

УДК 534.23

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕНИ

© 1995 г. С. В. Буренков, В. С. Гостев, В. И. Неклюдов, С. С. Наумов,
Л. Н. Носова, Р. Ф. Швачко

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 17.01.94 г.

Проведен анализ экспериментально полученной методом спектрометрии временных задержек структуры звукового поля в зоне геометрической тени. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных данных с теоретическими расчетами, выполненными в рамках предложенной модели проникновения звука в зону тени без отражения от границ.

Исследование временной структуры звукового поля с помощью метода спектрометрии временных задержек (СВЗ) продемонстрировало существенные преимущества метода особенно при измерении сигналов, слабых на фоне естественных шумов океана. Проведенные в этом направлении работы в 1984 г., частичные результаты которых приведены в [1], позволили в дальнейшем развить и совершенствовать методику.

В VII рейсе научно-исследовательского судна (НИС) "Академик Николай Андреев" и II рейсе НИС "Академик Борис Константинов" были выполнены исследования пространственно-временной структуры звукового поля с помощью разработанной Горьковским политехническим институтом (ГПИ) аппаратуры, реализующей метод СВЗ-сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналов).

В методе СВЗ зондирующим является сигнал с линейным изменением частоты с постоянной скоростью свипа. Это приводит к линейной связи временных задержек и частотных сдвигов сигналов, принимаемых по отдельным лучам. Преобразование временных характеристик звукового канала в частотную область проводится путем гетеродинирования принятого сигнала с использованием в качестве опорного сигнала, эквивалентного зондирующему, но задержанному на время, близкое к задержке сигналов в канале. Далее сигнал разностной частоты отфильтровывается с помощью фильтра низких частот, и подвергается спектральному анализу. В результате на спектрограмме получается спектр временных задержек сигналов.

Метод СВЗ в задачах подводной акустики имеет ряд преимуществ по сравнению с методами, основанными на использовании псевдослучайных последовательностей, которые традиционно используются в экспериментах по акустической то-

мографии [2]. Для измерений в зоне тени важна высокая помехозащищенность метода, достигаемая благодаря использованию ЛЧМ-сигналов со сложностью (произведением длительности сигнала на его полосу частот) 50 000 и более. Измерения на границе зоны тени в присутствии мощных каустических лучей доступны только для СВЗ метода, динамический диапазон которого превышает 80 дБ, что позволяет измерять слабые сигналы в присутствии сильных.

Сигнал с ЛЧМ-модуляцией излучался с НИС "Академик Борис Константинов" в моменты времени, определяемые устройством синхронизации по высокостабильному эталону времени (стабильность 10^{-11} с). На приемном судне "Академик Николай Андреев" сигналы с ненаправленных приемных систем подавались на комплекс аппаратуры СВЗ, с которого сигналы разностных частот поступали на спектроанализатор, управляемый мини-ЭВМ. Результаты анализа использовались для построения зависимостей уровня сигнала от его задержки, глубины и дистанции приема.

Исследования пространственно-временной структуры звукового поля были выполнены в районе Тихого океана западнее о. Гавайи. Профиль скорости звука и соответствующая ему лучевая картина для горизонта излучения 250 м представлены на рис. 1. При излучении ЛЧМ-сигналов с длительностью свипа 50 с в диапазоне частот 2 - 3 кГц был проведен горизонтальный разрез акустического поля. Излучатель буксировался со скоростью 5.5 - 6.0 узлов на глубине 250 м. Диапазон дистанций от излучателя до приемного судна - 15 - 36 км - соответствовал первой зоне тени. Прием производился на горизонтах приема 15, 250 и 500 м. В этом же районе были проведены вертикальные разрезы поля, в ходе которых ЛЧМ-сигналы регистрировались на нескольких

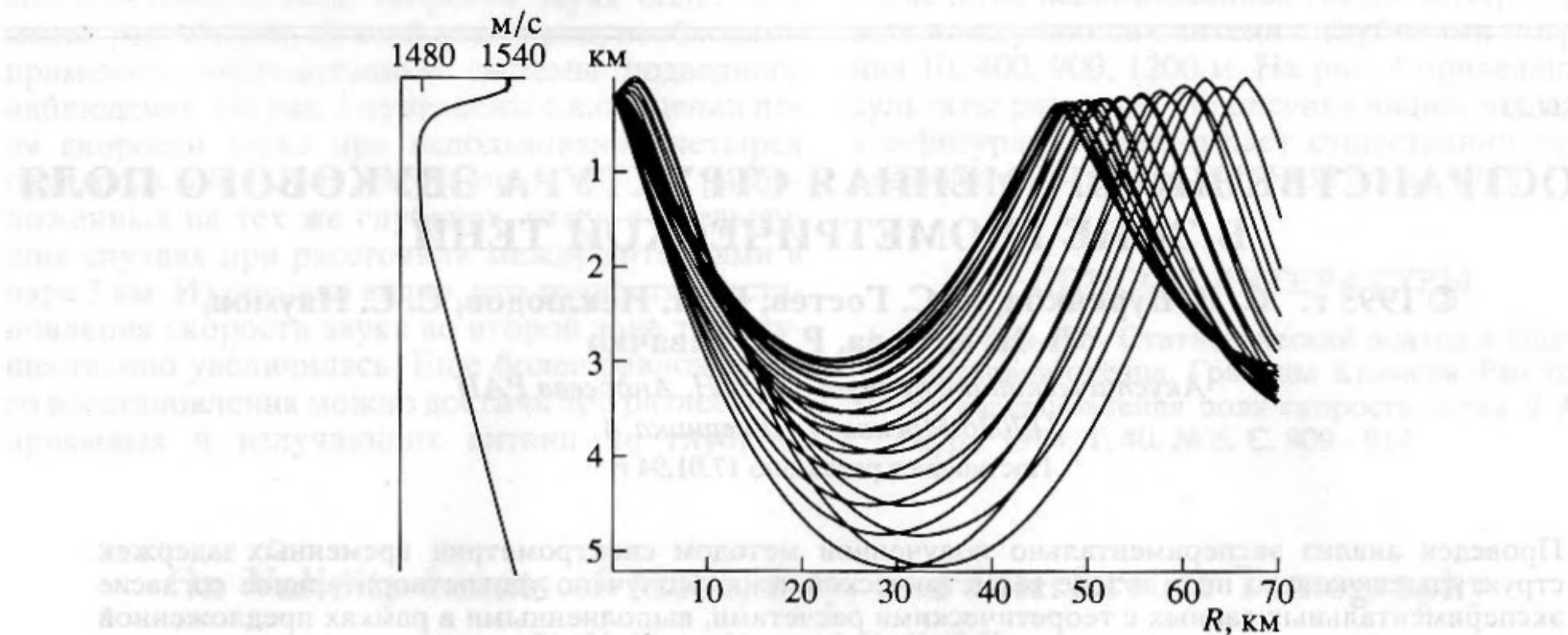


Рис. 1. Лучевая картина звукового поля в районе исследований.

горизонтах приема. Два звукоприемника располагались на фиксированных глубинах 15 - 40 м и 250 м, а третий звукоприемник перемещался от поверхности до максимальной глубины 1300 м с остановками для проведения измерений. Излучающая антенна располагалась на горизонте 400 м. Вертикальные разрезы поля были получены в диапазоне частот 1 - 2 кГц на средних дистанциях 15, 45 и 55 км. Полученные таким образом экспериментальные данные позволяют прояснить механизмы формирования звукового поля в первой зоне тени.

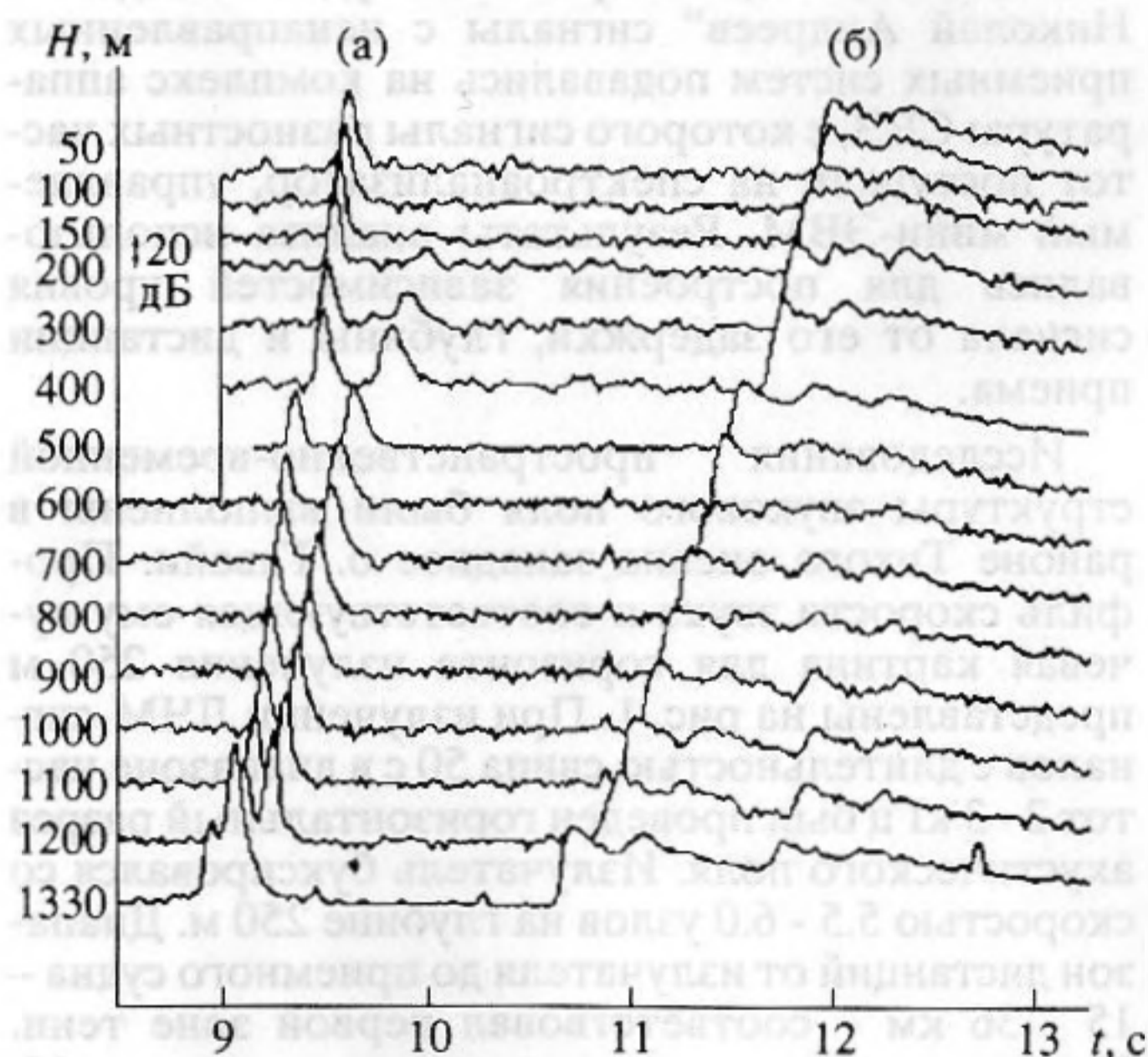


Рис. 2. Зависимости интенсивности принятого сигнала от времени, полученные методом СВЗ на вертикальном разрезе (дистанция 15 км): а - водные сигналы, б - донные сигналы.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости интенсивности принятого сигнала от времени при вертикальном разрезе поля в зоне тени на дистанции около 15 км, полученные методом СВЗ. Графики интенсивности изображены в децибельном масштабе и сдвинуты по вертикальной оси пропорционально глубине приема (точные значения глубины приведены около каждого графика). На рис. 2 ясно выделяются две группы сигналов - водные (а) и донные (б). Донные лучи имеют заметно большее время распространения и представляют собой обычную четверку лучей,

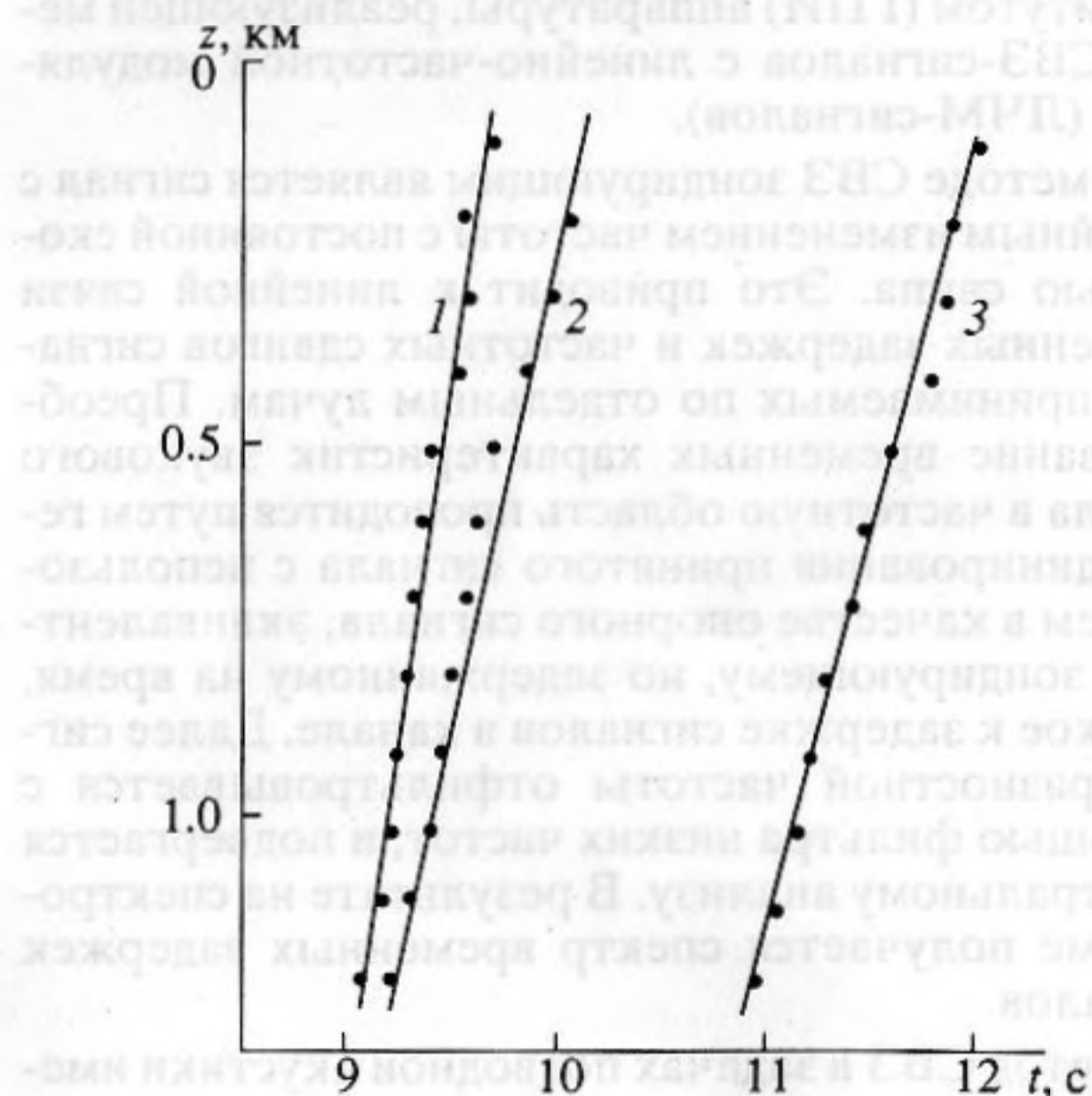


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений времени прихода звуковых сигналов в зону тени: 1 - ликвидж, 2 - водный сигнал, 3 - первый донный сигнал.

образованную близкими к поверхности коррелирующими точками (излучение – 400 м, прием – 50 - 1300 м, глубина океана 5200 - 5400 м). В первой водной группе можно выделить два четко локализованных по времени луча. Более поздний из этих лучей локализован в канале и затухает при приближении к поверхности. Другой приходит заметно раньше и по природе является ликиджем, распространяющимся в приповерхностном звуковом канале и, только в результате рассеяния в нем, проникающим в подводный звуковой канал.

В данном эксперименте реализовалась типичная пространственно-временная структура звукового поля в зоне геометрической тени, наблюдаемая во многих тропических районах Мирового океана. Предложенная ранее модель [1] интерпретации такой структуры достаточно хорошо объясняет особенности временных характеристик сигналов, проникающих в эту область по разным лучам. Описываемые экспериментальные данные дают возможность дополнительной проверки и подтверждения этой модели.

Как отмечено ранее, первым по времени прихода является ликидж, распространяющийся в приповерхностном канале и вследствие рассеяния проникающий в нижележащие слои. Свидетельством этого служат угловые, временные и энергетические характеристики, проанализированные по материалам экспериментов, проведенных ранее, в сходных условиях [3]. Расчет времени распространения ликиджа производится вдоль луча, выходящего из точки излучения под углом, обеспечивающим его касание нижней границы приповерхностного канала. Далее звук захватывается приповерхностным каналом и распространяется в нем, частично переизлучаясь из-за эффектов рассеяния в толщу. Время распространения на последнем участке вычисляется вдоль луча, выходящего от горизонта нижней границы приповерхностного канала под нулевым углом и попадающего в точку приема.

Способ расчета времени прихода второго водного сигнала подробно рассмотрен в работе [1] и заключается в определении "стационарных точек" или точек медленного изменения фазы звуковых сигналов, переотраженных под углом зеркального отражения слоистыми неоднородностями толщи и попадающих в точку прием. Второй, более простой, но менее корректный способ расчета времени распространения водного сигнала основан на предположении, что в области каустики, формирующейся в ближней озвученной зоне, возникает сильный рассеянный сигнал в толще океана и максимум его интенсивности соответствует направлению зеркального отражения от горизонтально протяженных тонкоструктурных неоднородностей. Результаты расчетов обоими

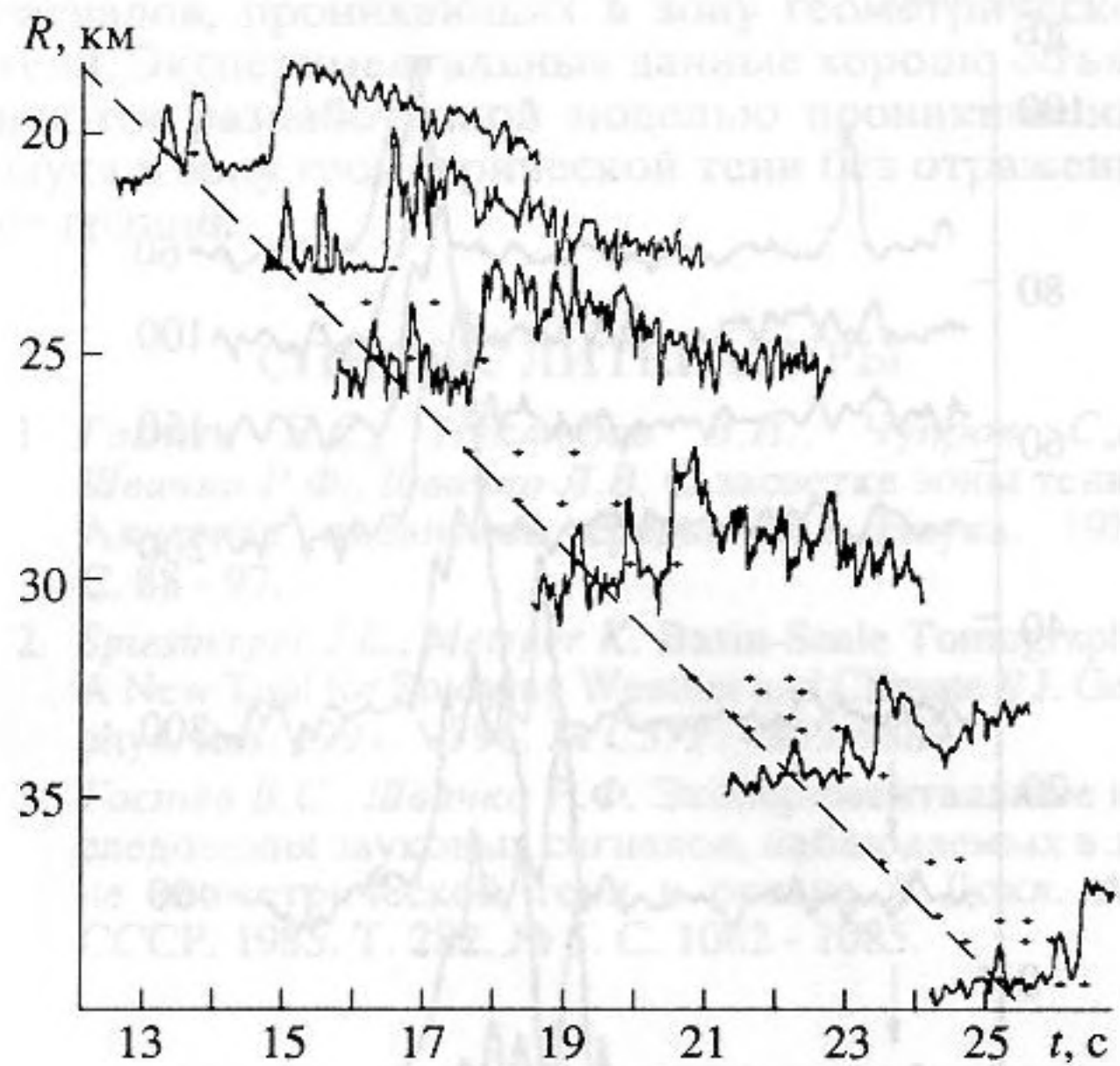


Рис. 4. Зависимости интенсивности принятых сигналов от времени на горизонте приема 500 м при различных расстояниях от источника. Крестик – положение максимумов интенсивности сигналов на других дистанциях.

способами совпадают с разницей 2 - 5 мс. Время распространения донных лучей (вторая группа лучей на рис. 2) вычислялось по обычной лучевой программе.

На рис. 3 представлены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений времени прихода звуковых сигналов к приемнику в зоне тени. На нем в том же временном масштабе, что и на рис. 2, изображены расчетные значения времени прихода ликиджа, водного и первого донного сигналов. Они рассчитаны в зависимости от глубины приемной системы с учетом ее смещения по дистанции с 13.9 до 14.4 км, произошедшего за время эксперимента, длившегося около часа. Точки соответствуют экспериментально измеренным значениям времени прихода соответствующих сигналов, отсчитываемым по максимумам уровней на рис. 2. В эксперименте наблюдалось изменение уровней ликиджа и водного сигнала в зависимости от глубины приемника. Максимальный уровень ликиджа соответствовал глубине 15 м, т.е. приповерхностному каналу, водный сигнал отсутствовал на верхних горизонтах приема и появлялся, начиная с глубин больше 200 м. Эти особенности хорошо объясняются предложенной моделью проникновения сигналов в зону тени.

Результаты анализа временной структуры звукового поля в зоне тени на горизонтальном разрезе, полученной при равномерной протяжке излучателя на глубине 250 м в диапазоне дистанций 15 - 36 км, также хорошо подтверждают предложенную модель явления. На рис. 4 показаны

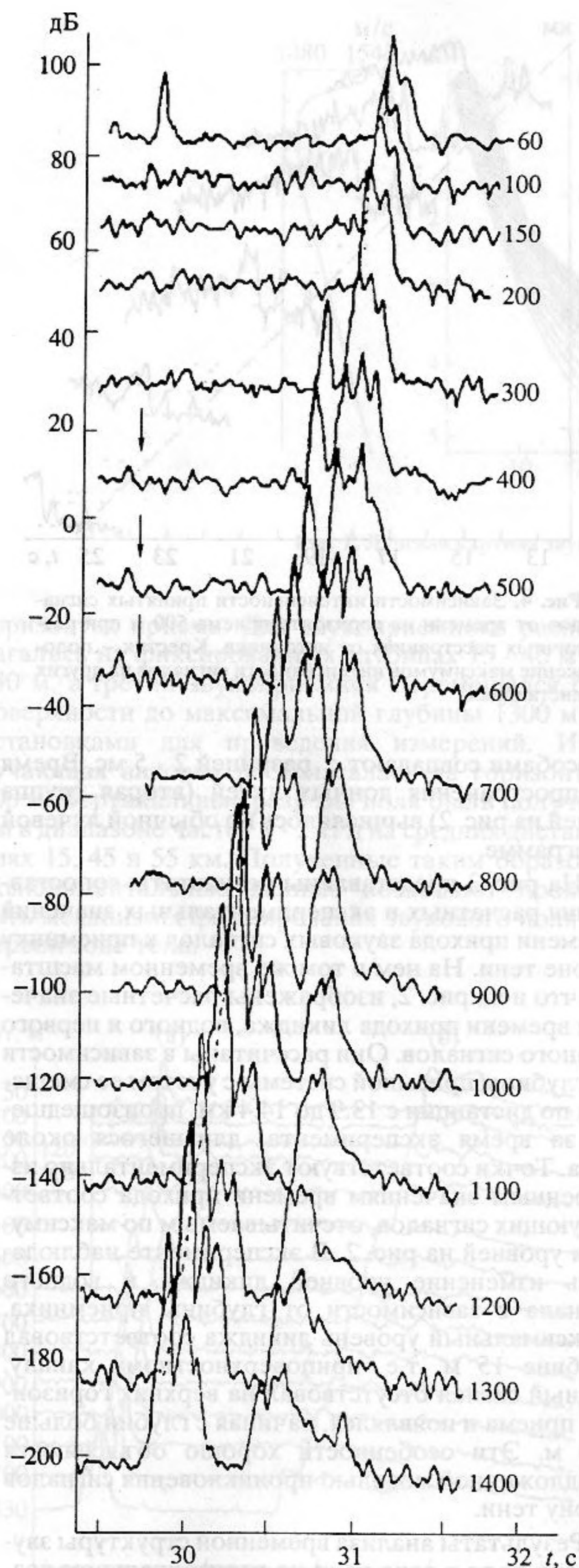


Рис. 5. Зависимость интенсивности ЛЧМ-сигнала от времени при вертикальном разрезе звукового поля в конце зоны тени (дистанция 45 км). Справа от кривых указаны горизонты приема в метрах.

зависимости интенсивности принятых сигналов от времени, полученные методом СВЗ на горизонте приема 500 м на различных расстояниях от излучателя. Видно, что временная структура поля, как и в предыдущем случае, определяется приходами ликиджа, водного и донных сигналов. Проведенное сопоставление измеренных и рассчитанных времен прихода сигналов показало их хорошее соответствие.

Результаты измерения временной структуры акустического поля в конце первой зоны тени, представлены на рис. 5 для горизонтов приема от 1400 до 60 м. Расстояние между источником и приемником изменялось со скоростью 0.2 м/с и составило для горизонта 1400 м - 44.5 км, а для горизонта 300 м - 45.5 км. ЛЧМ-сигнал со свипом от 1000 до 2000 Гц со скоростью 20.58 Гц/с излучался на горизонте 250 м. Обработка сигнала разностной частоты производилась в полосе 100 Гц с усреднением по 10-ти реализациям длительностью 2.5 с (для данных рис. 5).

Расчет лучевой структуры поля показал следующее. В указанном диапазоне дистанций 44.5 - 45.5 км на больших глубинах приема (свыше 250 - 300 м) первыми регистрировались два водных сигнала, вышедшие из точки излучения вверх и вниз и пришедшие на приемник снизу одновременно. На рис. 5 этот сигнал виден на глубинах от 300 до 1400 м и пропадает на горизонтах выше 250 м, что соответствует расчету. Следующей по времени следовала четверка донных сигналов, для которых с уменьшением глубины приема интервалы времен прихода между отдельными сигналами уменьшались. На приповерхностных горизонтах приема четыре донных сигнала сливались в два.

Интересным фактом является наличие приповерхностного ликиджа на верхних горизонтах приема, выше 70 м. Время прихода этого ликиджа опережало приход донных сигналов на 1.3 с, что связано с его распространением в приповерхностном канале в области большей скорости звука (до 1540 м/с). Приповерхностный ликидж также устойчиво наблюдался в течение всего времени измерений на горизонте приема 15 м. По мере заглубления приемной системы и после выхода ее из приповерхностного канала (глубины около 70 м) ликидж практически исчезал в шумах на глубинах от 100 до 400 м. На горизонте 500 м и глубже его все-таки можно было выделить над уровнем шума даже на дистанции 45.5 км (на рис. 5 показаны стрелками). При горизонтальной протяжке излучателя на звукоприемнике на горизонте 500 м ликидж устойчиво наблюдался до дистанции 40 км (нижняя кривая на рис. 4). Связано это с тем, что чем меньшее расстояние звук проходит в приповерхностном канале, тем на большую глубину он проникает на фиксированном расстоянии от излучателя. Поскольку основное затухание

звука происходит при его распространении в приповерхностном канале (из-за рассеяния на взволнованной поверхности), то более короткий путь пробега в канале обеспечивает более высокий уровень интенсивности звука, проникающего в толщу. Таким образом, захват звуковой энергии приповерхностным каналом и ее распространение по каналу на достаточно большие расстояния приводит к засветке практически всей зоны геометрической тени в килогерцовом диапазоне частот. Исключение составляет небольшая область малых глубин под приповерхностным каналом на расстояниях от излучателя, превышающих 35 - 40 км.

Приведенные данные демонстрируют высокую эффективность метода СВЗ при исследовании тонкой пространственно-временной структуры звукового поля в глубоком океане. Этот метод позволяет регистрировать всю совокупность

сигналов, проникающих в зону геометрической тени. Экспериментальные данные хорошо объясняются разработанной моделью проникновения звука в зону геометрической тени без отражения от границ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Spiesberger J.L., Metzger K. Basin-Scale Tomography: A New Tool for Studying Weather and Climate // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № С3. P. 4869-4889.
3. 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.

Time-Space Structure of the Sound Field in the Geometric Shadow Zone

S. V. Burenkov, V. S. Gostev, V. I. Neklyudov, S. S. Naumov,
L. N. Nosova, and R. F. Shvachko

This paper presents an analysis of the experimental time structure of the sound field in the geometric shadow zone performed by time delay spectrometry. A reasonable agreement of the experimental and theoretical data has been achieved in the proposed model of leakage of sound into the shadow zone without boundary reflections.