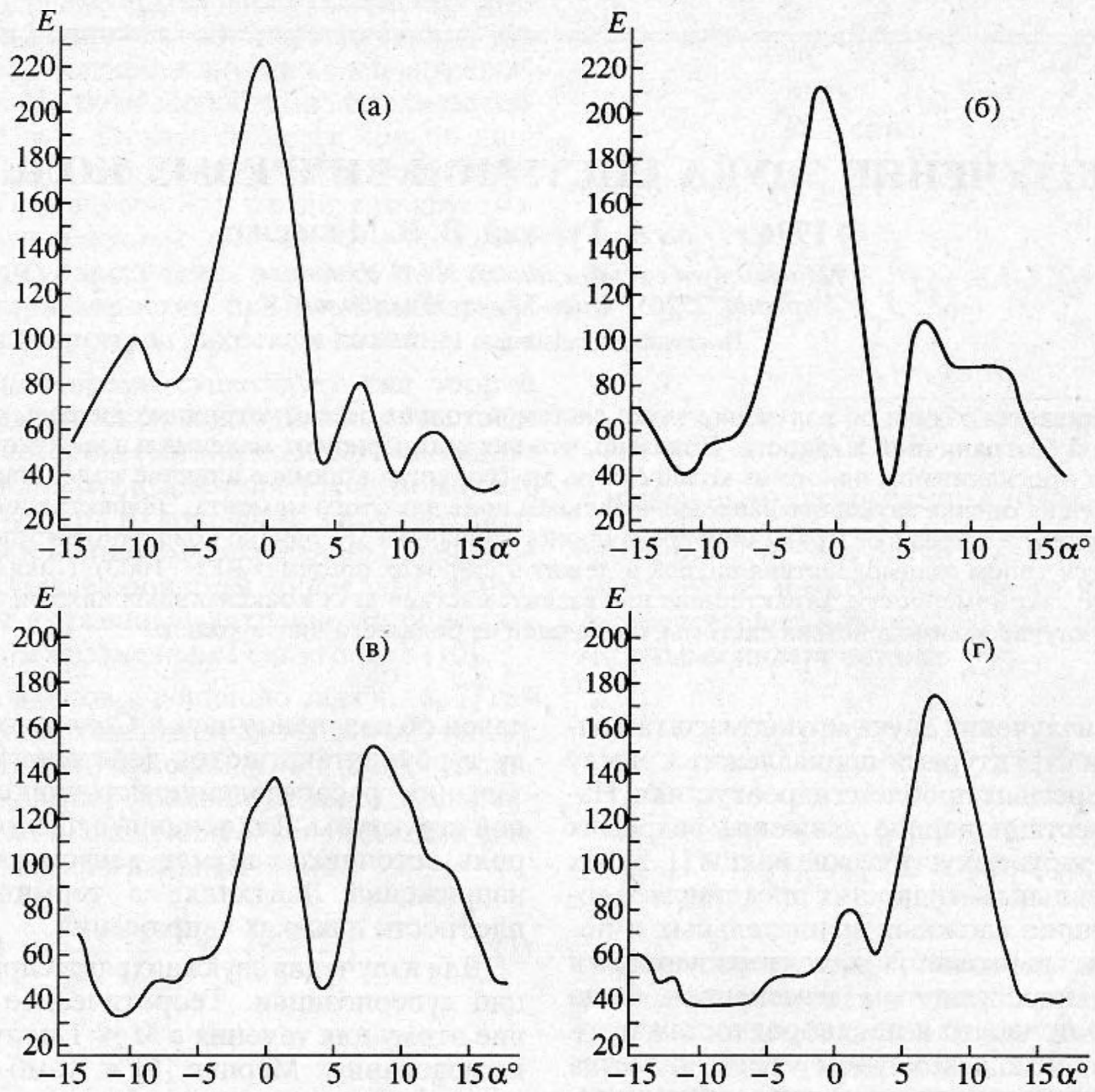


Рис. 5. Угловой спектр звукового поля в Прикамчатском районе. Глубина источника – 50 м, глубина центра приемной антенны – 50 м. Трасса – К-112°. Расстояние – 300 км, частота – 600 Гц.

сигналов сместился к углам +7° - 8°. На записях (б) и (в) видны приходы неразрешенных лучей вследствие относительно широкой диаграммы направленности на частоте 600 Гц.

Выполненные исследования показали существование относительно устойчивой пространственно-угловой структуры звукового поля в вертикальной плоскости в сложных физико-географических условиях клиновидных областей тропического пояса и северных умеренных широт и возможность их измерения развитыми в вертикальной плоскости остронаправленными антеннами при различном взаимном расположении корреспондирующих точек относительно ребра клина.

Studies of Vertical-Plane Acoustic Spectra near the Kamchatka Peninsula and in the South China Sea

O. P. Galkin, L. V. Martynova, and N. V. Studenichnik

Results of experimental sea studies of the angular sound spectra in the vertical plane obtained on a continental slope with a linear narrow-beam antenna in the range 500 - 5000 Hz are presented. These studies were conducted in the north west Pacific and in the South China Sea, on 120 - 300 km tracks. Experimental conditions and the receiving, processing, and recording instrumentation are described.