АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 2, с. 201–205

УДК 534.222

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ВЗРЫВНОГО СИГНАЛА В ЗОНАХ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕНИ ГЛУБОКОГО ОКЕАНА

© 1998 г. В. С. Гостев, Л. Н. Носова, Р. Ф. Швачко

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036, Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 16.12.96 г.

Приводятся данные эксперимента, проведенного в центральной части Индийского океана. Анализируются пространственно-временные, спектральные и энергетические характеристики звукового поля взрывного источника в первой и второй зонах тени. Проведена идентификация путей проникновения звука в зоны тени при распространении в глубоком океане.

Исследования проникновения звука в зоны тени обнаружили ряд интересных эффектов, которые рассматривались в работах [1–5]. В этих работах были приведены экспериментальные данные, относящиеся к первой зоне тени. В настоящей работе рассмотрены экспериментальные данные не только по первой, но и по второй зоне тени, которые позволяют обобщить механизмы проникновения звука в зоны тени на весь циклический процесс распространения звука в океане. Экспериментальные исследования звукового поля взрывного источника в первой и второй зонах тени глубокого океана проводились в центральной части Индийского океана с координатами 5°–8° ю.ш., 80° в.д. при глубине океана около 5-ти километров и скорости звука у дна больше, чем у поверхности. Подрывы зарядов весом 2.5 кГ осуществлялись на глубине около 300 м с идущего на полном ходу судна. Глубина приема (центр приемной антенны) была также около 300 м. Прием звуковых сигналов производился на 20-ти гидрофонах вертикальной антенны, расположенных равномерно по антенне с разнесением по вертикали на 2 м друг от друга. Полученные таким образом записи взрывного сигнала позволяли проанализировать помимо пространственно-временных, спектральных и энергетических еще и угловые характеристики сигналов, что предоставляло дополнительную информацию для надежной идентификации путей их проникновения в первую и вторую зоны тени. В процессе комплексного эксперимента было сделано два взрывных разреза, когда судно, производящее подрывы зарядов, двигалось по направлению к приемному судну с севера на юг и в обратном направлении с юга на север. Временной интервал между двумя взрывными разрезами составлял 3 суток. Хотя проведение двух разнонаправленных взрывных разрезов диктовалось другими причинами, не обсуждаемыми в данной работе, это предоставило нам возможность проверить повторяемость характеристик звукового поля в зонах тени. Все обсуждаемые ниже характеристики звукового поля полностью повторялись в двух экспериментах. Исключение составило лишь отсутствие микроканального распространения звука во втором эксперименте, проведенном через трое суток после первого. В первом же взрывном разрезе, как и в проведенном на 7–8 часов позже эксперименте, описанном в работе [5], был зарегистрирован факт микроканального проникновения звука в первую зону тени.

На рис. 1 представлено распределение скорости звука в верхней части океана, которое по данным подробных зондирований везде монотонно уменьшалось с увеличением глубины до оси подводного звукового канала, за исключением приповерхностного слоя, где формировался слабый приповерхностный канал толщиной 25–30 м и слоя на глубине около 60–70 м, где был сформирован микроканал с параметрами, приведенными на рис. 1. Показана схема "водных" путей (пунктирные линии), по которым возможно проникновение звука в зоны тени. Так, звук, пройдя по отрезку луча *1* до его выхода под нулевым углом к поверхности, захватывается приповерхностным каналом и, распространяясь в нем, непрерывно озвучивает первую зону тени, выходя из канала под нулевым углом и далее распространяясь по лучу *4*, аналогичному лучу *1*, но смещенному по горизонтальному расстоянию. Микроканальное проникновение звука в зону тени (луч *1'*) аналогично приповерхностному. В дальнейшем будем называть сигналы, проникающие по этим путям, приповерхностным и микроканальным ликиджами. Другой механизм проникновения звука в зону тени заключается в переизлучении звука резкоанизотропными слоистыми неоднородностями тонкой структуры океанской толщи под углом зеркального отражения в области каустик (луч *3*, попадающий в точку приема с заворотом и луч *3'* – без заворота).

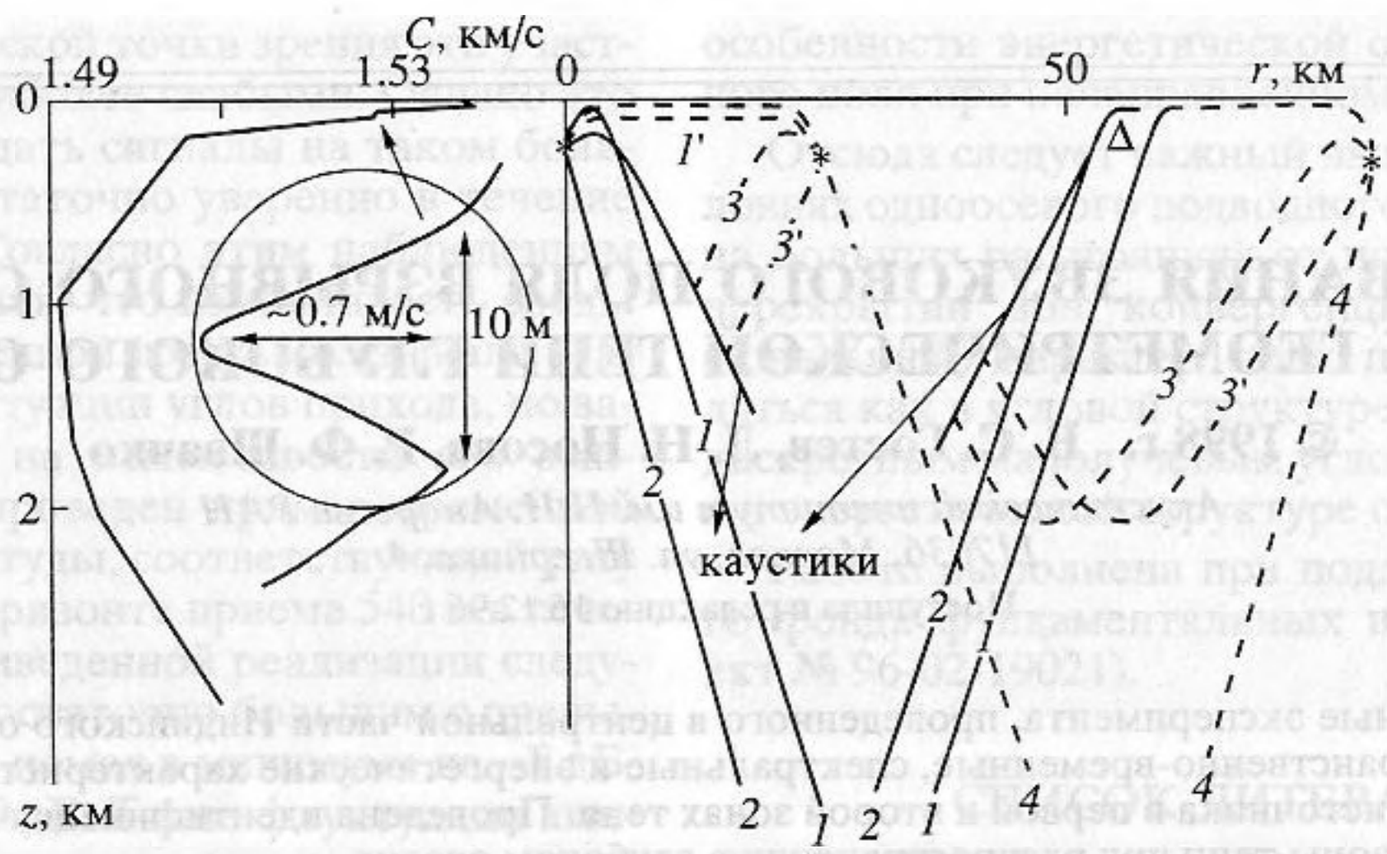

Рис. 1. Распределение скорости звука с глубиной в районе эксперимента и схема "водных" путей проникновения звука в первую и вторую зоны тени.

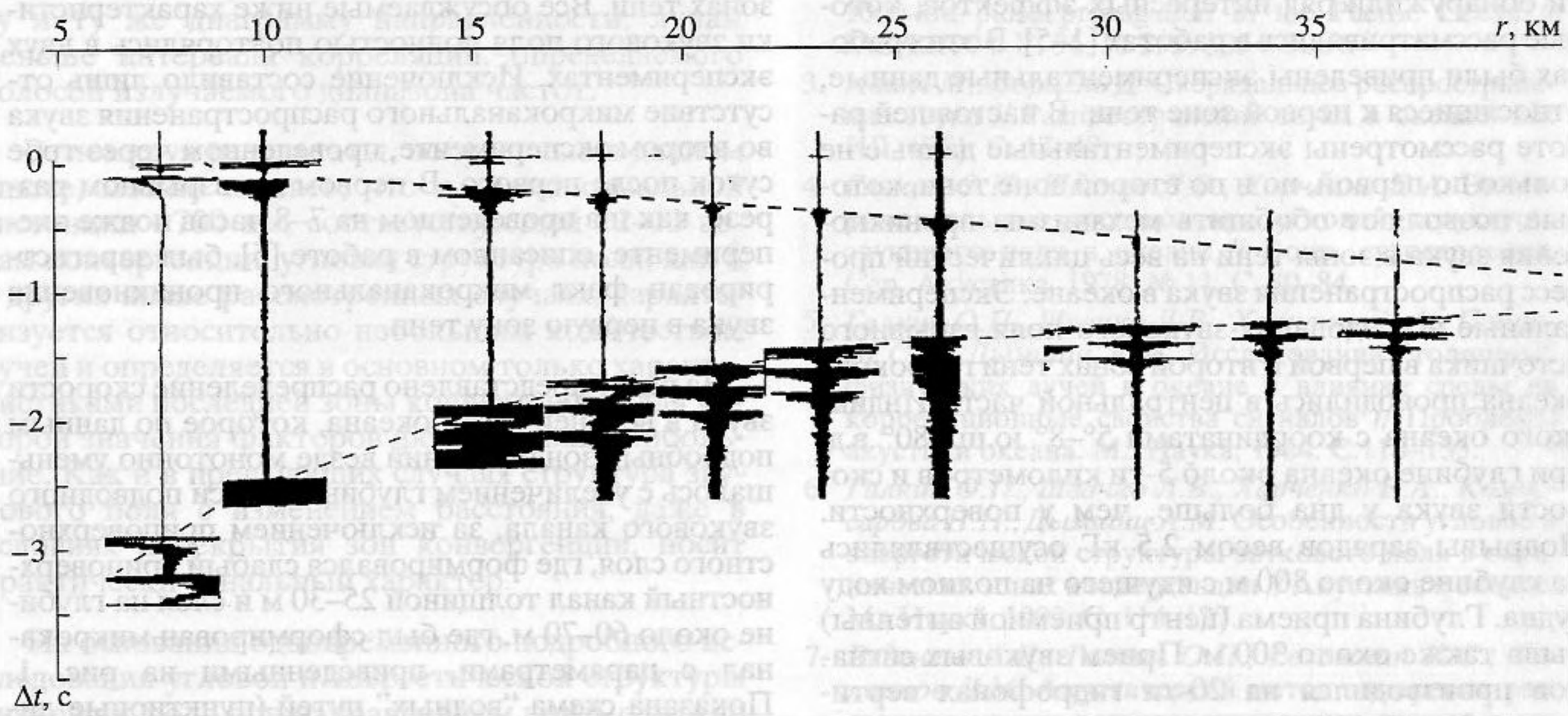

Рис. 2. Реализации взрывных сигналов, принятых в первой зоне тени.

В точку приема, расположенную во второй зоне тени, звук проникает снизу по рефракционному лучу *4*, а сверху по рефракционному лучу *2*, выходящему из источника вниз под тем же углом, что и луч *1* вверх, и захватываемому приповерхностным каналом в первой зоне конвергенции. Если горизонт излучения равен горизонту приема, то время распространения по обоим путям одинаково. Если горизонт излучения выше горизонта приема, то первым по времени в точку приема придет звук по лучу *4*, если ниже – то звук по лучу *4* придет по времени вторым. Звук может проникать во вторую зону тени и по рефракционному лучу *1*, также захватываясь приповерхностным каналом в первой зоне конвергенции. Затем, распространяясь в приповерхностном канале, звук приходит в точку приема по отрезку луча *1* сверху, как и приповерхностный ликидж в первой зоне тени. Временная задержка сигнала, распространяющегося по этому пути, относительно первых двух (по лучам *2* и *4*), не зависит от расстояния и определяется разностью дистанций, проходимых звуком в приповерхностном канале (отрезок △ на рис. 1). Наконец, звук может проникать во вторую зону тени, переизлучаясь в областях каустик первой зоны конвергенции (пути *3* и *3'* с заворотом и без заворота).

На рис. 2 и 3 показаны реализации взрывных сигналов, принятых одним из гидрофонов вертикальной антенны в частотной полосе 0.5–3 кГц в первой и второй зонах тени. На рис. 2 представлены реализации взрывных сигналов, принятых в начале и в середине первой зоны тени. Ось временной развертки каждой из реализаций отложена на расстоянии приема взрывного сигнала (ось расстояний изображена сверху). Реализации представлены при разных коэффициентах усиления для более четкого выявления слабых "водных" сигналов, обсуждавшихся выше. При этом сигналы, отразившиеся от дна, показаны с искажениями. Для иллюстрации временной структуры звукового поля отмеченное обстоятельство не является существенным. На реализациях рис. 2 представлены все рассмотренные выше сигналы, проникающие в первую зону тени. Первым по времени прихода наблюдается приповерхностный ликидж, приходящий под углом 13° сверху. Относительное время его прихода принято за начало отсчета. Приповерхностный ликидж надежно регистрировался до расстояний 25–30 км. Вторым с небольшой задержкой по времени наблюдается микроканальный ликидж. Сигнал прослеживался до расстояний 20 км, его временная задержка относительно приповерхностного ликиджа увеличивается с расстоянием, что обусловлено разницей в скорости распространения звука в приповерхностном и микро каналах, и хорошо совпадает с расчетом. Третьей по времени прихода наблюдается группа сигналов, переизлученных океанской толщей (*3* и *3'* на рис. 1). Эти сигналы можно наблюдать на протяжении всей зоны тени. Последними на реализациях наблюдаются сигналы, отразившиеся от дна и поверхности. Расчитанные по лучевой программе относительные временные задержки "водных" сигналов и первого донного отражения (пунктирные кривые на рис. 2) хорошо совпадают с экспериментальными.

На рис. 3 представлены реализации взрывных сигналов, принятых в начале второй зоны тени. Первыми по времени слитно, под углами 13° сверху и снизу приходят сигналы, которые проникают во вторую зону тени по приповерхностному каналу (лучи *2* и *4* на рис. 1). Эти на самом деле раздвоенные из-за неточного совпадения горизонтов излучения и приема сигналы приведены на рис. 3 к нулевой точке отсчета. Следующим, на 60 мс позже, приходит сигнал, проникающий во вторую зону тени по лучу *1*. Углы прихода всех трех рассмотренных сигналов, а также временная задержка в 60 мс не изменялись с изменением дистанции. Последними из "водных" сигналов во второй зоне тени зарегистрированы сигналы, проникающие туда по лучам *3* и *3'*. С увеличением дистанции приема эти сигналы так же, как и в первой зоне тени, движутся по временной оси от приповерхностных ликиджей к тройке двукратных донных отражений. Углы прихода сигналов, пришедших по лучам *3*, определенные по временным задержкам переднего фронта на гидрофонах вертикальной антенны составляли 2°–3° сверху.

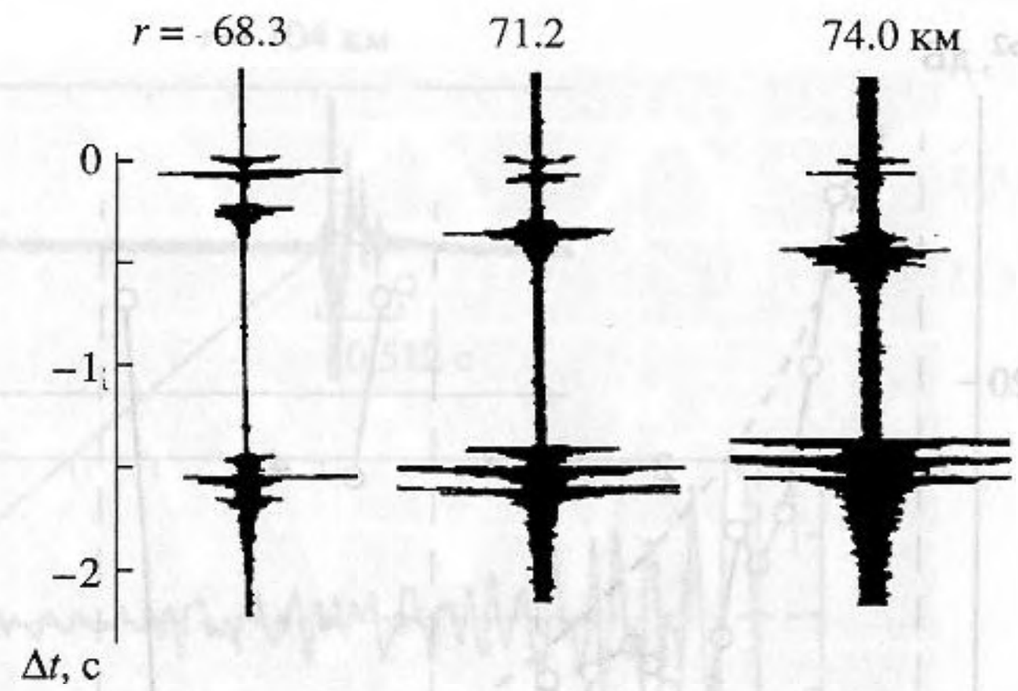

Рис. 3. Реализации взрывных сигналов, принятых во второй зоне тени.

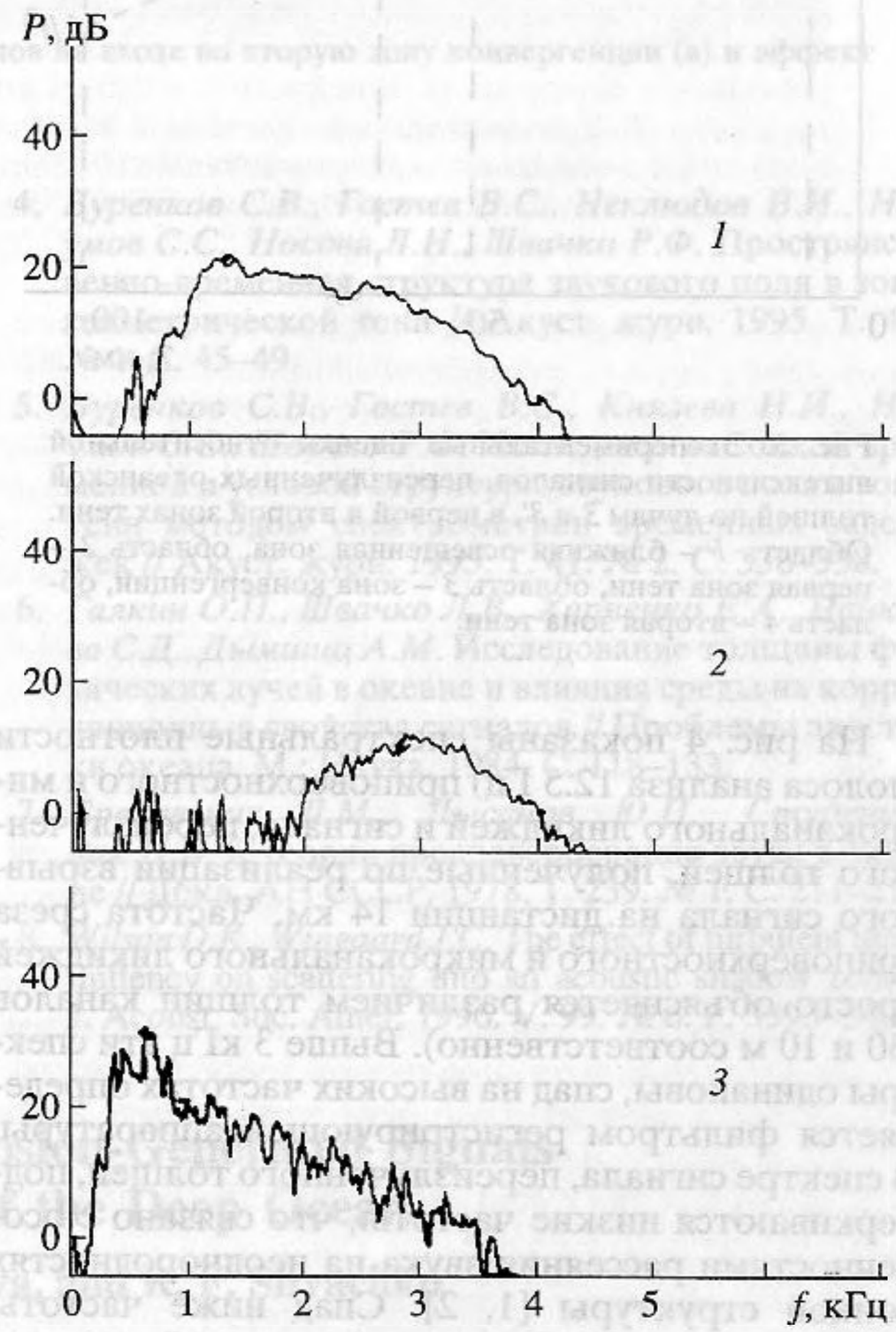

Рис. 4. Спектральные плотности приповерхностного (*1*), микроканального (*2*) ликиджей и переизлученного толщей сигнала (*3*).

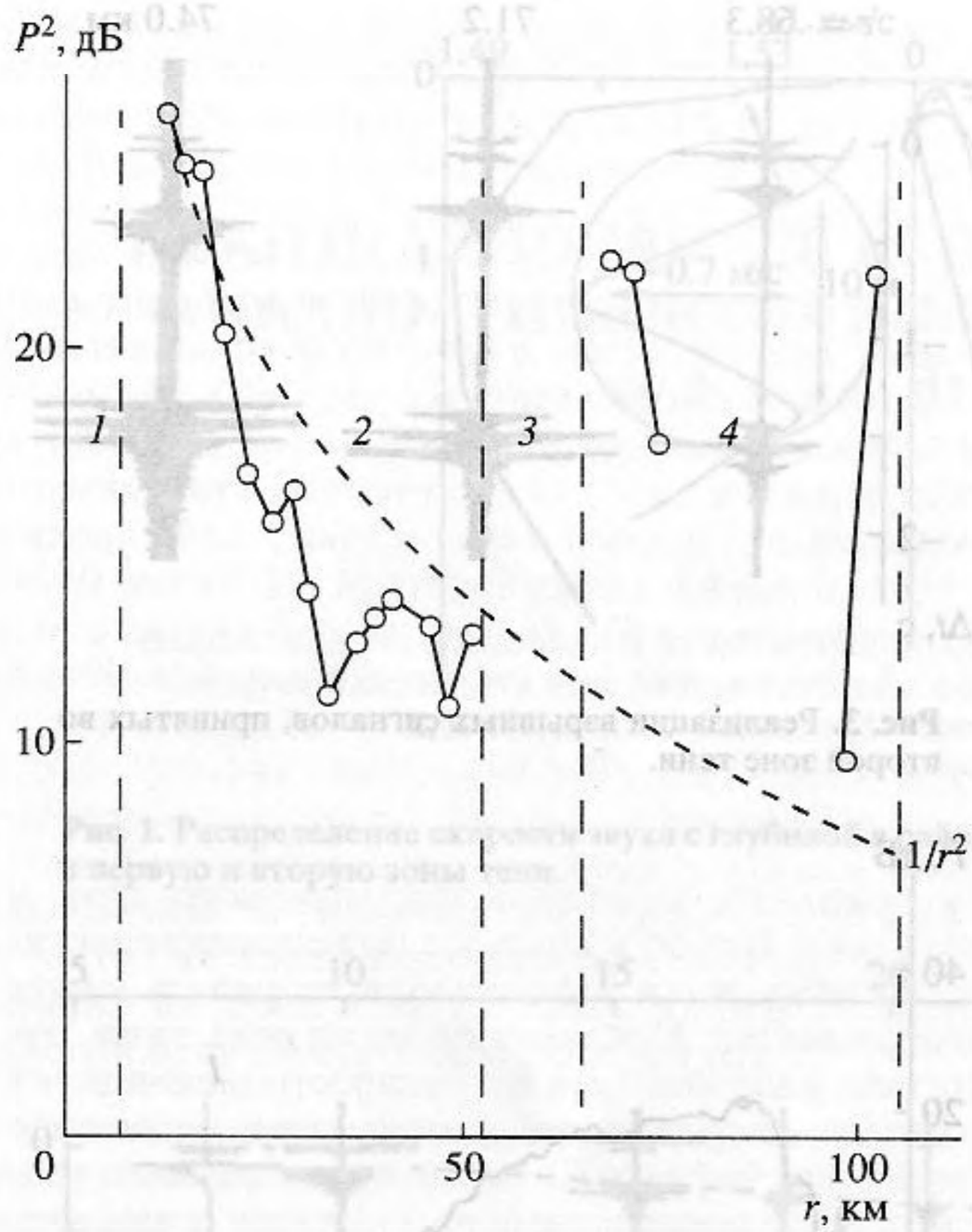

Рис. 5. Экспериментальные оценки относительной интенсивности сигналов, переизлученных океанской толщей по лучам *3* и *3'*, в первой и второй зонах тени. Область *1* – ближняя освещенная зона, область *2* – первая зона тени, область *3* – зона конвергенции, область *4* – вторая зона тени.

На рис. 4 показаны спектральные плотности (полоса анализа 12.5 Гц) приповерхностного и микроканального ликиджей и сигнала, переизлученного толщей, полученные по реализации взрывного сигнала на дистанции 14 км. Частота среза приповерхностного и микроканального ликиджей просто объясняется различием толщин каналов (30 и 10 м соответственно). Выше 3 кГц эти спектры одинаковы, спад на высоких частотах определяется фильтром регистрирующей аппаратуры. В спектре сигнала, переизлученного толщей, подчеркиваются низкие частоты, что связано с особенностями рассеяния звука на неоднородностях тонкой структуры [1, 2]. Спад ниже частоты 0.5 кГц обусловлен фильтрами приемной системы.

На рис. 5 представлены экспериментальные оценки относительной интенсивности сигналов, проникающих в первую и вторую зоны тени по лучам *3* и *3'* в частотной полосе 0.5–3 кГц. Интересной особенностью является увеличение интенсивности переизлученных толщей сигналов в начале и конце второй зоны тени. В первом случае это связано с тем, что к звуковому полю, формируемому сигналами по лучам *3* и *3'*, проникающими из первой зоны тени, добавляются сигналы, порождаемые переизлучением звука толщей в области каустик первой зоны конвергенции. Повышение уровня в конце второй зоны тени объясняется тем, что области переизлучения звука по лучам *3* и *3'* оказываются в слое термоклина с обостренными вертикальными градиентами тонкой структуры скорости звука, усиливающими интенсивность переизлучения. Следует отметить также, что звуковое поле, формируемое переизлученными сигналами по лучам *3* и *3'*, во второй зоне тени становится сравнимым с донными отражениями и можно полагать, что в последующих зонах тени оно окажется преобладающим. Рисунок 5 хорошо иллюстрирует факт перекачки звуковой энергии из зон конвергенции в зону тени.

На рис. 6а показаны реализации двух последовательных взрывных сигналов на входе во вторую зону конвергенции. На расстоянии 101 км приемник еще находится в конце второй зоны тени. Здесь на реализации наблюдается сигнал, переизлученный толщей и двукратные донные отражения. Видно, что при применении направленного приема, который исключал бы прием донных отражений, переизлученный толщей сигнал полностью определял бы звуковое поле в конце второй зоны тени – начале второй зоны конвергенции и являлся бы причиной более раннего начала зоны конвергенции, отмеченного в работах [3, 6].

Естественно предположить, что звуковое поле, формируемое переизлученными толщей сигналами существует и в зоне конвергенции, обуславливая явление "предреверберации" или предзвучания приходящего в эту зону в соответствии с геометрической акустикой сигнала [7]. На следующей реализации, полученной на дистанции 104 км (начало зоны конвергенции), видно, как между переизлученным толщей сигналом и донными отражениями появляется "прямой" сигнал, распространяющийся в зону конвергенции по рефракционному лучу. Нарастание фронта суммарного сигнала показано на рис. 6б. Угол прихода отмеченного предреврберационного сигнала, определяемый по временным задержкам переднего фронта на гидрофонах вертикальной антенны, оказался равным 2.5° сверху. Такие углы прихода характерны для сигналов, распространяющихся по лучам *3*. Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что явление "предреверберации" может объясняться не только рассеянием звука поверхностью океана, как это сделано в работе [7], но и его переизлучением в океанской толще.

Исследование звуковой "засветки" зон тени, формируемых при распространении звука в глубоком океане, позволяет выявить ряд эффектов, имеющих общий характер для слоистых сред со

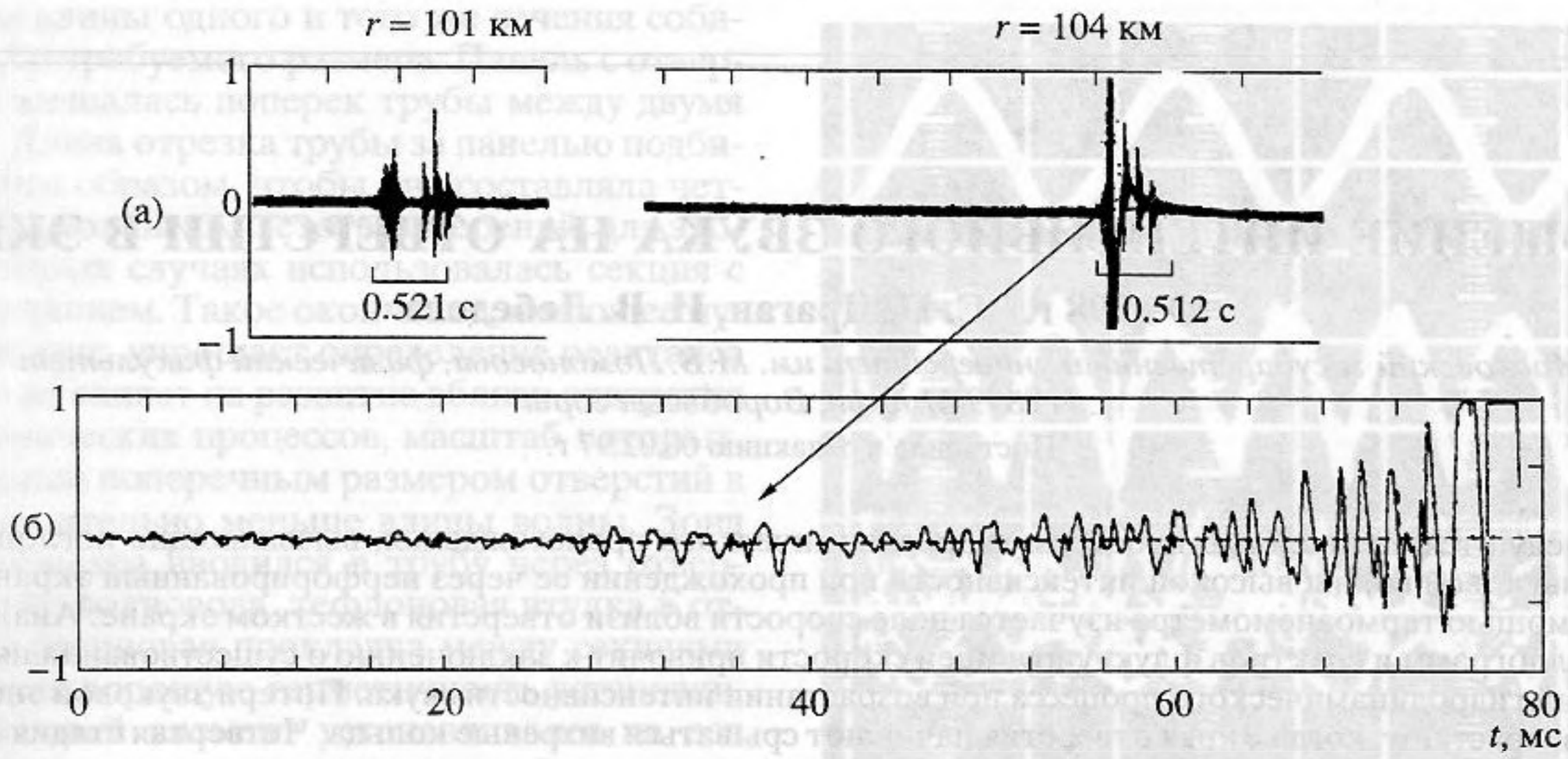

Рис. 6. Реализации двух последовательных взрывных сигналов на входе во вторую зону конвергенции (а) и эффект "предреверберации в начале этой зоны (б).

случайными неоднородностями (океан, земная кора, атмосфера). Интерес к таким исследованиям значительно возрос в последнее время (см., например, [8]).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код РФФИ 96-05-64799).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гостев В.С., Швачко Р.Ф.* Экспериментальные исследования звуковых сигналов, наблюдаемых в зоне геометрической тени в океане // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282. № 5. С. 1082–1085.
2. *Гостев В.С., Швачко Р.Ф.* Звуковые сигналы, наблюдаемые в зоне геометрической тени в океане // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 6. С. 800–802.
3. *Гостев В.С., Неклюдов В.И., Чупров С.Д., Швачко Р.Ф., Швачко Л.В.* О засветке зоны тени // Акустика океанской среды. М.: Наука, 1989. С. 88–97.
4. *Буренков С.В., Гостев В.С., Неклюдов В.И., Наумов С.С., Носова Л.Н., Швачко Р.Ф.* Пространственно-временная структура звукового поля в зоне геометрической тени // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 45–49.
5. *Буренков С.В., Гостев В.С., Князева Н.И., Наумов С.С., Швачко Р.Ф.* Исследование тонкой временной и угловой структуры звукового поля в зоне тени методом спектрометрии временных задержек // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 336–338.
6. *Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А., Панкова С.Д., Дымшиц А.М.* Исследование толщины физических лучей в океане и влияния среды на корреляционные свойства сигналов // Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 118–133.
7. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В.* К теории предреверберации звука в океане // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 211–213.
8. *Wilson D.K., Wingaard J.C.* The effect of turbulent intermittency on scattering into an acoustic shadow zone // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 99. № 6. P. 3393–3400.

The Sound Field of Explosion-Generated Signals in Shadow Zones of the Deep Ocean

V. S. Gostev, L. N. Nosova, and R. F. Shvachko

Data from an experiment that was carried out in the central region of the Indian Ocean are presented. For the first and second shadow zones, the spatial–temporal, spectral, and power characteristics of the explosion-generated sound field are analyzed. The paths, along which the sound penetrates into the shadow zones in deep-ocean propagation, are identified.