

УДК 551.46.21

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В РАЙОНЕ ГОЛЬФСТРИМА

© 1994 г. О. П. Галкин, А. М. Дымшиц, Е. А. Харченко, Л. В. Швачко

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 05.01.94 г.

Приводятся результаты, полученные для двух встречных трасс распространения звука, расположенных поперек течения Гольфстрим. Обсуждаются особенности методики проведения экспериментов с использованием уникальных комплексов аппаратуры научно-исследовательских судов. Статистические характеристики угловой структуры для исследованного района сопоставляются с аналогичными характеристиками звуковых полей, полученными в других районах Мирового океана.

Тонкая структура звукового поля в океане (угловая, временная, энергетическая) и ее статистические характеристики непосредственно связаны с акустико-океанологическими параметрами водной толщи.

Экспериментальными исследованиями в глубоком океане угловых спектров, под которыми понимается совокупность направлений прихода сигнала в точку приема в вертикальной плоскости, и временных спектров, которые определяются разностями времен прихода одного и того же сигнала, в Акустическом институте занимаются уже много лет (см., например, [1 - 4]). Проведены также теоретические оценки этих величин, установлена связь флуктуаций с неоднородностями показателя преломления океанической среды. Накоплен богатый материал не только по тонкой структуре звуковых полей, но и по флуктуациям отдельных ее элементов. В частности показано, что флуктуации углов прихода сигналов, обусловленные неоднородностями среды, на дистанциях в сотни километров не превышают нескольких десятых долей градуса. Однако, провести указанные исследования в самых разнообразных гидрологических условиях и в различных районах Мирового океана не представляется возможным. Поэтому была поставлена задача об оценке "сверху" влияния среды на статистические характеристики тонкой структуры звукового поля.

В 1989 г. был поставлен опыт по изучению структуры поля в районе течения Гольфстрим, где пространственно-временная изменчивость среды близка к максимальной. Работы были осуществлены во время 33 рейса НИС "Сергей Вавилов" (СВ) и "Петр Лебедев" (ПЛ), а также 7 рейса НИС "Академик Николай Андреев" (АНА) и 2 рейса НИС "Академик Борис Константинов" (АБК). Исключительная возможность совместной работы четырех научно-исследовательских судов, к тому же оборудованных уникальной акустичес-

кой аппаратурой, была использована для реализации двух одновременно работающих в противоположных направлениях акустических трасс.

Предварительно было проведено тщательное океанологическое обследование предполагаемого района работ для уточнения положения Гольфстрима к моменту начала исследований. При этом необходимо было выполнить по меньшей мере два условия: во-первых, надо было работать в той части течения, где оно еще относительно нешироко и, следовательно, горизонтальные градиенты океанологических характеристик максимальны, и во-вторых, район не должен был располагаться в 200-мильной экономической зоне США и Канады. При решении этой задачи сначала использовались факсимильные карты поверхностной температуры, передаваемые Гидрометцентром СССР, а затем - результаты измерений поверхностной температуры с помощью буксируемых датчиков, проводимые всеми четырьмя судами, двигающимися в направлении с севера на юг с расстоянием друг от друга не более 50 км. Кроме измерения поверхностной температуры периодически проводились замеры профиля скорости звука до глубины 3000 м. Таким способом был обследован район 320 на 240 км.

Во время съемки был найден стрежень Гольфстрима с поверхностной температурой 28°C, который был ориентирован с юго-запада на северо-восток. На отдельных участках течения горизонтальные градиенты поверхностной температуры достигали 2 - 3°C/км. Результаты съемки поверхностной температуры показаны на рис. 1. Этот район был выбран для опыта по изучению тонкой структуры звуковых полей и ее стабильности одновременно на двух акустических трассах, расположенных поперек течения и изображенных на рис. 1 штриховой линией.

Изменение профиля скорости звука $c(z)$ вдоль трассы распространения акустических сигналов

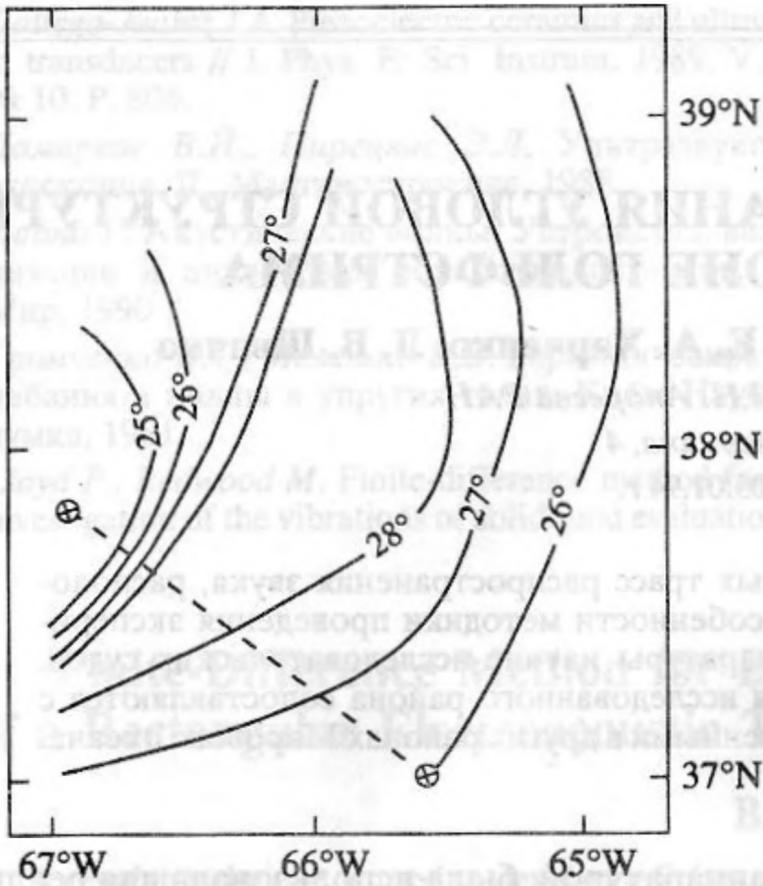


Рис. 1. Карта поверхностной температуры в районе работ. Штриховой линией показано положение акустических трасс.

приведено на рис. 2. На нем указаны номера станций, выполненных судами, участвовавшими в экспериментах. Если отсчитывать расстояние от НИС АНА, находящегося в северо-западной части трасс, то станции, а следовательно, и приведенные профили будут располагаться на дистанциях 0; 29.6; 75.9; 161.1; 175.9 км от начала отсчета (на рис. 2 слева направо). Из приведенных данных

следует, что ось подводного звукового канала с 500-метровой глубины на северо-западе района постепенно переходит на глубину 1200 м на юго-востоке.

Методически опыт проводился следующим образом. Участвующие в эксперименте четыре судна (два излучающие и два приемные) лежали в дрейфе по обе стороны стрежня Гольфстрима. Излучающее судно для одной из трасс располагалось в непосредственной близости (1 - 1.5 км) от приемного судна другой трассы. Таким образом были образованы две встречные акустические трассы практически полностью совпадающие друг с другом и отличающиеся лишь направлением распространения звука (рис. 3а).

При одинаковой длине трасс и при одинаковых глубинах погружения излучателей и приемных систем, но при существенно отличающихся профилях скорости звука в точках приема, должны быть значительные различия в угловых спектрах принимаемых сигналов и их флуктуациях, несмотря на то, что сигналы проходят через одни и те же неоднородности среды. В меньшей степени это относится к энергетическим характеристикам принимаемых сигналов и совсем не затрагивает временные спектры. Длина трасс составляла 186 км (3-я зона конвергенции). На северо-западном конце трасс находились НИС АНА и АБК, а на юго-восточном – НИС СВ и ПЛ. В начале опыта длины обеих акустических трасс (одна – от излучающего НИС АБК до приемного НИС СВ, другая от излучающего НИС ПЛ до приемного НИС АНА) практически не отличались, а через 5 ч эксперимента, несмотря на различия в дрейфе

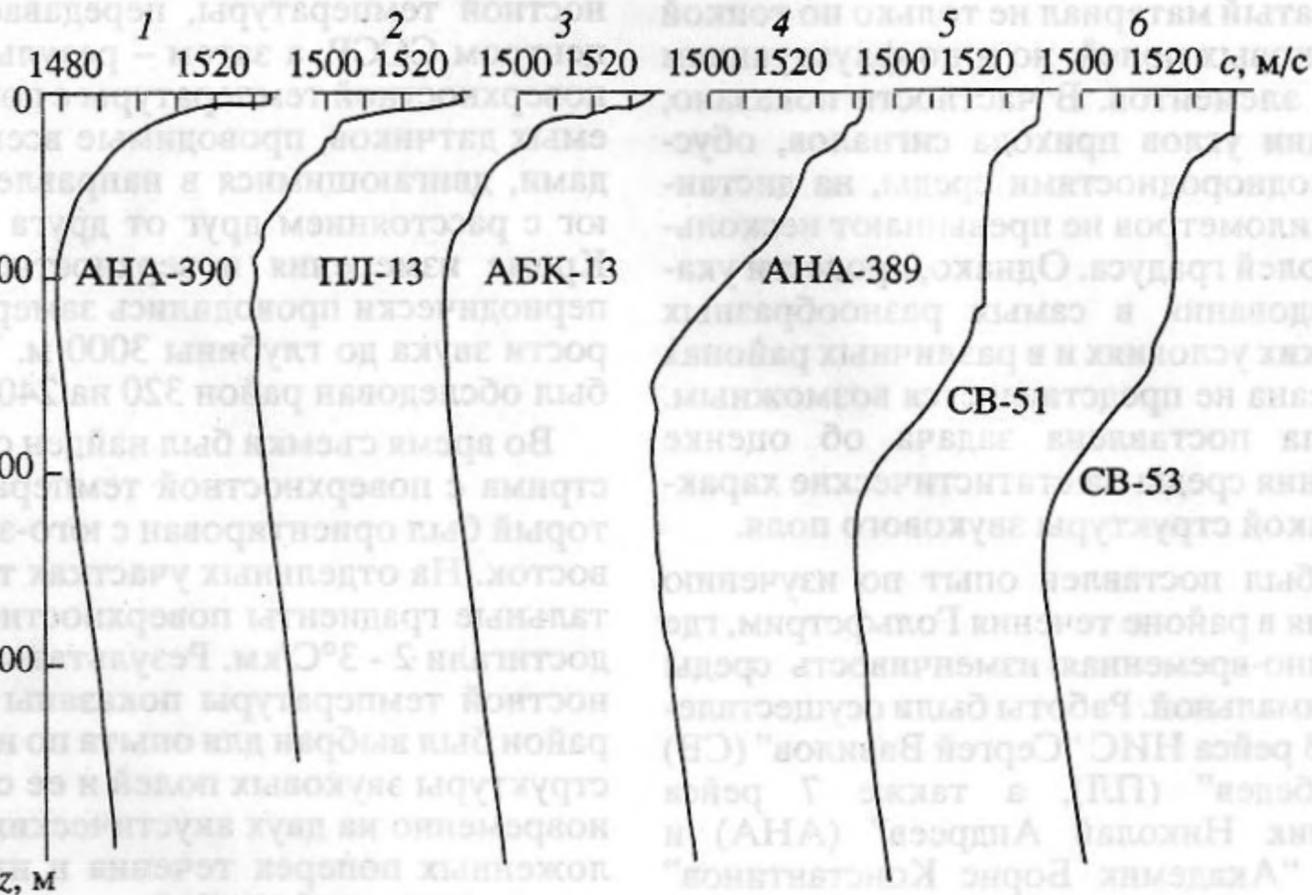


Рис. 2. Изменение профиля скорости звука $c(z)$ вдоль трассы распространения с северо-запада на юго-восток (1 – 0; 2 – 29.6; 3 – 75.9; 4 – 161.1; 5 – 175.9; 6 – 186 км).

судов, разница в длинах трасс, хотя и возросла, но составила всего 0.7 км.

Контроль дистанции между излучающей и приемной системами (а не между соответствующими судами) осуществлялся специальной аппаратурой непрерывно на протяжении всего опыта способом, основанным на измерении времени пробега акустического сигнала и системе единого времени. Ошибка измерения дистанции при этом не превышает нескольких десятков метров [5].

При постановке опыта необходимо было решить задачу выделения на каждом приемном судне сигналов одного излучателя, находящегося на противоположном конце трассы, на фоне другого, расположенного в непосредственной близости от приемной системы. Проблема была снята путем организации попеременного излучения излучающими судами, когда принимаемый от удаленного источника сигнал попадает в паузы лежащего вблизи излучающего судна. Режим излучения НИС ПЛ представлял собой 90 с излучения и 90 с паузы. Режим для НИС АБК – 70 с излучения и 110 с паузы. Таким образом, при правильной синхронизации моментов излучения излучаемый сигнал одного судна укладывался в паузу другого с “зазором” 10 с по краям. Этот зазор обеспечивал “вложенность” друг в друга сигналов двух судов при возможном изменении времени распространения за счет некоторого взаимного дрейфа судов в ходе многочасового опыта. На рис. 3б приведена реальная картина сигнала, принятого одиночным гидрофоном антенны одного из судов при работе в описываемом режиме, представляющая собой зависимость уровня сигнала (ось ординат) от текущего времени. Ограниченные по интенсивности импульсы приняты от стоящего рядом излучающего судна, а меньшие и изменяющиеся по величине импульсы соответствуют излучению судна на другом конце трассы. Контроль дистанции на всем протяжении опыта показал, что максимальная раздрейфовка каждого излучающего судна относительно находящегося вблизи приемного судна не превысила 1.5 км, а разница в длинах встречных трасс, как уже указывалось раньше, – 0.7 км.

Прием сигналов на НИС СВ и АНА осуществлялся с помощью вертикально-протяженных антенн с неэквидистантно расположенными гидрофонами длиной примерно 40 м на глубине 250 м (положение центрального гидрофона антенны). При средней частоте излучения широкополосного (ширина полосы – 1 октава) псевдошумового сигнала 1 кГц раствор диаграмм направленности по уровню 0.7 составлял около 2 градусов.

Для более наглядного представления о количественных изменениях профиля скорости звука $c(z)$ в верхней части волновода (до 3 км) некоторые из них приведены вместе на рис. 4а. Сплошной кривой (1) представлен профиль на северо-западном “берегу” течения, где располагались суда АНА и

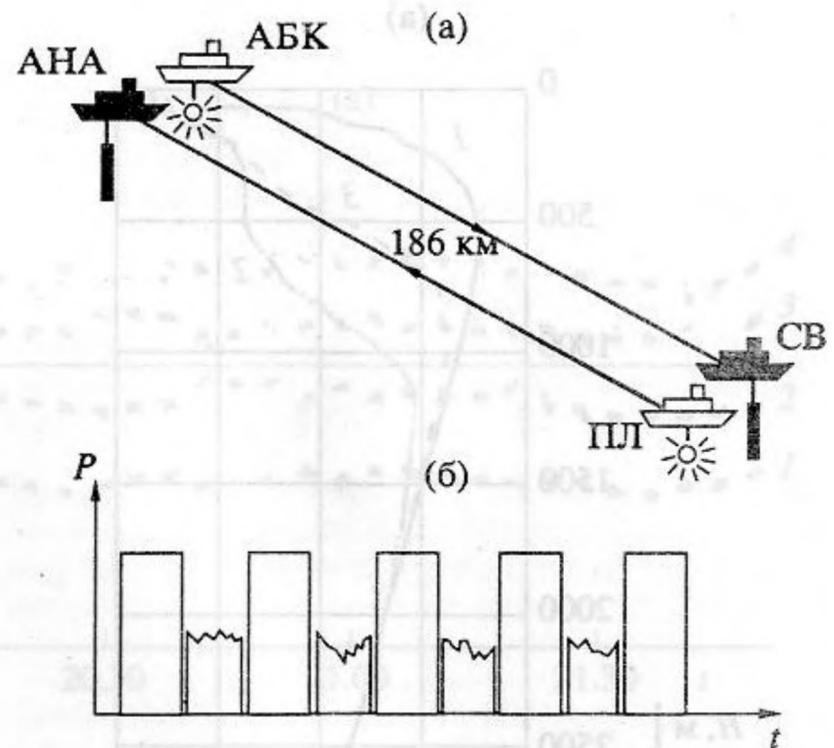


Рис. 3. а – Схема расположения судов в опыте (АНА – НИС “Академик Николай Андреев”; АБК – НИС “Академик Борис Константинов”; СВ – НИС “Сергей Вавилов”; ПЛ – НИС “Петр Лебедев”). б – вид сигналов, принимаемых на НИС “Сергей Вавилов” и НИС “Академик Николай Андреев”.

АБК, штрих-пунктирной кривой (2) – профиль на юго-восточном “берегу”, где располагались суда СВ и ПЛ, штриховая (3) линия соответствует профилю $c(z)$ примерно на середине трассы. На рис. 4б приведена лучевая картина, рассчитанная для условий опыта при излучении с НИС АБК, а на рис. 4в лучевая картина для излучения с НИС ПЛ (глубина излучателей на обоих судах была одинаковой и равнялась 250 м). Разный характер лучевых картин определяется различием скоростей звука в точках излучения. Действительно, скорость звука на глубине 250 м у НИС ПЛ составляла 1525 м/с, что совпадает со скоростью звука на глубине около 4000 м; это приводит к формированию узких зон конвергенции, неперекрывающихся на всей трассе опыта. Скорость звука в точке излучения НИС АБК равнялась примерно 1487 м/с и соответствующий этой скорости нижний горизонт заворота лучей с нулевыми углами выхода находился на глубине около 1500 м. Это и определяет резко отличающийся характер “засветки” трассы.

На рис. 5а приведены результаты измерения угловой структуры поля, зарегистрированной судном, находящимся в юго-восточной точке трассы (НИС СВ). По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат – угол прихода в вертикальной плоскости. Положительные значения углов соответствуют лучам, приходящим в точку приема сверху. Угловой спектр содержит четыре луча, в течение всей трехчасовой реализации. Причем, как это видно из рисунка, углы прихода всех лучей подвержены медленным периодическим изменениям с периодом 40 - 45 мин. Рис. 5б

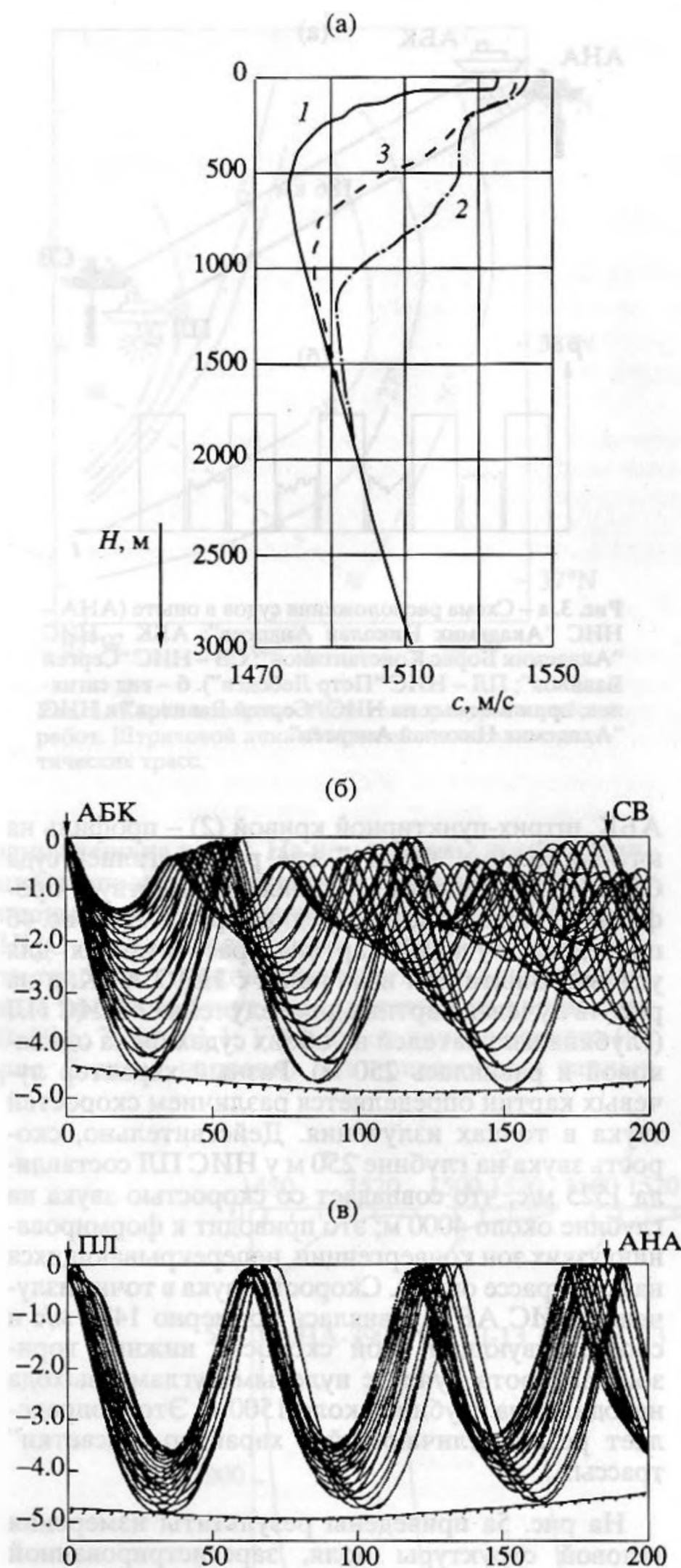


Рис. 4. а – Профили скорости звука $c(z)$ до глубины 3000 м на северо-западном (1), юго-восточном (2) концах трассы распространения звука и в середине ее (3). б – Лучевая картина при излучении на северо-западном конце трассы. в – Лучевая картина при излучении на юго-восточном конце трассы. Глубина излучения – 250 м. Стрелками отмечено положение излучающих (АБК, ПЛ) и приемных (АНА, СВ) научно-исследовательских судов.

иллюстрирует прием сигналов на северо-западном конце трассы. Угловая структура содержит всего две конгруэнции лучей.

Так как дистанция между излучающим судном одной трассы и приемным другой была минимальной и определялась лишь соображениями безопасности, то акустические трассы практически совпадали и, следовательно, количество лучей, зарегистрированных на обоих концах трасс должно быть одинаковым. Видимое уменьшение числа лучей на рис. 6а по сравнению с рис. 5а является следствием недостаточной разрешающей способности приемной системы и различием скоростей звука в точках излучения. Меньшая скорость в северо-западной точке обусловила увеличение абсолютных значений углов прихода лучей так, что они стали неразрешимы для имеющейся диаграммы направленности приемной антенны. В результате каждая конгруэнция на рис. 6а фактически состоит не из одного, а из двух лучей.

Периодическое изменение значений углов прихода на рис. 6а имеет тот же период (40 - 45 мин), что и на рис. 5а, что указывает на общую для обеих трасс природу явления. Поскольку такая периодичность соответствует частоте Брента-Вяйсяля для рассматриваемых гидрологических условий, этот эффект, по-видимому, является проявлением влияния внутренних волн, возбуждаемых в слое скачка движением водного потока. Обе экспериментально полученные структуры соответствуют в общем плане расчетным лучевым картинам.

Для оценки устойчивости угловых структур во времени были построены гистограммы флуктуаций угла прихода каждой составляющей углового спектра сигналов, принятых на обоих судах. Результаты обработки данных, полученных на юго-восточном конце трассы, дают примерно одинаковые значения флуктуаций углов прихода сигналов для всех четырех компонент углового спектра. Наименьшие флуктуации – у лучей, приходящих в точку приема снизу под большими углами скольжения – кривая 1 (рис. 5а). Среднеквадратичное отклонение для этой кривой $\sigma \approx 0.47$ град. Для лучей, приходящих под меньшими углами (кривые 2, 3, 4), эти значения несколько выше: 0.63, 0.67, 0.63 град соответственно. Наибольшее значение – 0.67 град – относится к лучу с минимальным углом прихода (кривая 3). Гистограммы флуктуаций углов прихода за время эксперимента для всех составляющих углового спектра приведены на рис. 5б, где последовательность нумерации соответствует последовательности на рис. 5а.

Угловая структура, полученная на северо-западном конце трассы, дает несколько большее значение среднеквадратичных отклонений угла прихода сигнала – 0.7 град для каждой составляющей. Соответствующие гистограммы представлены на рис. 6б. Такое увеличение значения флуктуаций может быть связано с особенностями формирования угловых спектров на разных концах

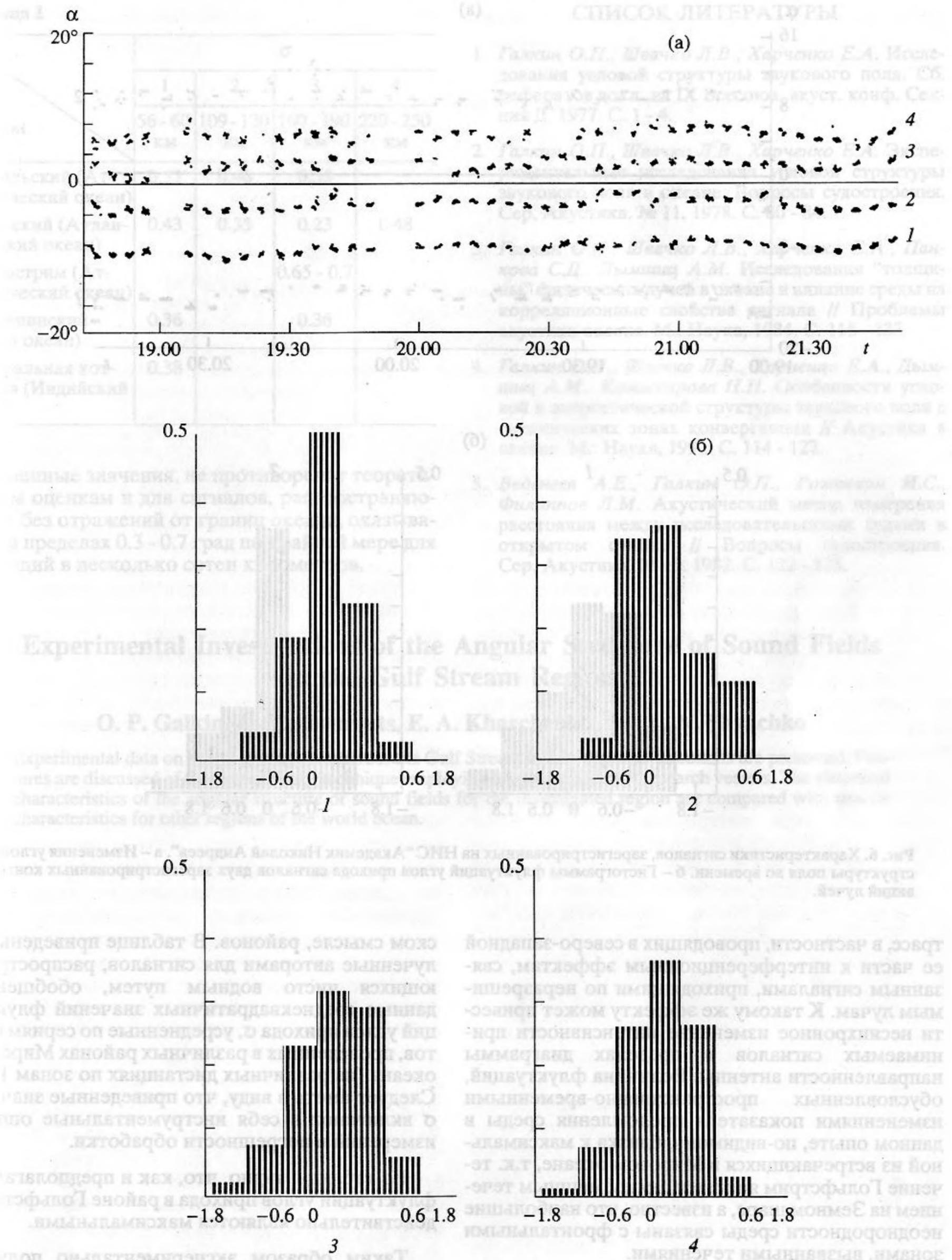


Рис. 5. Характеристики сигналов, зарегистрированных на НИС "Сергей Вавилов". а – Изменения угловой структуры поля во времени. б – Гистограммы флуктуаций углов прихода сигналов для четырех зарегистрированных конгруэнтных лучей.

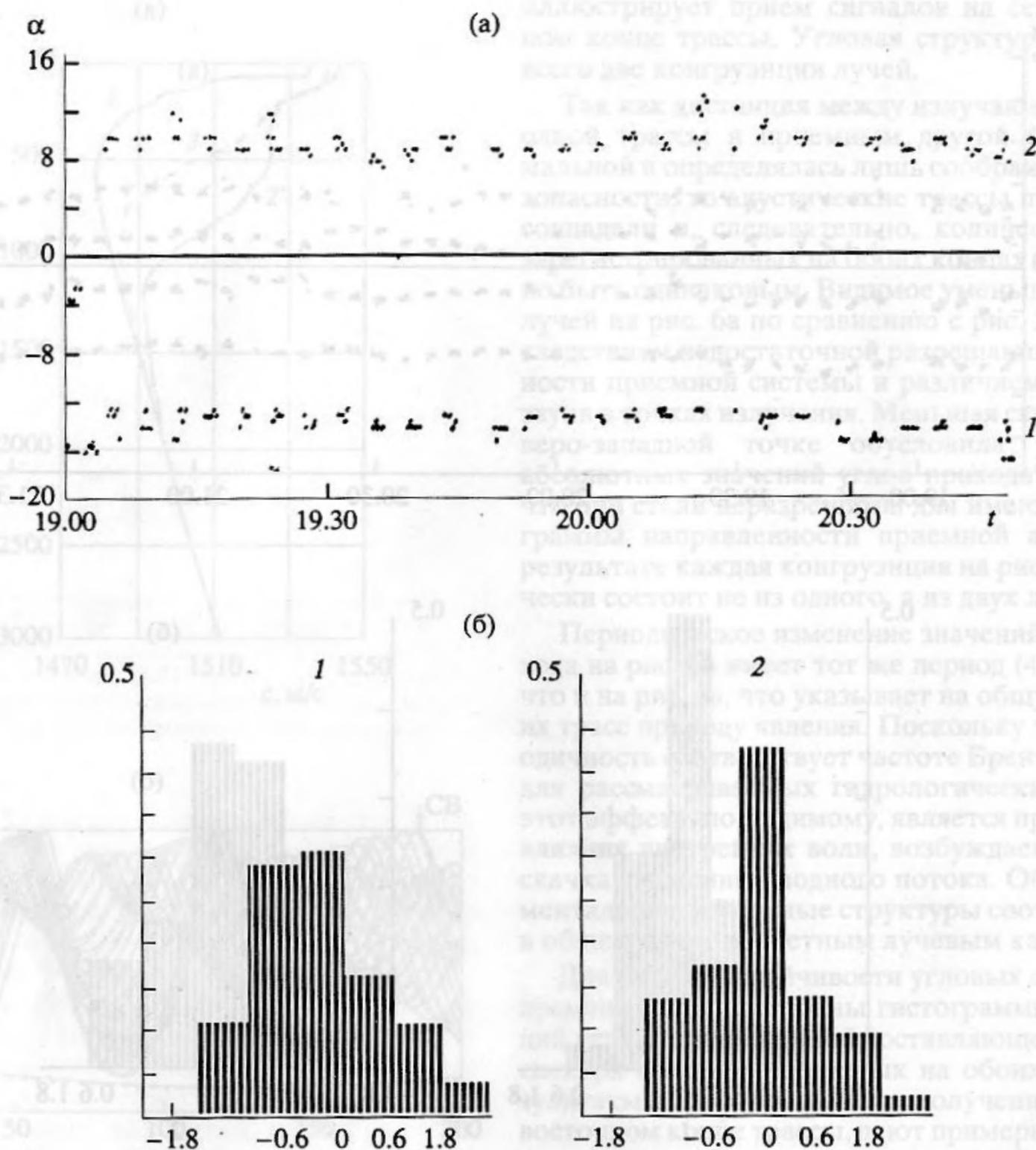


Рис. 6. Характеристики сигналов, зарегистрированных на НИС "Академик Николай Андреев". а – Изменения угловой структуры поля во времени. б – Гистограммы флуктуаций углов прихода сигналов двух зарегистрированных конгруэнций лучей.

трасс, в частности, проводящих в северо-западной ее части к интерференционным эффектам, связанным сигналами, приходящими по неразрешимым лучам. К такому же эффекту может привести несинхронное изменение интенсивности принимаемых сигналов в пределах диаграммы направленности антенны. Величина флуктуаций, обусловленных пространственно-временными изменениями показателя преломления среды в данном опыте, по-видимому, близка к максимальной из встречающихся в Мировом океане, т.к. течение Гольфстрим является самым мощным течением на Земном шаре, а известно, что наибольшие неоднородности среды связаны с фронтальными зонами, вызванными течениями.

Представляет определенный интерес сравнить приведенные результаты с имеющимися данными для других, более стабильных в океанологиче-

ском смысле, районов. В таблице приведены полученные авторами для сигналов, распространяющихся чисто водным путем, обобщенные данные среднеквадратичных значений флуктуаций углов прихода σ , усредненные по сериям опытов, проведенных в различных районах Мирового океана (на различных дистанциях по зонам 1 - 4). Следует иметь в виду, что приведенные значения σ включают в себя инструментальные ошибки измерений и погрешности обработки.

Из таблицы видно, что, как и предполагалось, флуктуации углов прихода в районе Гольфстрима действительно являются максимальными.

Таким образом экспериментально полученные величины среднеквадратичных отклонений углов прихода сигналов, даже с учетом инструментальных ошибок и, следовательно, дающие

Таблица 1

Район	σ			
	1	2	3	4
	56 - 60 км	109 - 120 км	160 - 190 км	220 - 250 км
Бразильский (Атлантический океан)	0.53	0.46	0.55	
Канарский (Атлантический океан)	0.43	0.35	0.23	0.48
Гольфстрим (Атлантический океан)			0.65 - 0.7	
Филиппинский (Тихий океан)	0.36		0.36	
Центральная котловина (Индийский океан)	0.38			

завышенные значения, не противоречат теоретическим оценкам и для сигналов, распространяющихся без отражений от границ океана, оказываются в пределах 0.3 - 0.7 град по крайней мере для дистанций в несколько сотен километров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А. Исследования угловой структуры звукового поля. Сб. рефератов докл. на IX Всесоюз. акуст. конф. Секция Д. 1977. С. 1 - 4.
2. Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А. Экспериментальные исследования угловой структуры звукового поля в океане. Вопросы судостроения. Сер. Акустика. № 11. 1978. С. 80 - 84.
3. Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А., Панкова С.Д., Дымшиц А.М. Исследования "толщины" физических лучей в океане и влияние среды на корреляционные свойства сигнала // Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 118 - 133.
4. Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А., Дымшиц А.М., Комиссарова Н.Н. Особенности угловой и энергетической структуры звукового поля в океанических зонах конвергенции // Акустика в океане. М.: Наука, 1992. С. 114 - 127.
5. Веденев А.Е., Галкин О.П., Рогожкин И.С., Филиппов Л.М. Акустический метод измерения расстояния между исследовательскими судами в открытом океане // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. № 15. 1982. С. 122 - 125.

Experimental Investigations of the Angular Structure of Sound Fields in the Gulf Stream Region

O. P. Galkin, A. M. Dymshits, E. A. Kharchenko, and L. V. Shvachko

Experimental data on sound propagation across the Gulf Stream in two opposite directions are presented. Features are discussed of the experimental technique employing unique facilities of research vessels. The statistical characteristics of the angular structure of sound fields for the investigated region are compared with similar characteristics for other regions of the world ocean.