АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXX 1984 Вып. 5

УДК 534.44

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МЕЛКОГО МОРЯ НА СТАЦИОНАРНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ТРАССЕ

Бункин Ф. В., Вавилин А. В., Журавлев В. А., Кравцов Ю. А., Любченко А. Ю., Омельченко Н. Н., Петников В. Г., Худиев Л. Т., Шмелев А. Ю.

Описаны предварительные результаты низкочастотного акустического зондирования океана на стационарной трассе протяженностью в несколько десятков километров в мелком море. Показано, что уширение спектра сигнала от низкочастотного тонального источника не превышало $1{,}0\cdot10^{-3}$ Гц. Обнаружены вариации фазового фронта звуковой волны в горизонтальной плоскости, достигающие 0,5°. Измерен спектр огибающей сигнала, в котором выявлены составляющие с периодами 24, 12, 8 и 6 ч, а также широкий набор спектральных компонент с периодами от нескольких минут до нескольких часов.

Акустическое зондирование океана на дистанции в несколько десятков или сотен километров является одним из немногих методов, позволяющих изучать пространственно-временную изменчивость океана как канала передачи информации. Исследования на стационарной акустической трассе, т. е. при неподвижно закрепленных излучателе и приемнике звука, позволяют исключить влияние пространственных вариаций звукового поля. Ранее подобные исследования проводились преимущественно в глубоком океане (см. литературу, цитированную в книгах [1, 2]), тогда как пространственно-временная изменчивость мелкого моря и связанные с ней специфические вариации акустического поля изучены в меньшей степени (см. работы [3, 4]). В данной статье изложены предварительные результаты, полученные на первой в СССР протяженной стационарной акустической трассе (первые сообщения об организации трассы были даны в докладе [5]).

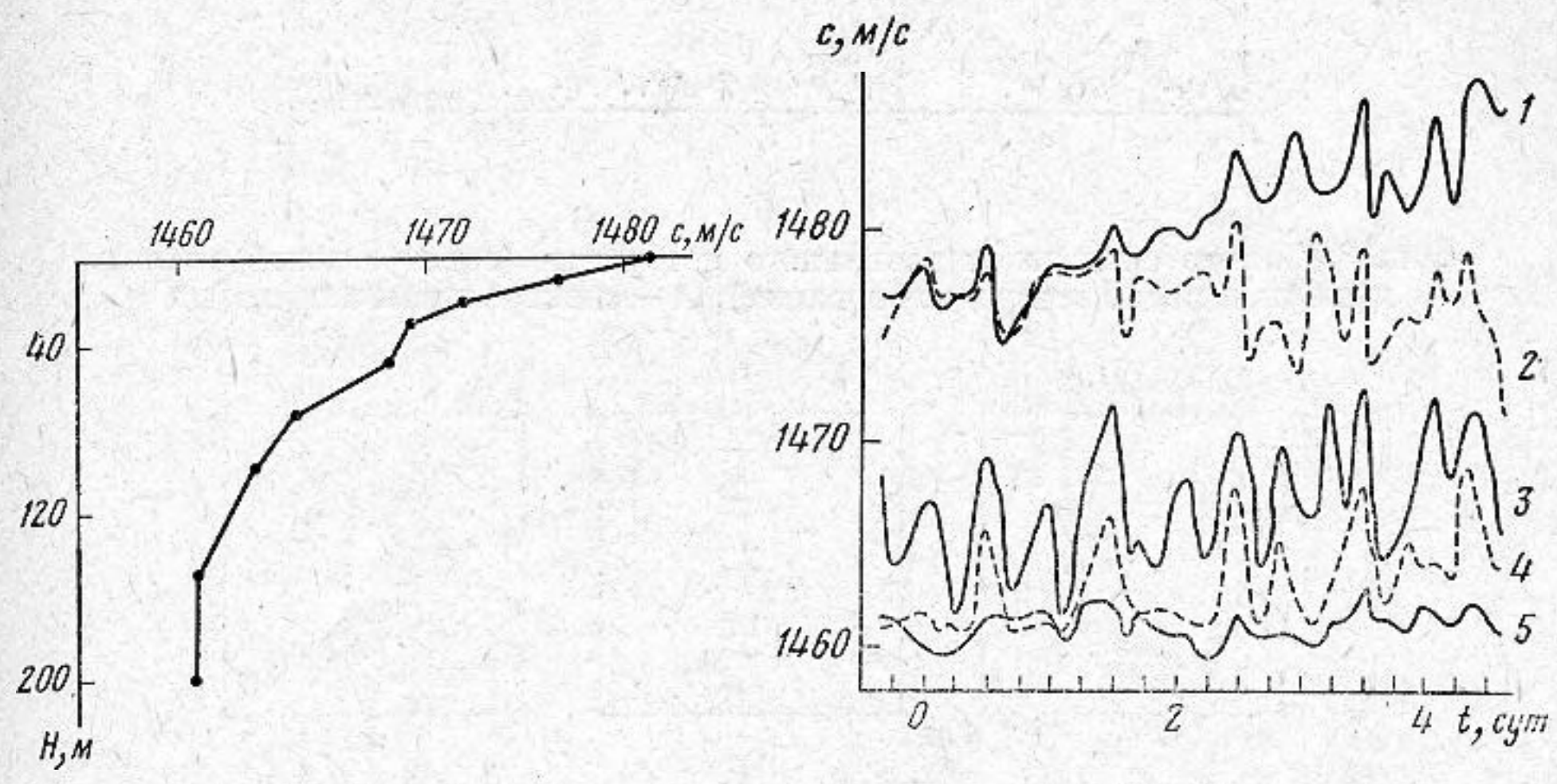
Стационарная акустическая трасса была организована в мелком море в 1982 г. Глубина моря по трассе составляла несколько сотен метров. Излучающая система состояла из двух электромагнитных излучателей с резонансными частотами в несколько сотен Герц. Рама с излучателями опускалась с борта растянутого на двух якорях корабля и устанавливалась на дно. Положение рамы фиксировалось с помощью якоря и плавучести.

Во время экспериментов производилось излучение одновременно двух тональных сигналов с продолжительностью посылок 1200 с, разделенных паузами в 20 с. Опорный кварцевый генератор и специальные устройства управления режимом излучения обеспечивали стабильность частот излучаемых сигналов не хуже чем $2\cdot10^{-8}$ за сутки. Использованная аппаратура позволяла сохранить фазу сигналов от посылки к посылке. В ходе эксперимента акустические сигналы излучались в течение 130 ч. Постоянный контроль уровня сигнала в точке излучения не выявил сколь-нибудь заметных вариаций его амплитуды. Контроль за изменением профиля скорости звука осуществлялся в процессе гидрологических измерений в семи точках, расположенных равномерно вдоль всей трассы. Гидрологические измерения производились в среднем каждые 3 ч и сводились к вертикальным промерам распределения температуры в слое 0—200 м с помощью батитермографа, а также к определению скорости ветра и силы поверхностного волнения.

Типичный профиль скорости звука в волноводе, рассчитанный на ос-

нове батитермограммы, приведен на фиг. 1. Такой профиль отвечает придонному распространению звука. На фиг. 2 приведены зависимости скорости звука от времени для разных горизонтов — 0, 20, 50, 100 и 200 м. На большинстве кривых явно заметны двенадцатичасовые вариации скорости звука, связанные с приливами.

Прием тональных сигналов осуществлялся на антенну, представляющую собой линейную цепочку из эквидистантно расположенных гидрофонов, лежащую на морском дне. Цепочка гидрофонов была вытянута почти перпендикулярно направлению распространения акустических волн. Ее протяженность составляла 20λ, где λ — минимальная длина волны принимаемых сигналов. Расстояние между антенной и излучателем было око-



Фиг. 1 Фиг. 2

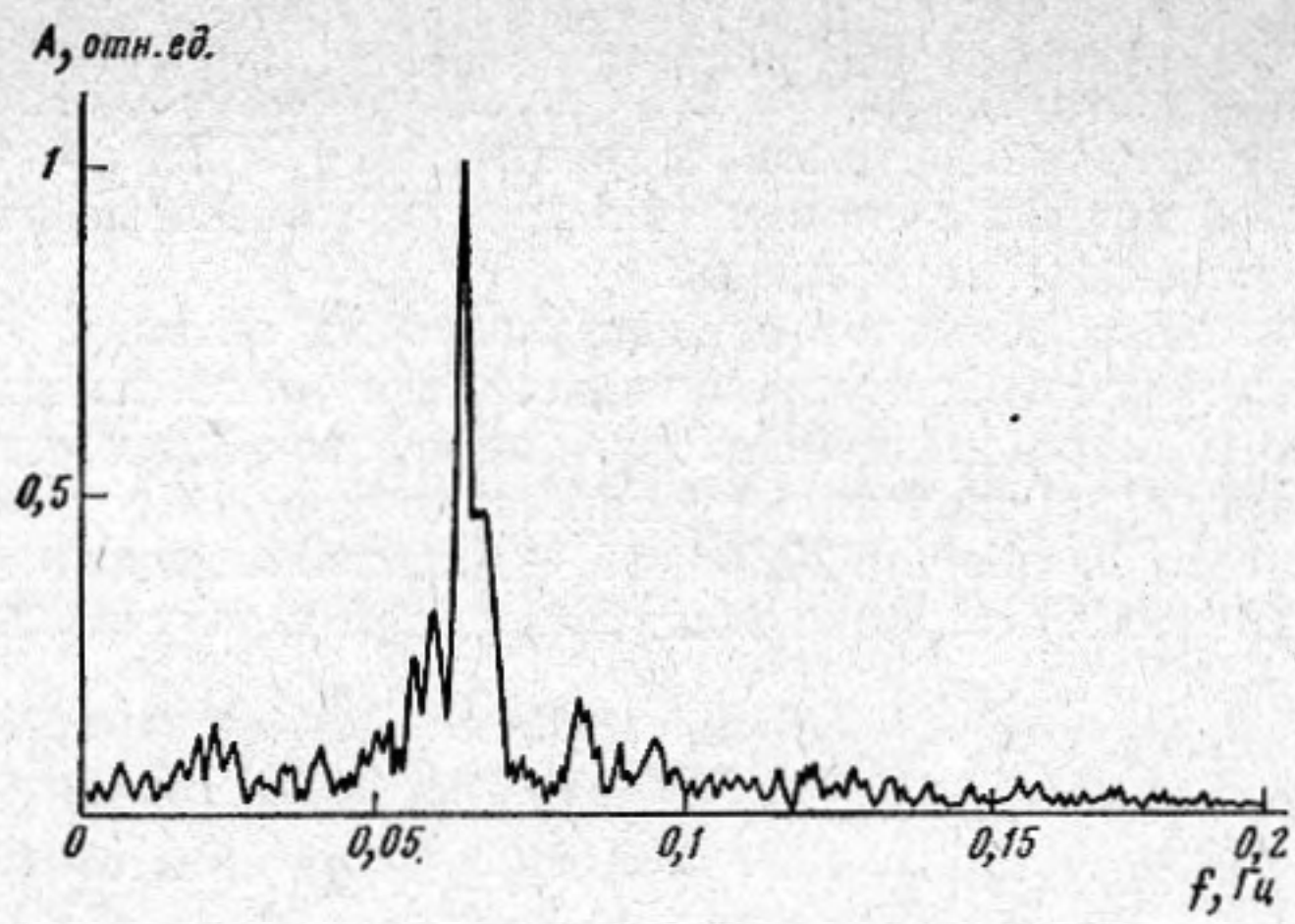
Фиг. 1. Типичный профиль скорости звука на стационарной трассе

Фиг. 2. Зависимость скорости звука от времени на разных глубинах. *1* — $z=0$ м; *2* — $z=20$; *3* — $z=50$; *4* — $z=100$; *5* — $z=200$ м

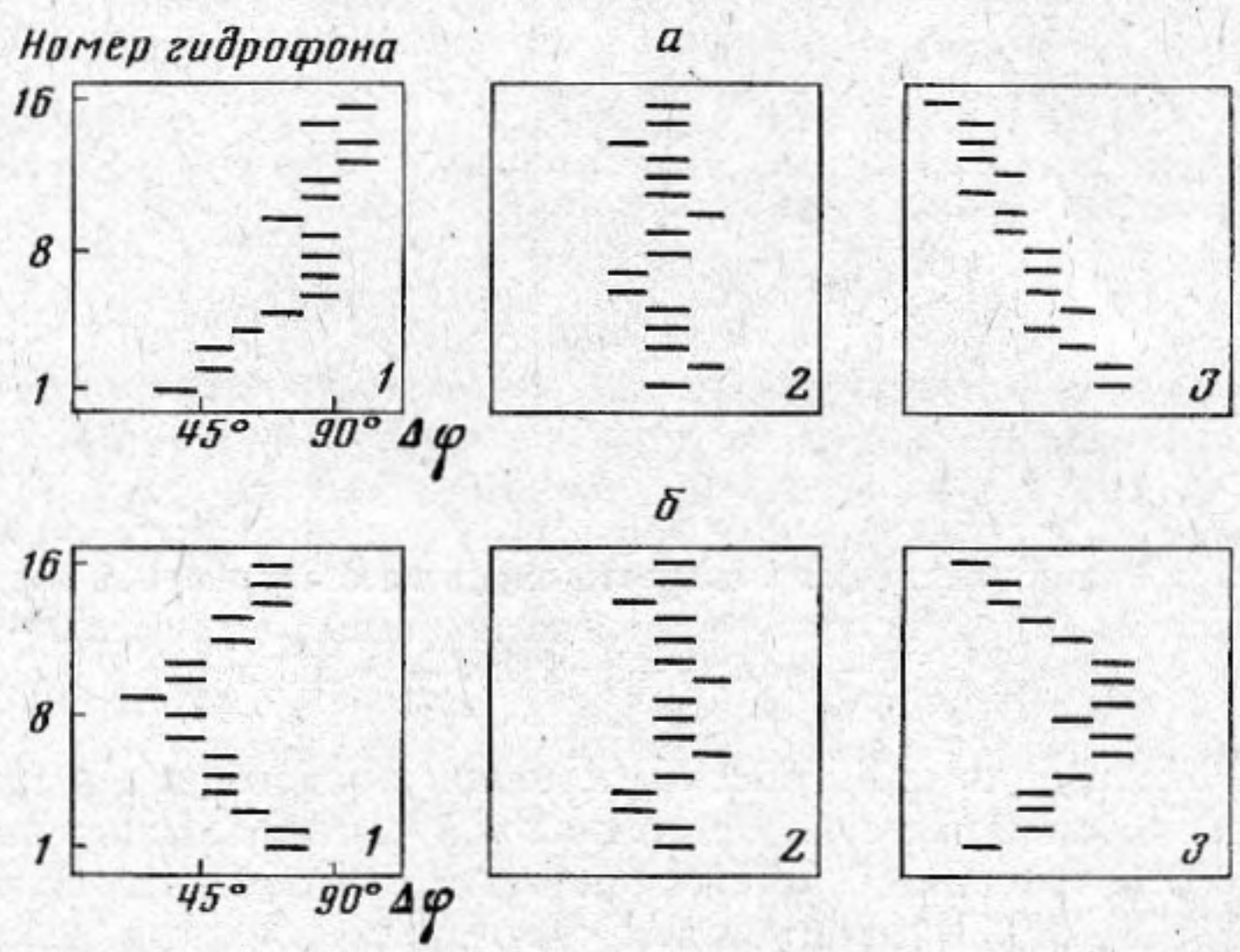
ло 70 км. Регистрация и обработка сигналов производилась параллельно при помощи восьмиканальной измерительной системы, описанной в работе [6], с использованием многоканальных аналоговых магнитофонов НО-48 и TEACR-260. Измерительная система позволяла в реальном масштабе времени проводить спектральный анализ гидроакустических сигналов, а также записывать обработанные сигналы в цифровом виде на магнитофон. Кроме того, осуществлялась регистрация огибающей сигналов в аналоговом виде на ленту самописца. Входные сигналы гетеродинировались на несущую частоту $\simeq 0{,}1$ Гц и подавались на анализатор спектра СК4-72 с внешним генератором тактовых импульсов. При полосе частотного анализа 0,2 Гц спектральное разрешение достигало 0,001 Гц.

Для визуализации и измерения флуктуаций фазового фронта звуковых волн при их распространении в океане использовалось многоканальное устройство коррекции фазовых искажений (МУКФИ). На каждой строке матричного экрана этого устройства в виде светящейся черточки отображается информация о разности фаз между опорным сигналом и сигналом, принимаемым одиночным гидрофоном. Точность определения величины $\Delta\varphi$ равна $\pm 6^\circ$ в пределах изменения фазы от 0 до 2π. Устройство позволяет также принудительно изменять разности фаз между каналами в интервале от 0 до 2π и осуществлять синфазное сложение сигналов с отдельных гидрофонов. В этом случае светящиеся черточки на экране образуют вертикальную прямую линию. Флуктуации фазового фронта звуковых волн при распространении через океан приводят к наклонам наблюдаемой линии или к ее деформациям.

Результаты измерений на стационарной трассе отражены на фиг. 3—7. На фиг. 3 приведен пример единичной реализации спектра принятого сигнала, полученный в реальном масштабе времени по отрезку записи длиной 1000 с.



Фиг. 3. Спектр сигнала от тонального источника (спектральный анализ выполнен после гетеродинирования), A – спектральная амплитуда



Фиг. 4. *а*, *б* – типичные конфигурации фазовой картины на экране МУКФИ, где изображены информационные части экрана в увеличенном масштабе в разные моменты времени. Цифрами отмечены последовательные реализации через интервалы времени ≃10–20 мин

Для получения максимального частотного разрешения использовалось прямоугольное окно спектрального анализа. Разрешение в этом случае достигало ≃0,001 Гц. Ширина спектра оценивалась по уровню $1/\sqrt{2}\simeq0{,}71$. В течение всего времени измерений на стационарной трассе заметное уширение спектра, превышающее 0,001 Гц, не наблюдалось. (Отметим, что в экспериментах с дрейфующим кораблем при той же методике измерений усредненное значение уширения спектра составляет 0,005 Гц [7].) Измеренное уширение ≃0,001 Гц согласуется с наблюдавшимися типичными временами феддинга 10–20 мин.

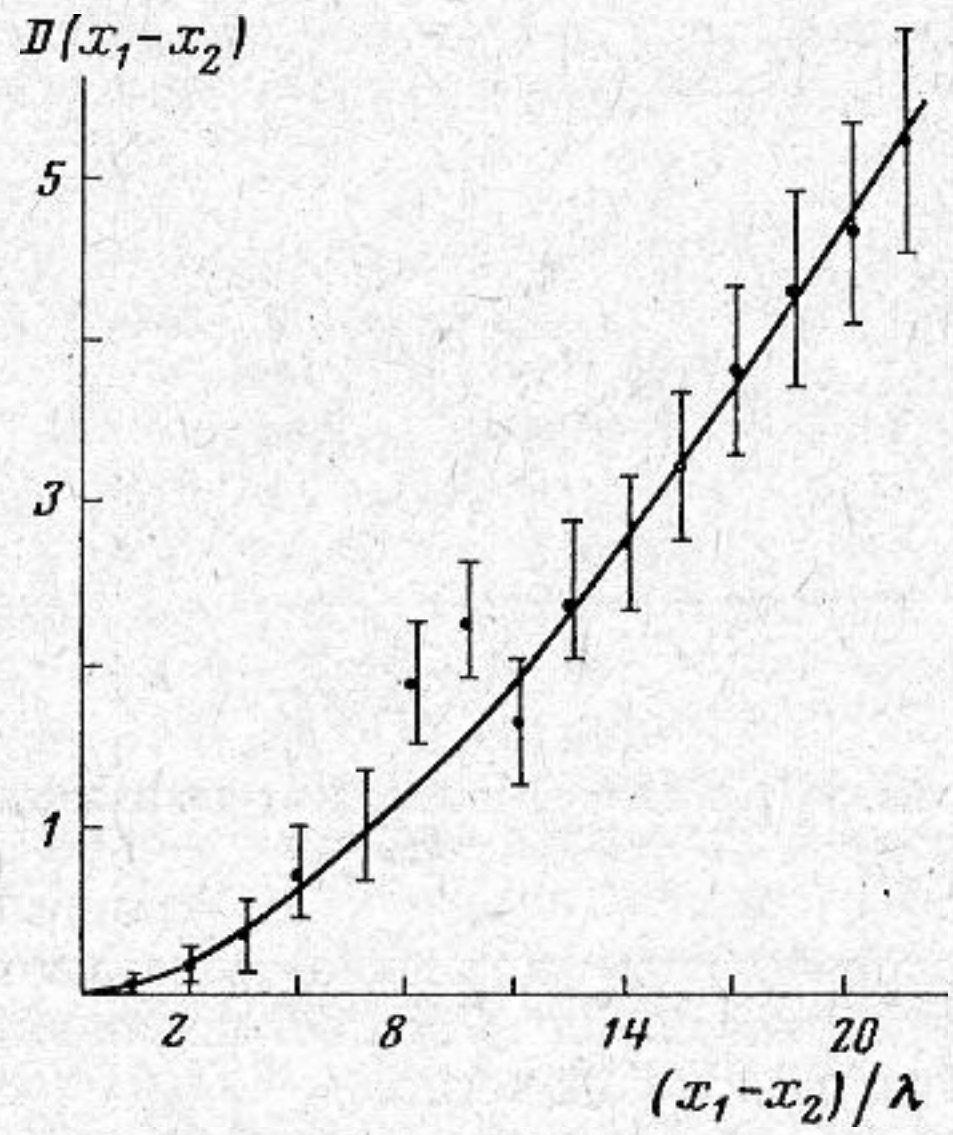
На фиг. 4, *а*, *б* приведены типичные конфигурации фазовой картины на экране МУКФИ для тонального сигнала с частотой около 300 Гц. Номер строки на каждом кадре соответствует номеру гидрофона в антенне. В начальный момент времени все сигналы с одиночных гидрофонов были сфазированы, так что все фазовые отметки выстраивались по вертикали. Цифрами на фигуре отмечены последовательные реализации через интервалы порядка 10–20 мин. Линейные фазовые искажения типа изображенных на фиг. 4, *а* наблюдались гораздо чаще, чем искажения серповидной формы, показанные на фиг. 4, *б*. Максимальный фазовый сдвиг между край-

ними гидрофонами достигал ±60°. Этот сдвиг соответствует повороту фазового фронта в горизонтальной плоскости на ±0,5°.

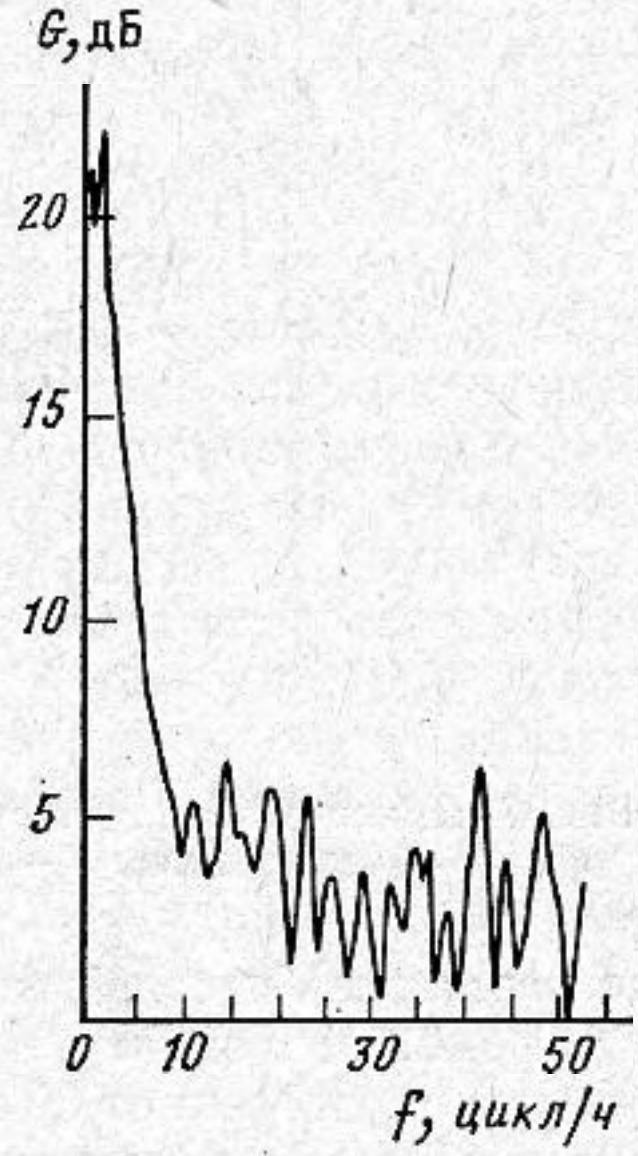
По результатам выборочных измерений разности фаз, проводимых с помощью МУКФИ в течение 2,5 ч, была построена структурная функция фазы (фиг. 5): $D(x_1-x_2)=\langle|[\varphi(x_1)-\varphi(x_2)]|^2\rangle$, где x_1 и x_2 — координаты гидрофонов, а $\varphi(x)$ — значения фазы сигнала на отдельных гидрофонах.

Начальный участок зависимости $D(x)$ хорошо аппроксимируется функцией вида $D(x)\sim x^2$, а вся кривая: $D(x)\sim x^{4/3}$. На базе длиной 20λ насыщений еще не наблюдалось.

Искривление фазового фронта свидетельствует о наличии в океане локализованных по горизонтали неоднородностей, меняющихся со временем.



Фиг. 5. График зависимости структурной функции фазы сигнала от разнесения гидрофонов



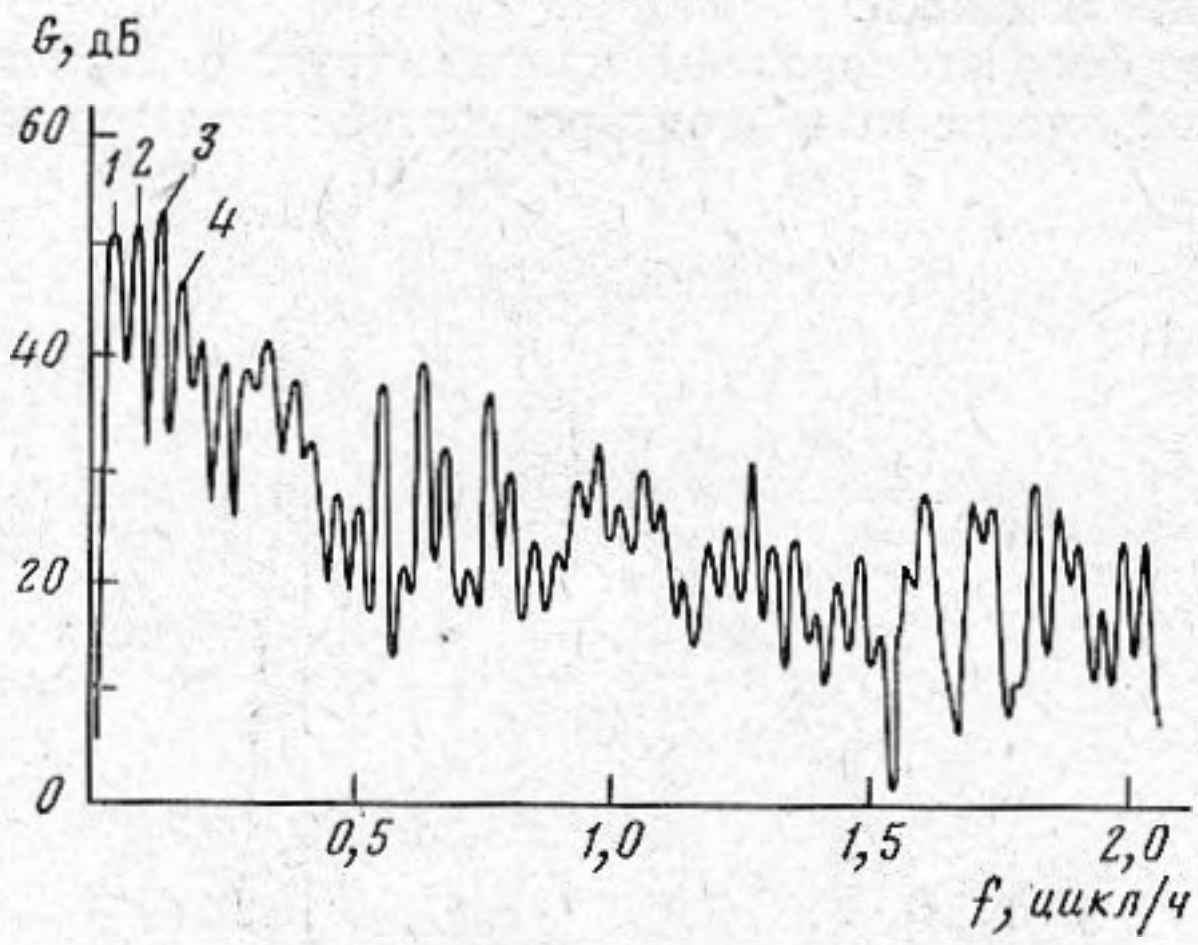
Фиг. 6. Спектр огибающей сигнала от тонального источника

Вопрос о природе этих неоднородностей (внутренние волны, мезомасштабная турбулентность, отдельные вихри и т. д.) требует дополнительного анализа.

Из рассмотрения временных вариаций акустических сигналов следует, что амплитуда звуковой волны, записываемая на ленте самописца, и кривизна ее фазового фронта, индицируемая на экране МУКФИ, практически не меняются за времена порядка 10—20 мин. Об отсутствии быстрых флуктуаций сигналов свидетельствует и форма спектральной линии (фиг. 3).

На фиг. 6 и 7 представлены спектры огибающей принимаемого сигнала. Спектр на фиг. 6, относящийся к диапазону частот 0—50 цикл/ч, был получен в результате усреднения 50 спектров с частотным разрешением по уровню 0,71, равным 10^{-4} Гц $\simeq$0,4 цикл/ч. Каждый из этих спектров представлял собой результат произведенного в лабораторных условиях на ЭВМ быстрого преобразования Фурье отрезка временной реализации длительностью 2,5 ч. Перед обработкой на ЭВМ из огибающей сигнала отфильтровывались низкочастотные составляющие с периодами, превышающими длину анализируемых отрезков. Спектр флуктуаций в основном сосредоточен на частотах ниже 10^{-3} Гц $\approx$ 3 цикл/ч, что согласуется с характерными временами изменения параметров сигнала (1000 с) и с уширением спектра принятого сигнала ($\simeq 10^{-3}$ с). Отмечено сосредоточение спектра на частотах ниже 3 цикл/ч, характерное, как известно, и для глубоких морей (см. [1, 2]). Отсюда, однако, преждевременно еще делать вывод, что основной причиной флуктуаций амплитуды в мелких морях являются внутренние волны, ответственные, как принято считать, за флуктуации в глубоком океане.

Анализ низкочастотной области ($f<2$ цикл/ч) можно провести при помощи спектра огибающей сигнала с частотным разрешением $3\cdot10^{-6}$ Гц$\simeq$ $\simeq10^{-2}$ цикл/ч по уровню 0,71 (см. фиг. 7). Спектр получен быстрым преобразованием Фурье отрезка временной реализации длительностью 180 ч с последующим трехкратным сглаживанием спектральной плотности по частоте с использованием трехточечного окна с весами 0,25; 0,5; 0,25. В спектре флуктуаций заметно выделяются составляющие, отвечающие периодам 24, 12, 8 и 6 ч (суточные, полусуточные, 1/3 суточные и 1/4 суточные вариации) и связанные скорее всего с приливно-отливными явлениями. Кроме того, спектр, приведенный на фиг. 7, имеет широкий набор компонент с периодами от 30 мин до нескольких часов.



Фиг. 7. Низкочастотная часть спектра огибающей сигнала от тонального источника. *1* – 1 сут; *2* – 1/2; *3* – 1/3; *4* – 1/4 сут

Таким образом, акустическое зондирование на стационарной трассе выявило характерные временные и пространственные масштабы вариаций акустического поля в мелком море. Следующая задача — выбор моделей изменчивости океана, отвечающих данным приведенного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распространение звука во флуктуирующем океане./Под ред. Флатте С. М.: Мир, 1982.
2. Акустика океана/Под ред. Санто Дж. М.: Мир, 1982.
3. *Weston D. E., Stevens K. J., Revie J., Pengelly M.* Multiple frequency studies of sound fluctuations in shallow water.– J. Sound and Vibr., 1971, v. 18, № 4, p. 487–497.
4. *Essen H. H., Schirmer F., Siebert J.* Propagation rauges of acoustis continuous wave (cw) signals in the fladenground area of the North Sea.– Acustica, 1980, v. 47, № 1, p. 10–15.
5. *Афраилов М. А., Бункин Ф. В., Быстров В. П. и др.* Эксперименты по исследованию пространственно-временной изменчивости мелкого моря на стационарных акустических трассах.– X Всесоюзн. Акуст. конф. М.: АКИН, 1983, секция Д, с. 52–54.
6. *Быстров В. П., Вавилин А. В., Капустин А. П. и др.* Многоканальная измерительная система для акустического зондирования океана.– ПТЭ, 1983, № 5, с. 37–39.
7. *Бункин Ф. В., Быстров В. П., Вавилин А. В. и др.* Энергетические и спектральные характеристики инфразвуковых сигналов в мелком море.– X Всесоюз. Акуст. конф. М.: АКИН, 1983, секция Д, с. 48–51.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12.V.1983