АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 39 1993 Вып. 4

УДК 551.463.2

© 1993 г. И. Б. Андреева, В. Н. Луповский

БИСТАТИЧЕСКАЯ МОРСКАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ ВБЛИЗИ МАТЕРИКОВОГО СКЛОНА

Проведено экспериментальное исследование реверберации на частотах в сотни герц с помощью приемника, установленного у дна на границе шельфа и материкового склона и источника, спускаемого с удаленного дрейфующего судна. Нижняя граница звукового канала соответствовала сотням метров и распространение шло с многими отражениями от поверхности. Показано, что даже при сильном ветре основным источником реверберации было рассеяние звука на поднятиях дна, достигавших канала. Частотный спектр такой донной ревербации оказался в 2—6 раз шире спектра прямого сигнала, пришедшего от удаленного источника. Рассмотрено несколько возможных механизмов расширения спектра, но ни один из них не дал убедительного объяснения наблюдавшихся величин.

В прибрежном районе океана была проведена серия акустических экспериментов с целью изучения физической природы и особенностей подводной реверберации. Приемник звука устанавливался неподвижно у дна шельфовой зоны при выходе из берегового клина; он был либо ненаправленным, либо имел слабовыраженную направленность, что не сказывалось заметно на результатах экспериментов. На первом этапе в качестве источника звука использовались подводные взрывы, на втором — ненаправленные тонально-импульсные излучатели. Источник всегда был связан с судном, удаленным от приемника и находившимся в глубоководной части акватории. Все исследования были проведены на частотах в сотни герц.

Наклон дна шельфовой зоны был менее 1°; на разных участках она простиралась на ~10—50 км от берега, а ее предельная глубина ограничивалась изобатой ~200 м. Наиболее крутая часть материкового склона соответствовала глубинам 500—800 м, где даже средняя крутизна местами достигала десятков градусов. Глубже дно снова становилось более пологим, но глубина его все же достаточно быстро доходила до нескольких километров. Наиболее крутая часть склона была сильно изрезана и в основном формировалась скалистыми выходами, где осадки удерживались только в «карманах». Остальная часть дна акватории была покрыта слоем осадков терригенного происхождения.

Гидрологические условия зимой определяли приповерхностный, а летом неглубокий подповерхностный звуковые каналы. Излучение и прием, как правило, были только несколько ниже оси канала и звук распространялся с отражениями от поверхности. Зондирующие посылки ненаправленного источника падали на поверхность, дно мелководной и глубоководной частей акватории и пронизывали толщу воды. Однако положение точки приема вблизи дна, особенности профилей скорости звука и рельефа ограничивали область, где мог формироваться реверберационный сигнал, приходящий к приемнику. Если приемник находился за бровкой шельфа в начале материкового склона (точка А), то к нему могли прийти сигналы, рассеянные поверхностью, дном, вплоть до глубин 700 — 800 м и слоем воды до соответствующих глубин. Если приемник отодвигался на несколько км вглубь шельфа (точка Б), то материковый склон оказывался в тени относительно приемника, начиная с глубин, примерно 300 м. Звуковые сигналы, переизлучаемые на глубинах больше ~1000 м, не достигали ни точки А, ни точки Б.

При каждом положении судна с определенными интервалами излучалось

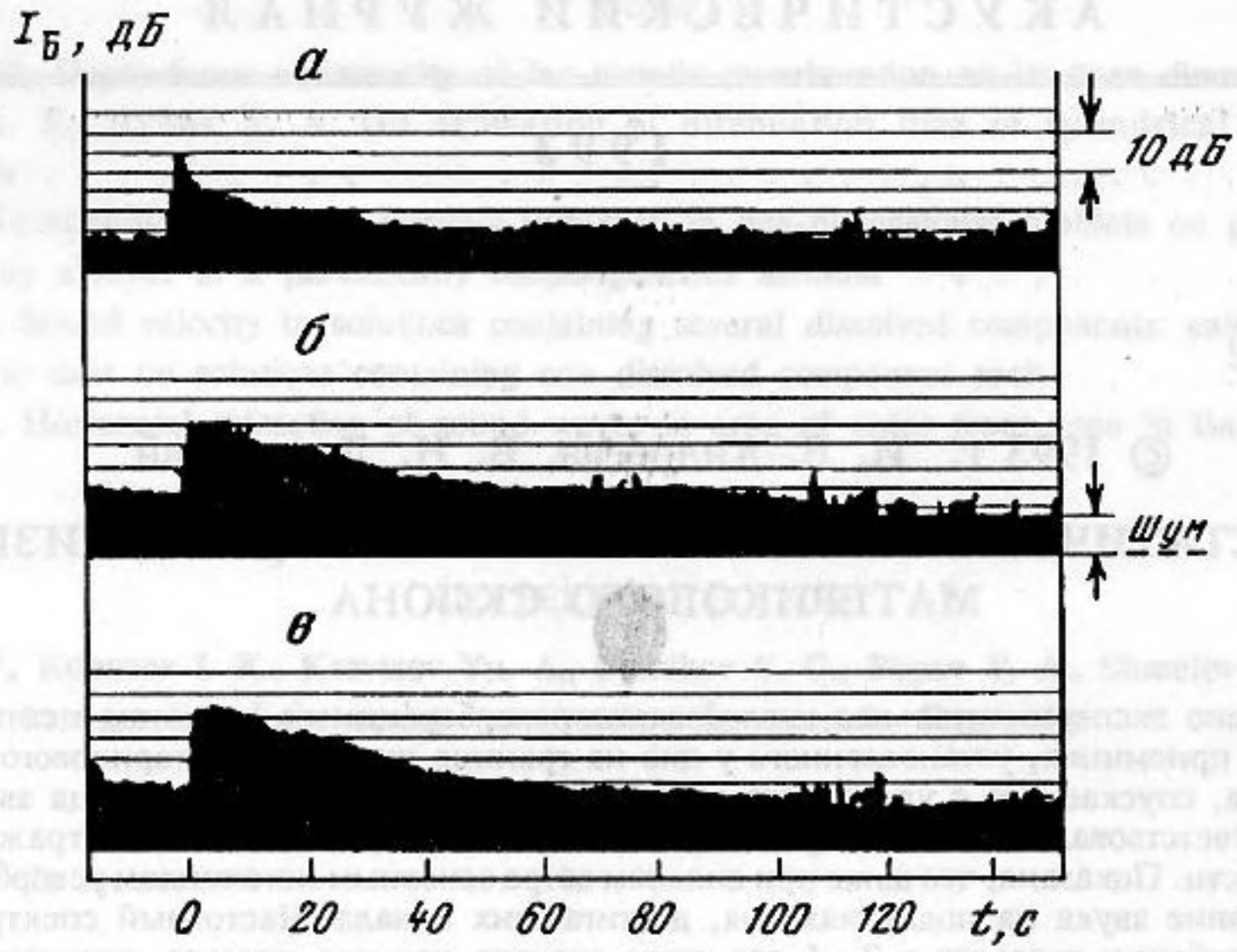

Рис. 1. Характерная запись огибающей реверберации в точке Б. Источник звука — подводный взрыв на расстоянии ~70 км. Центральные частоты обработки: *а* — 400 Гц, *б* — 620 Гц, *в* — 1000 Гц

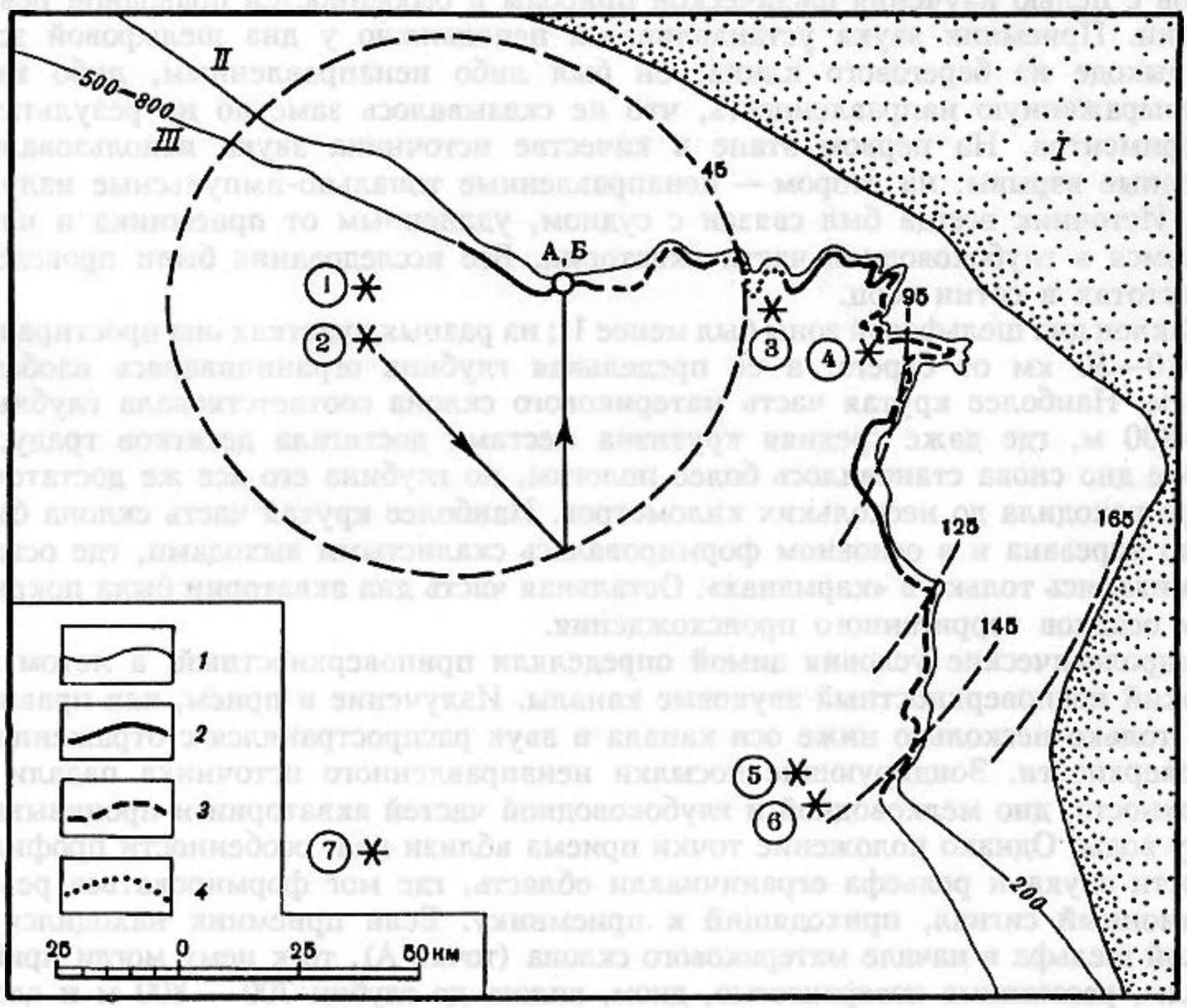

Рис. 2. Схемы карты района работ. Цифры в кружках — положения точек излучения; А, Б — положения приемника. *I* — суша. *II* — изобата 200 м. *III* — крутая часть склона; ее наклоны: *1* — меньше 10°, *2* — 10—20°, *3* — 20—30°, *4* — больше 30°. Штриховые линии — эллипс рассеяния и его участки в разные моменты времени (указаны рядом в с)

несколько зондирующих посылок. Сигналы реверберации при взрывном источнике обрабатывались в нескольких частотных полосах, шириной в 1/3 октавы. Длина тонально-импульсных посылок изменялась от единиц до десятков секунд, частота их заполнения стабилизировалась кварцем, а обработка реверберации велась в узкой полосе шириной в несколько герц. В этих экспериментах одновременно записывался на магнитографе и опорный сигнал кварцевого генератора.

Первой задачей, которую мы стремились решить, было определение местоположения и физической природы рассеивателей, порождавших реверберацию в указанных точках приема.

На первом этапе исследования (взрывы) приемник находился в точке Б, в шельфовой зоне, в нескольких километрах от ее бровки. Взрывы производились более чем в 40 точках в разных частях акватории на расстояниях от 5 до 130 км от приемника. В каждой точке выполнялась серия 5 взрывов с интервалами в 1 мин. На рис. 1 приведены характерные записи реверберации, $I_Б(t)$; момент $t = 0$ соответствует приходу к приемнику прямого сигнала от точки взрыва. На рисунке приведен последний взрыв серии, так как за 1 мин реверберация не успевала затухнуть (см. левую часть записи). Для всех полученных в опытах кривых $I_Б(t)$ независимо от места подрыва характерна монотонность спада; его скорость зависела от частоты и места подрыва.

Для решения поставленной задачи скорость спада реверберации использовалась в качестве критерия местоположения рассеивателей. Были построены две расчетные модели, различающиеся положением рассеивателей. В них закладывалась схема карты района, на которой отмечались положения точек излучения и приема, линия берега и линия изобаты 200 м (бровка шельфовой зоны). На трассах распространения звука вводились данные о рельефе дна и профиле скорости звука и далее задача решалась в рамках цилиндрической симметрии. Делалось общепринятое предположение о том, что в каждый момент времени сигнал реверберации формируется откликами рассеивателей, находящихся в пределах узкого эллиптического кольца, разбегающегося по акватории относительно фокусов — точек излучения и приема. В первой модели предполагалось, что рассеивает взволнованная водная поверхность и рассеиватели распределены по ней равномерно. Во второй — рассеиватели считались донными и вводилось упрощающее предположение, что их основная часть сосредоточена на узкой полосе вдоль изобаты 200 м: на бо́льшей глубине дно оставалось в тени относительно приемника, а сигналы, рассеянные на мелководье, ближе к берегу ослаблены многократными отражениями «дно — поверхность».

Рассчитанные на ЭВМ по этим моделям скорости спада реверберации сопоставлялись со всей совокупностью экспериментальных данных при центральных частотах обработки 400 и 620 Гц, и всех точках подрыва зарядов. Первая модель показала себя неудовлетворительной — экспериментальные уровни спадали значительно быстрее. Вторая модель дала хорошее согласие с экспериментом и во всех условиях максимальное расхождение уровней, даже к концу записи, не превышало 1 дБ. Этот результат можно считать доказательством доминирующей роли рассеяния на поднятиях дна, попадающих в зону формирования реверберации. Незначительность роли поверхности, кроме того, подтверждается практической независимостью уровня реверберации от погодных условий: в ходе измерений скорость ветра изменялась от 1—2 до 15—16 м/с.

На втором этапе эксперимента излучались тонально-импульсные посылки и приемник был выдвинут в точку А, в начало материкового склона. Картина спада реверберации резко изменилась, на нем появились четко выраженные локальные максимумы, время задержки, число и величина которых зависели от положения излучателя на акватории. При неизменной (или близкой) точке излучения структура кривой реверберации $I_А(t)$ сохранялась не только от посылки к посылке, но и от сезона к сезону. Приближенное сопоставление абсолютных уровней кривых $I_А(t)$ и $I_Б(t)$ (с учетом различий в уровнях мощности источников,

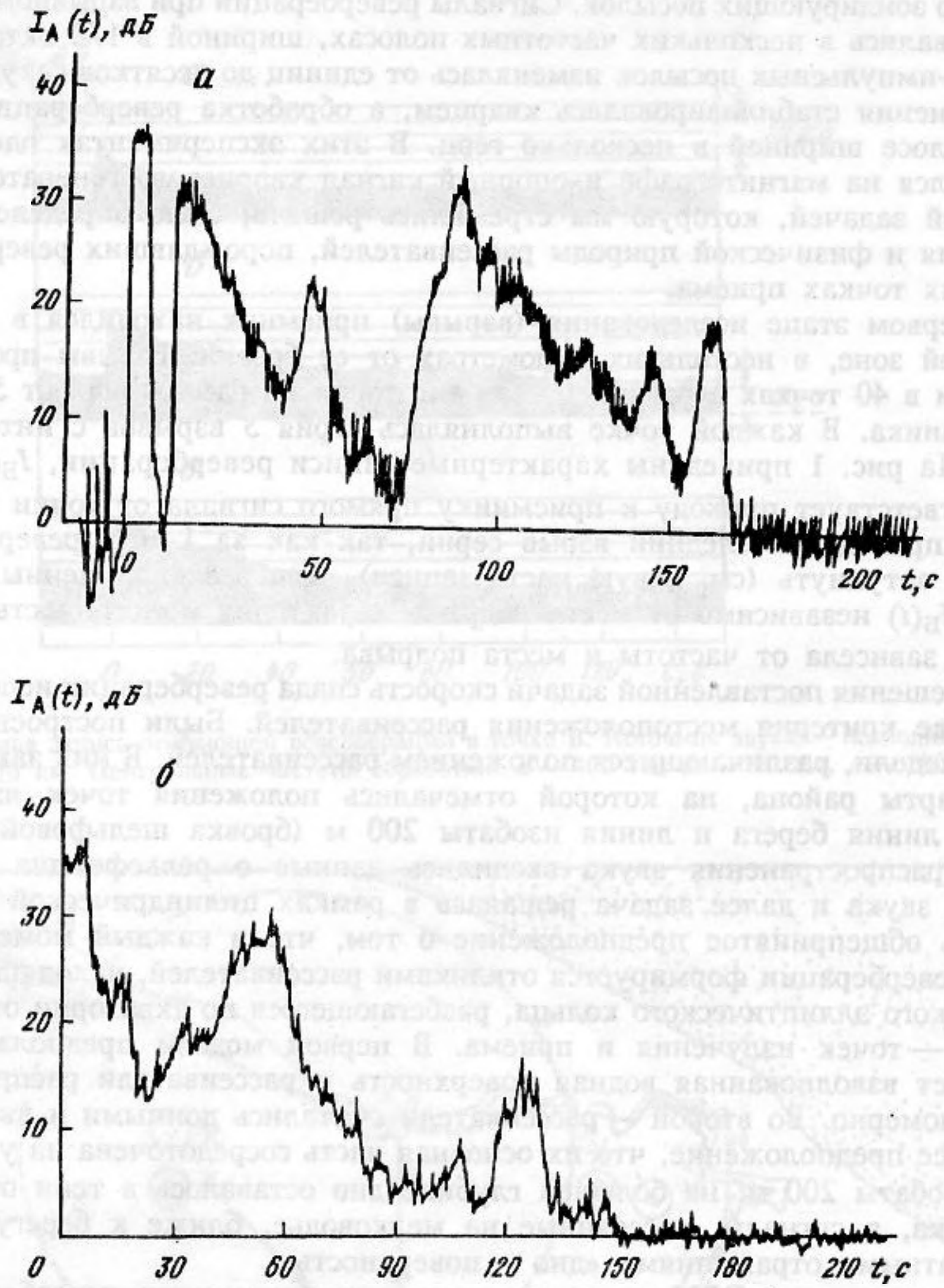

Рис. 3. Характерные записи реверберации в точке А при $\tau = 6$ с. Излучение в точке 2 (*а*), в точке 3 (*б*)

частотной полосы анализа и пр.) показало, что интенсивность реверберации, приходившей в точку А, в области максимумов была заметно выше. Все это свидетельствовало о появлении новых, дополнительных источников реверберации. Было естественно предположить, что ими стали крутые участки материкового склона, вышедшие из акустической тени.

На рис. 2 приведена схема карты рабочей акватории с нанесенными на ней точками излучения и приема (последние, А и Б, в масштабе рисунка сливаются, линиями берега, бровки шельфа (изобата 200 м) и положением наиболее крутой части склона (глубины 500—800 м). На рис. 3 приведены кривые $I_A(t)$, полученные при излучении в точках *2* и *3*. Мы сопоставили структуру этих кривых (и аналогичных, соответствующих другим точкам излучения) с положением эллипсов рассеяния на акватории в разные моменты времени. На схеме рис. 2 для точки излучения *2* нанесен эллипс рассеяния при $t = 45$ с и его отрезки в некоторые другие моменты времени. Соответствующая кривая $I_A(t)$ приведена на рис. 3, *а*.

Провал на кривой рис. 3, *а* после прямого сигнала не является принципиальным и связан с некоторыми техническими недостатками обработки в первой части

этой серии измерений. Далее начинается типичный спад реверберации, монотонность которого нарушается при $t \simeq 45$ с резким пиком. Эллипс рассеяния в это время приближается (см. рис. 2), во-первых, к ярковыраженному отрогу материкового склона, оказываясь почти параллельным его крутой (более 40°) боковой стенке, а, во-вторых, к берегу за точкой А. В обоих случаях реализуются условия почти зеркального отражения звука в сторону приемника, что и объясняет появление пика $I_A(t)$. При $t \simeq 75$ с эллипс рассеяния приближается к области, где склон поворачивает под прямым углом и многие его структуры оказываются параллельными соответствующему отрезку эллипса. Уровень $I_A(t)$ снова начинает расти и достигает максимума при $t \simeq 90-95$ с, когда часть эллипса почти сливается со склоном (см. рис. 2) и в точку приема поступает сильный «отраженный» им сигнал. Затем уровень реверберации постепенно спадает, так как дальше эллипс рассеяния пересекает склон под значительным углом и условия квазизеркального отражения от отдельных структур реализуются все реже. Два последних пика на кривой $I_A(t)$ соответствуют отражениям от последнего крутого участка склона ($t \simeq 145$ с, крутизна склона 20—30°), параллельного линии эллипса и от берега при $t \simeq 165$ с. Далее материковый склон становится столь же пологим, как почти на всем протяжении слева от точки приема, и реверберация быстро падает до уровня шума.

Аналогичный анализ сделан по всем записям при других положениях излучателя на акватории (рис. 2). Во всех случаях пики и провалы на кривых $I_A(t)$ легко интерпретировать как следствие совпадения и несовпадения касательных к эллипсам рассеяния с изобатами крутых участков материкового склона (иногда линии берега). Так, максимум кривой $I_A(t)$ рис. 3, *б* при $t = 50-60$ с соответствовал квазизеркальному переизлучению участков материкового склона вблизи области его поворота и задней стенки каньона, видного на рис. 2. Пик при $t \simeq 120$ с соответствовал «отражению» от берега. Таким образом, второй этап экспериментов с приемником, вынесенным в начало материкового склона, также подтвердил доминирующую роль в формировании реверберации процессов рассеяния звука на поднятиях дна окружающей акватории.

Второй задачей было изучение частотных энергетических спектров реверберации, и эта задача решалась по материалам эксперимента с тонально-импульсным источником. Частотные спектры вычислялись по отдельным реализациям $I_A(t)$ на коротких интервалах, длиной, равной длине посылки τ и вырезаемых окном Ханна. Окно смещалось по оси времени скачками, также равными величине τ. Первый интервал, $t = 0 - \tau$ соответствовал прямому сигналу от излучателя, проходившему те же цепи усиления и обработки. Все расчеты спектров и их параметров выполнялись на ЭВМ; всего было получено более 900 спектров.

На рис. 4 в качестве примера приведены спектры $G(F)$ девяти одиночных реализаций $I_A(t)$, следовавших через 10 мин друг за другом и соответствующих условиям записи рис. 3, *б*. Обращают на себя внимание некоторые особенности, сохранявшиеся и при всех других измерениях. Во-первых, спектры реверберации заметно шире спектров прямого сигнала, а, во-вторых, детали спектров разных реализаций реверберации значительно разнятся между собой. Последнее легко объяснить случайностью процесса при ограниченности длины временного окна. На рис. 5 приведены результаты усреднения полученных одиночных спектров по всем девяти реализациям в пределах каждого временного интервала. Усреднение выполнялось двумя способами: при совмещении центров массы одиночных спектров (*а*) и при простом совмещении частот отсчета (*б*). Кроме того, на ЭВМ вычислялись значения ширины усредненных спектров на уровнях —3 и —10 дБ и полученные значения $\overline{\Delta F}$ численно сравнивались при разных способах усреднения. Это показало, что способ усреднения практически не влиял на ширину спектров, что также видно и при сравнении на глаз кривых $\overline{G}(F)$ рис. 5*а*, *б*. В усредненных спектрах сохранилась и основная особенность спектров одиночных — спектры

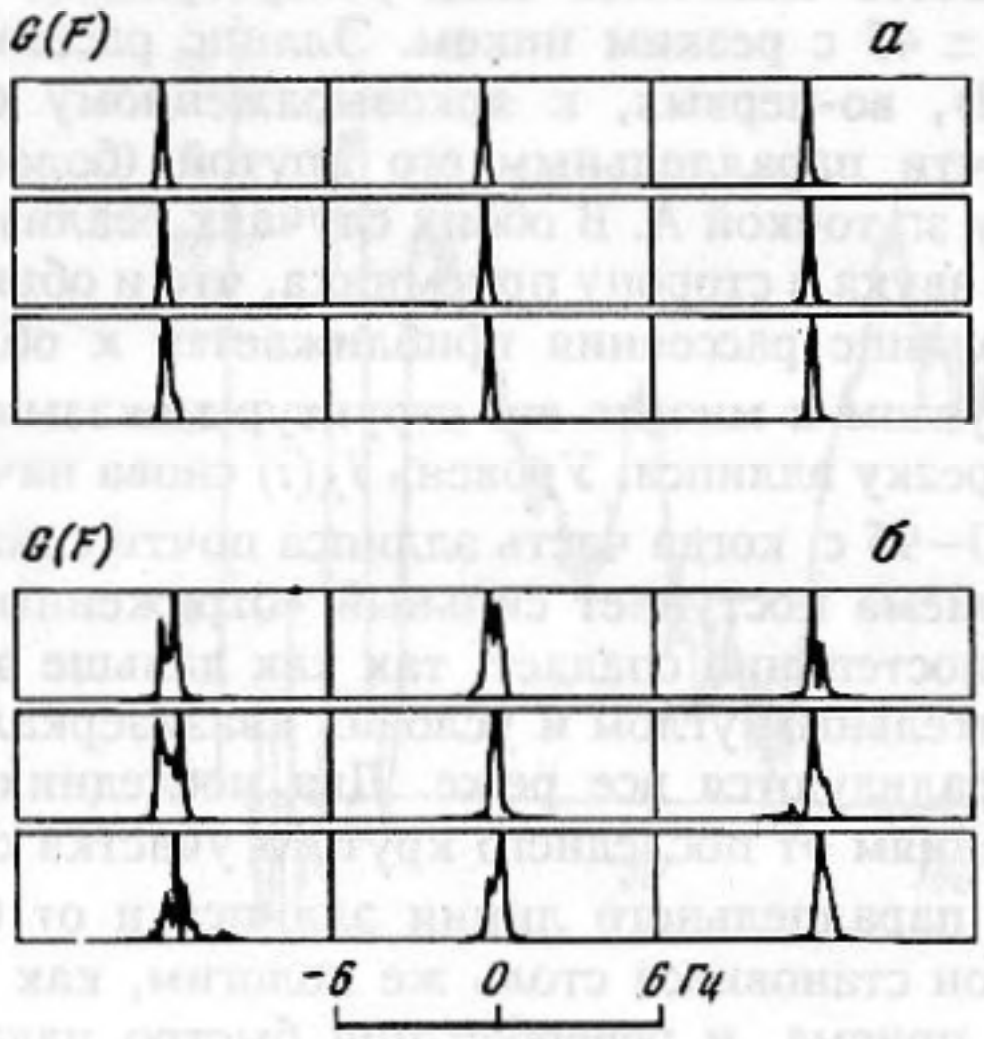

Рис. 4

Рис. 4. Нормированные «медленные» спектры одиночных реализаций при $\tau = 6$ с; *а* — прямой сигнал ($t = 0-6$ с), *б* — реверберация ($t = 48-54$ с). Линейный масштаб

Рис. 5. Нормированные усредненные спектры реверберации при $\tau = 6$ с. Совмещения при усреднении: *а* — по центрам масс, *б* — по частоте отсчета

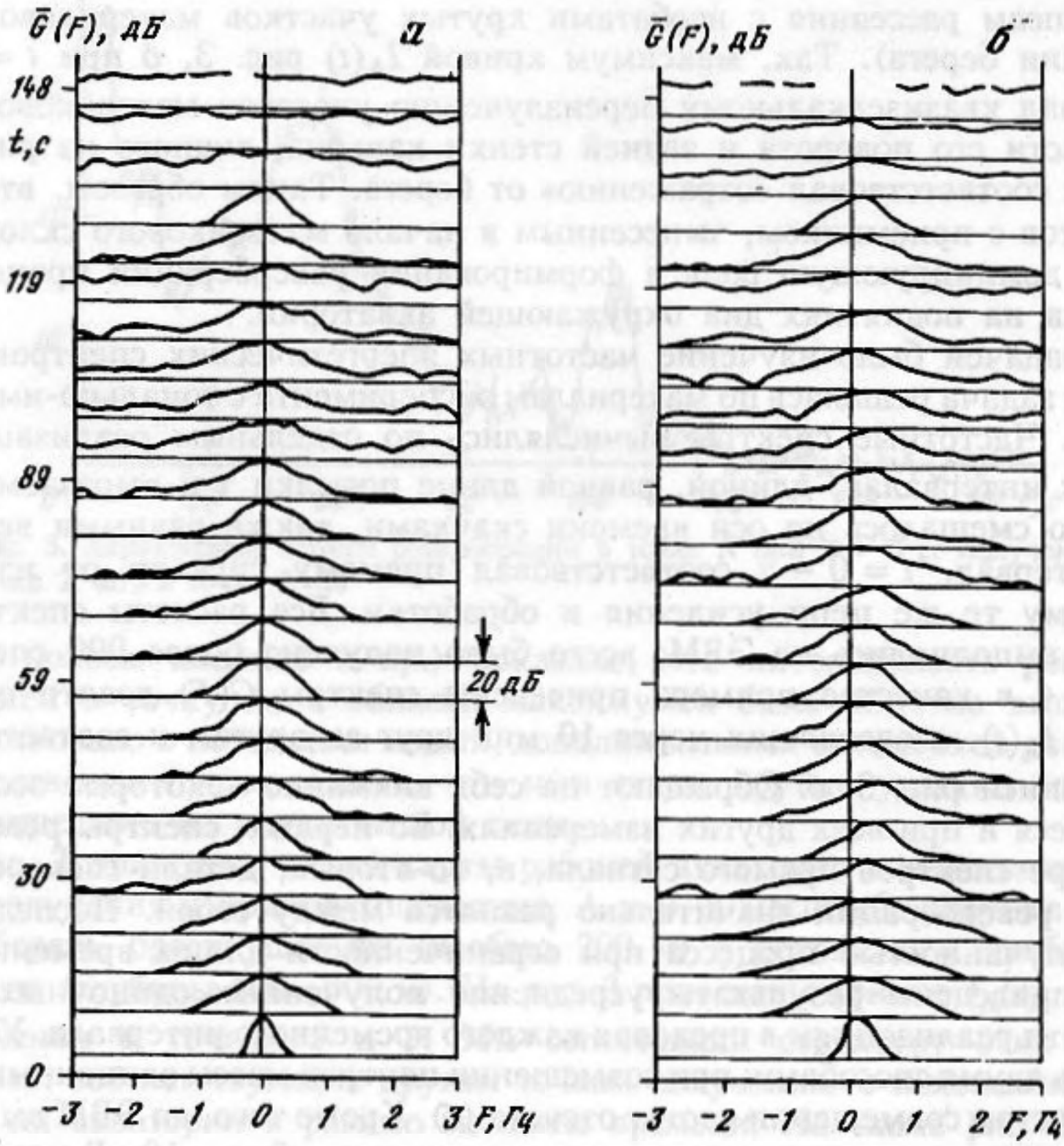

Рис. 5

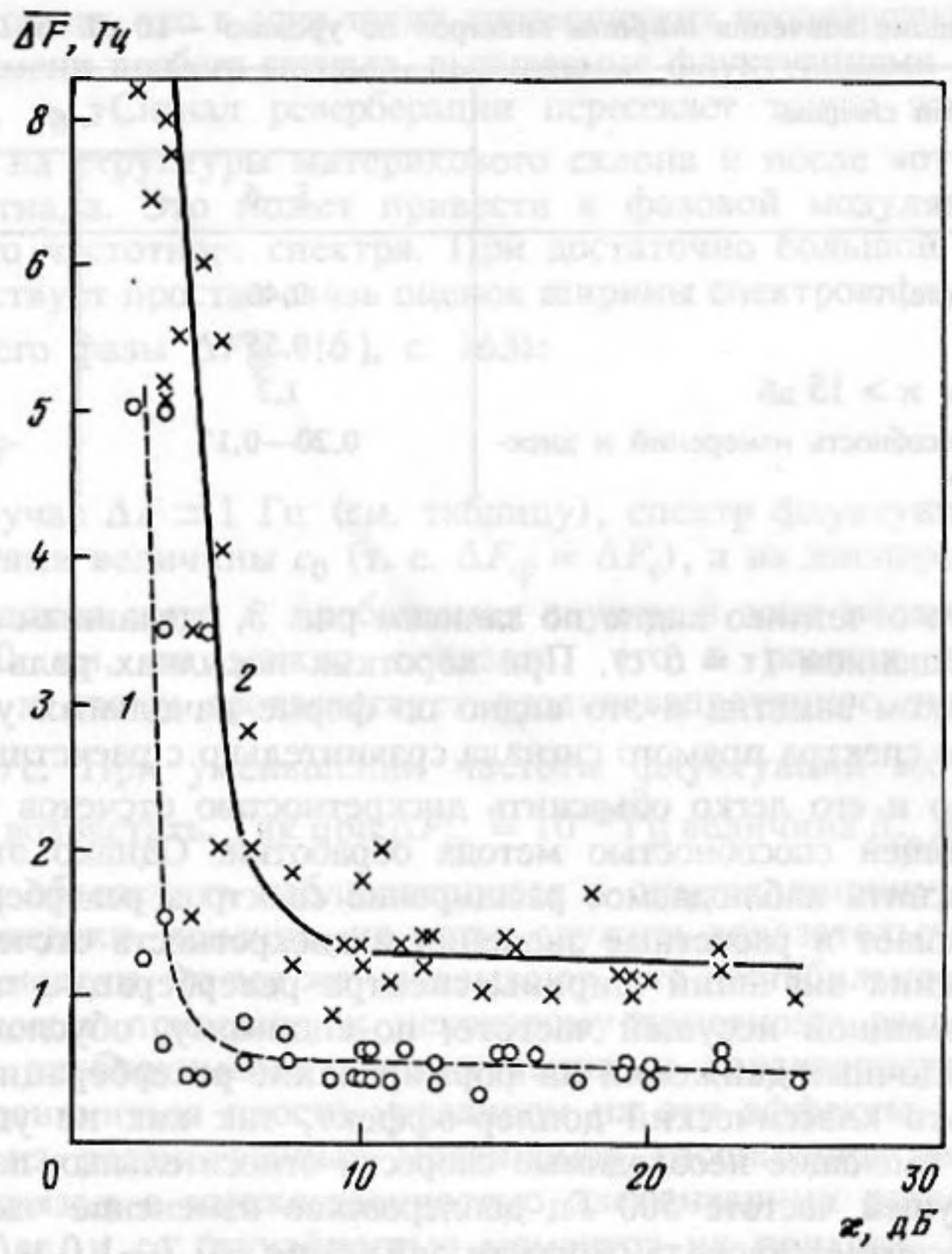

Рис. 6. Экспериментальные значения ширины усредненных спектров реверберации. Уровни отсчета: кружки — —3 дБ, крестики — —10 дБ. Аппроксимирующие кривые по уровням: штриховая —3 дБ и сплошная —10 дБ

реверберации заметно шире спектра прямого сигнала (нижние кривые на рис. 5). Эта особенность сохранялась во всех опытах независимо от длины посылки, положения излучателя на акватории и положения временного окна на кривой $I_A(t)$ (участки с резкими изменениями уровня, вершины пиков, интервалы между пиками и т. д.).

Анализ показал, что наблюдаемое расширение спектров реверберации не может быть объяснено влиянием случайных шумов, на фоне которых регистрировалась реверберация. На рис. 6 нанесены экспериментальные значения ΔF в зависимости от $\varkappa = I_A/I_ш$ ($I_ш$ — уровень шума, определяемый по записям аналогичным рис. 3 при $t > 200$ с). Значения $\Delta\overline{F}$ несмотря на усреднение имеют значительные разброс и для наглядности по экспериментальным точкам проведены плавные аппроксимирующие кривые. Отчетливо видно, что при уменьшении параметра $\varkappa$ устойчивый рост ΔF начинается лишь после того, как отношение реверберация/шум приблизится к уровням отсчета ширины спектра (в данном случае —3 и —10 дБ). Сопоставление по времени задержки спектров на рис. 5 и кривой $I_A(t)$ рис. 3, *б* позволяет оценить значения $\varkappa$ для разных спектров и свидетельствует, что шумы расширяли спектр сигнала лишь при $t \simeq 30$ с и при больших задержках времени.

В таблице сведены усредненные по всем опытам значения ширины спектров, вычисленные при достаточно низком уровне шума, чтобы исключить его влияние на их ширину.

При длинном сигнале (50 с) ширина спектра прямого сигнала не приведена, так как во временное окно 0—50 с заведомо попадала и относительно ближняя

Средние значения ширины спектров по уровню —10 дБ (в Гц)

Тип сигнала	τ, с	
	5—6	50
Расчет по величине τ	0,40	0,05
Прямой сигнал	0,55	—
Реверберация при $\varkappa > 15$ дБ	1,2	0,83
Разрешающая способность измерений и дискретность отсчетов	0,20—0,17	0,02

реверберация. Это отчетливо видно по записям рис. 3, сделанным с более высоким временным разрешением ($\tau = 6$ с). При коротких посылках роль ближней реверберации не слишком заметна и это видно по форме начальных участков записей $I_A(t)$. Расширение спектра прямого сигнала сравнительно с расчетным при короткой посылке невелико и его легко объяснить дискретностью отсчетов частоты ($1/\tau$) и низкой разрешающей способностью метода обработки. Однако этими факторами невозможно объяснить наблюдаемое расширение спектров реверберации — оно существенно превышает и расчетные значения и дискретность отсчетов.

Близость средних значений ширины спектра реверберации при разных значениях τ и неизменной несущей частоте, по-видимому, обусловлена влиянием каких-то беспорядочных движений на формирование реверберации. Трудно предположить, что это классический доплер-эффект, так как не удается выделить элементы опыта, имеющие необходимые скорости относительных перемещений. Например, при несущей частоте 500 Гц доплеровское изменение частоты на 0,5 Гц должно было бы соответствовать скорости движения ~0,7—1,0 м/с в зависимости от геометрии опыта. Приемник и рассеиватели (донные структуры) были неподвижны. Предположить, что массивный многотонный излучатель «болтался» с такими частотами и скоростями просто невозможно, тем более, что величина стабильного сдвига частоты реверберации за счет дрейфа судна-носителя, как правило, не превышала 0,2—0,3 Гц (см., например, рис. 5, *б*). Погодные условия на этом этапе опытов были относительно спокойными, скорость ветра не превышала 3—5 м/с. Расширение спектров реверберации за счет морского волнения было невелико, не должно было заметно превышать удвоенную частоту энергонесущего максимума волнения (~0,12 Гц), так как величина параметра Рэлея при пологом канальном распространении звука была невелика, а крутые лучи не попадали в приемник (см. выше). И наконец, любое предположение такого рода опровергается неизменно узким спектром прямого сигнала, прошедшего через ту же водную среду от того же излучателя.

Другой возможной причиной расширения частотного спектра реверберации за счет движения элементов среды, в принципе, могут быть сильные возмущения, которые, как известно, возникают вблизи границы материкового склона и шельфа. Здесь происходит резкое нарушение течений, в том числе приливно-отливных, их скорость может возрастать более чем на порядок и увеличивается турбулизованность потоков [1—3]. Происходит вымывание осадков с бровки шельфа; с крутых склонов периодически срываются суспензионные потоки. В результате в воде повышается концентрация твердых частиц [4]. Воды над материковым склоном, как правило, богаты живыми организмами, количество которых здесь, так же как и над шельфом, много выше, чем в открытом океане [5]. Область подобных неоднородностей простирается на несколько километров (иногда на 10—20) от бровки шельфа. Она весьма неоднородна пространственно, ее элементы находятся в постоянном интенсивном движении.

Мы предположили, что в зоне таких динамических неоднородностей имеют место флуктуации времени пробега сигнала, вызываемые флуктуациями средней величины скорости звука, c_0. Сигнал реверберации пересекает такую зону дважды — при падении звука на структуры материкового склона и после «отражения» от них рассеянного сигнала. Это может привести к фазовой модуляции сигнала и к расширению его частотного спектра. При достаточно большой дисперсии фазы, $\sigma_\varphi >> 1$, существует простая связь оценок ширины спектров флуктуаций частоты сигнала ΔF и его фазы ΔF_φ ([6], с. 163):

$$\Delta F = \sigma_\varphi \Delta F_\varphi. \quad (1)$$

В нашем случае $\Delta F \simeq 1$ Гц (см. таблицу), спектр флуктуаций фазы определяется вариациями величины c_0 (т. е. $\Delta F_\varphi = \Delta F_c$), а их дисперсии легко связать, если известна длина пути r, пробегаемая звуком в зоне неоднородностей. Если принять $r = 10$ км, то можно показать, что в рамках приближения (1) $\Delta F_{c_0} \leq 0{,}3$ Гц и этому соответствует среднеквадратичное значение вариаций c_0, $\delta c_0 \geq 8$ см/с. При уменьшении частоты флуктуаций их глубина должна соответственно возрастать. Так при $\Delta F_{c_0} = 10^{-2}$ Гц величина δ_{c_0} должна достигнуть 50 см/с, чтобы обеспечить наблюдавшуюся в опытах ширину спектра сигнала.

Сделанные оценки, конечно, не могут служить доказательством адекватности рассмотренной модели, но все же показывают, что нестабильность пришельфовой зоны океана может приводить к некоторому заметному расширению спектра. Не располагая необходимыми количественными характеристиками среды, мы вынуждены ограничиться просто указанием на эти эффекты.

Последний из рассмотренных механизмов расширения частотного спектра реверберации связан с множественностью элементарных рассеянных сигналов, формирующих ее, и со случайностью моментов их прихода. В ходе обработки использовалось короткое временное окно, длительностью, равной длине посылки, что приводило к уменьшению длины практически всех элементарных откликов, попадавших во временное окно обработки — границы окна не пропускали либо начало, либо конец отклика. Уменьшение же эффективной длины обрабатываемых откликов, в принципе, должно привести к расширению их спектра. Исходя из этой идеи был проведен машинный эксперимент, где средняя по многим реализациям реверберации ширина спектра рассчитывалась при разных значениях числа элементарных откликов, n, которые хотя бы частично попадали в окно обработки. При моделировании их амплитуды считались одинаковыми, а моменты прихода и фазы — случайными при равновероятном распределении. При $n \simeq 2-100$ ширина по уровню —10 дБ после усреднения по 10 независимым реализациям увеличивалась в лучшем случае в 1,5—2 раза, что значительно меньше, чем дают экспериментальные данные. Следовательно, этот эффект также не может объяснить наблюдавшиеся особенности реверберации.

Таким образом, вопрос о расширении спектров регистрируемой в опытах донной реверберации нельзя считать окончательно решенным и он требует дальнейшего изучения и, в частности, проведения целенаправленных экспериментов.

Авторы благодарят М. Ю. Андреева, О. А. Година и Е. А. Копыла за полезные дискуссии, а Е. Г. Смирнова и сотрудников возглавляемого им коллектива за помощь в организации и за участие в проведении натурных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bains P. G.* Internal tides, internal waves and near-internal motions//Baroclinic Proc. Contin. Shelves. American Geophysical Union. Washington 1986. P. 130.
2. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1992. С. 272.
3. *Sabinin K. D., Serebryany A. N.* Intensive internal waves in the ocean//Abstracts of papers. International

Session «Meso and microstructure of ocean-measuring and models of processes». S.-Peterburgh, 8—12 Sent. 1992.
4. *Айбулатов Н. А.* Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 272.
5. Океанология. Биология океана. Т. 2. Под ред. М. Е. Виноградова. Биологическая продуктивность океана. М.: Наука, 1977. С. 399.
6. *Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. С. 640.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Российской академии наук

Поступила в редакцию
27.05.92

I. B. Andreeva, V. N. Lupovskoy

UNDERWATER BISTATIC SOUND REVERBERATION NEAR CONTINENTAL SLOPE

An experimental study of reverberation has been conducted at sound frequencies of several hundred Hz. A receiver has been installed within the boundary region between the shelf and the continental slope, a sound source being lowered from a distant vessel. The lower limit of the sound channel has had the depth of several hundreds meters and sound propagation has involved multiple surface reflections. The analysis and computer simulation of the signal time structure has demonstrated the scattering by the bottom rise reaching the sound channel to be the main cause of reverberation independently of wind. It has been found out unexpectedly that the frequency spectrum of reverberation signals is from two to six times wider than that of direct signals from a distant transmitter. Several possible models of spectra broadening has been considered, none of which giving a reliable explanation for the observed effect.