АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1999, том 45, № 6, с. 857–860

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.222

НЕКОТОРЫЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕМНОЙ ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИИ В ГЛУБОКОМ ОКЕАНЕ

© 1999 г. В. С. Гостев, Р. Ф. Швачко

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 24.12.98 г.

Вводится расширенное понятие предреверберации как более раннего, чем следует из классических представлений, прихода акустических сигналов, предваряющих основные зональные приходы во временной (собственно предреверберация) и в пространственной (размытие границ зон конвергенции) областях. Для объяснения экспериментально наблюдаемых эффектов объемной предреверберации используется модель рассеяния звука на тонкоструктурных и турбулентных неоднородностях показателя преломления в каустических зонах. Для расчетных оценок времен предреверберации разработаны кинематические модели, использующие билинейный профиль скорости звука.

Явление предреверберации впервые было обнаружено Н.В. Студеничником в 1961 г. в Черном море [1]. Заключается оно в том, что перед приходом рефрагированных в волноводе сигналов наблюдается звуковой фон, нарастающий со временем и достигающий максимума в момент прихода основного сигнала. Дальнейшие исследования позволили установить, что предреверберация наблюдается только в том случае, если сигнал распространяется по лучу, совершившему хотя бы один цикл около оси подводного звукового канала или отразившемуся не менее одного раза от поверхности при распространении в приповерхностном канале. Предреверберация отсутствует для сигнала, распространяющегося по граничному лучу, касающегося дна или нижней границы приповерхностного канала. Время предреверберации растет с удалением от источника и на расстояниях в сотни километров составляет десятки миллисекунд в подводном звуковом канале и сотни в приповерхностном. Относительно природы предреверберации высказывалось предположение, что она обусловлена рассеянием звука в прямом направлении на неоднородностях среды или неровностях границ подводного звукового канала. В работе [2] была рассмотрена одна возможная модель предреверберации при рассеянии звука на взволнованной поверхности океана.

Проведенные нами экспериментальные исследования звукового поля в зонах тени (см., например, [3–5]) позволили предложить объяснение этого явления, основанное на учете звукового поля, переизлученного неоднородностями тонкой структуры в каустических зонах, концентрирующих энергию первичного поля и, таким образом, усиливающих наблюдаемые эффекты. Рассеяние звука на горизонтально протяженных плоскослоистых тонкоструктурных неоднородностях показателя преломления относится к классу резкоанизотропного рассеяния и характеризуется наличием двух остронаправленных максимумов – в прямом и зеркальном направлениях. Звуковая энергия, идущая по этим направлениям, попадая в зоны тени, приводит к их засветке, а попадая в зоны конвергенции – к явлению предреверберации (и реверберации). Поэтому мы предлагаем расширить понятие предреверберации, определяя ее как более ранний, чем следует из классических представлений, приход акустических сигналов, предваряющих основные зональные приходы. Она может наблюдаться как во временной области (собственно предреверберация), так и в пространственной (размытие границ зон конвергенции), поскольку засветка зон тени и собственно предреверберация – явления одной природы.

Экспериментальные исследования звукового поля взрывного источника в первой и второй зонах тени, описанные в работе [5], проводились в центральной части Индийского океана в условиях тропического распределения скорости звука с резким градиентом в слое скачка от 30 до 200 м (рис. 1). Подрывы зарядов и прием сигналов проводились на глубине 300 м (под слоем скачка). На рис. 1 приведена лучевая картина для этого случая, демонстрирующая зональный характер распространения и наличие каустик в звуковом поле. В качестве иллюстрации на границе ближней освещенной зоны и в начале первой зоны конвергенции в лучевую картину введены акты рассеяния (1 и 2 соответственно) на тонкоструктурных неоднородностях на горизонте 600 м. Этот горизонт выбран, исходя из распределения по глубине коэффициента

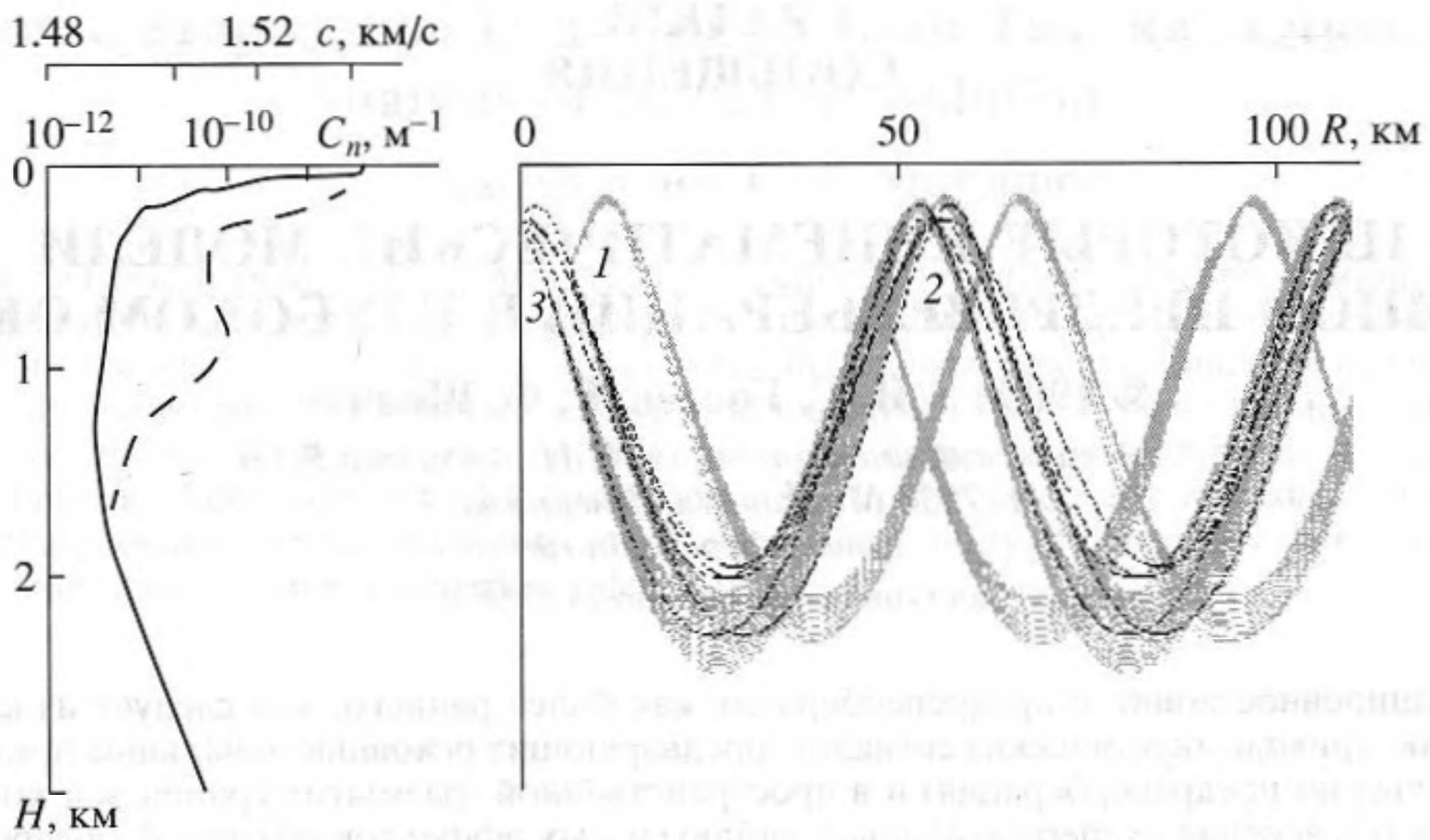

Рис. 1. Гидрологические условия и лучевая картина с актами рассеяния (для № 1 и 2 $\Delta\varphi = 0.6°$, для № 3 $\Delta\varphi = 1°$).

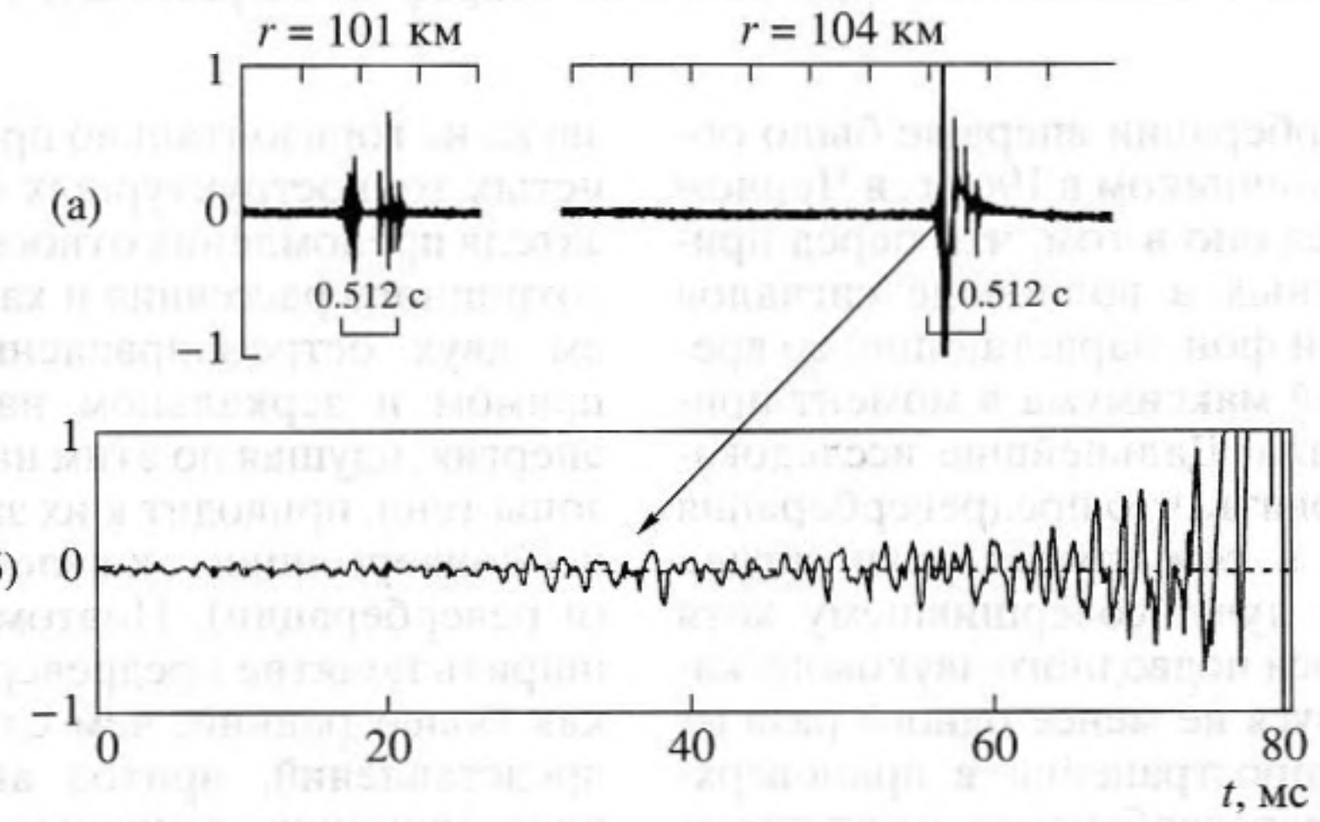

Рис. 2. Реализация взрывных сигналов на входе во вторую зону конвергенции.

C_n (штриховая линия в левой части рис. 1), входящего в выражение для спектральной плотности флуктуаций показателя преломления $E_n = C_n \kappa_z^{-2}$ (здесь κ_z – вертикальное волновое число неоднородностей) и характеризующего их интенсивность. Видно, что пучки рассеянных лучей заполняют зоны тени и зоны конвергенции. Ширина этих пучков (±0.6°) соответствует экспериментальной и расчетной оценкам полуширины индикатрисы рассеяния $\delta\varphi = 0.6°$ (по уровню 0.7 на частоте 1 кГц), проведенным для этих условий в работе [6].

На рис. 2а показаны реализации двух последовательных взрывных сигналов на входе во вторую зону конвергенции. На расстоянии 101 км (конец зоны тени) наблюдается рассеянный сигнал, переизлученный толщей в каустической области начала первой зоны конвергенции на глубинах залегания интенсивных тонкоструктурных неоднородностей, и двукратные донные отражения. На расстоянии 104 км (начало зоны конвергенции) видно, как между переизлученным толщей сигналом и донными отражениями появляется "прямой" сигнал, распространяющийся в зоне конвергенции по рефракционному лучу. Нарастание фронта (предреверберация) суммарного сигнала показано на рис. 2б, длительность его – несколько десятков миллисекунд. Размытие границы второй зоны конвергенции – порядка 3 км.

На рис. 3, взятом из [4], представлен горизонтальный разрез звукового поля на двух частотах (1.25 кГц – кривая *1*; 3.15 кГц – кривая *2*) на входе в первую зону конвергенции. Расчетная граница в волновом приближении определяется функциями Эйри (для частоты 1.25 кГц – кривая *3*, для частоты 3.15 кГц – кривая *4*). Размытие границ первой зоны конвергенции составляет в этом случае не менее

километра и характеризуется усредненными законами спада (прямая *5* – для частоты 1.25 кГц, прямая *6* – для частоты 3.15 кГц). Для объяснения полученного эффекта и его частотных зависимостей успешно была использована модель рассеяния на изотропных неоднородностях показателя преломления метрового диапазона. Эти неоднородности наиболее интенсивны в верхнем перемешанном слое и в однородных слоях тонкоструктурных образований со слабыми градиентами плотности. Акт рассеяния на таких неоднородностях изображен на рис. 1 под номером *3*.

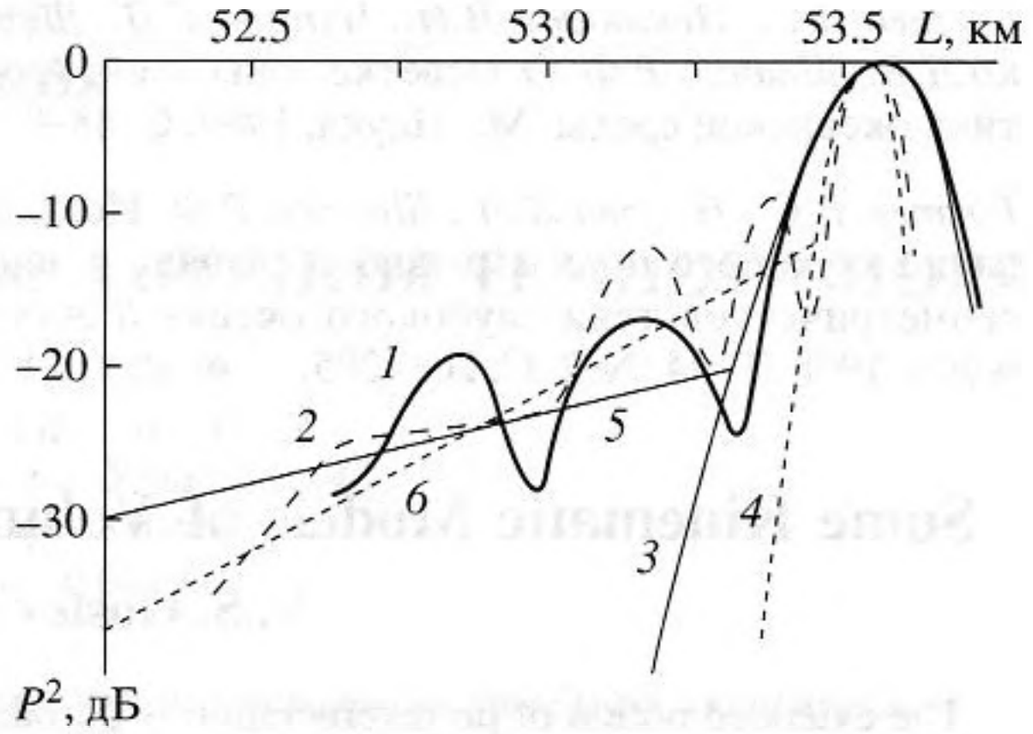

Рис. 3. Интенсивность звукового поля водных лучей на входе в первую зону конвергенции.

Для расчетной оценки наблюдаемых в океане эффектов предреверберации используем билинейную модель вертикального распределения скорости звука (рис. 4). Для начала напомним результаты такой оценки для приповерхностного канала, проведенной в работе [2]. Для этого случая (поверхность океана находится на нулевом горизонте) для разности времен прихода по лучам *1–1* и *2–2'* была получена формула $\delta t_{1.2} = T_0[1 - 4(r_1/r) + 4(r_1/r)^2]$, где $T_0 = a^2r^3/32c_0$, c_0 – скорость звука у поверхности, a – относительный градиент скорости звука. Эту формулу лучше записать в виде $\delta t_{1.2} = T_0(1 - 2r_1/r)^2$ или, перейдя от r_1 к углу рассеяния φ, в виде $\delta t_{1.2} = r\varphi^2/8c_0$. Для билинейной модели, имитирующей подводный звуковой канал, для разности времен прихода по лучам *4–4* и *5–5'* (рассеяние на тонкоструктурных неоднородностях происходит на оси канала) получается несколько более сложная формула $\delta t_{4.5} = (r\varphi^2/2c_0)[(H/h)/(1 + H/h)^2]$. Если в эту формулу подставить значение полуширины индикатрисы рассеяния $\delta\varphi = 0.6°$, то в первой зоне конвергенции на расстоянии $r = 57.6$ км ($H = 5$ км, $h = 1$ км, $a = 1.2 \times 10^{-5}$ м$^{-1}$) время предреверберации составит ~0.3 мс. Но с учетом боковых лепестков ширину эффективного угла рассеяния следует увеличить на порядок, что увеличит время предреверберации до ~30 мс. Во второй зоне конвергенции, согласно [2], оно будет вдвое больше, что хорошо соответствует экспериментальным данным, полученным Н.В. Студеничником. Здесь могут наблюдаться и дискретные составляющие предреверберационного сигнала, прошедшего, например, по лучам *4–4–4'* с зеркальным рассеянием на оси канала в первой зоне конвергенции. Для этого случая разность времен прихода по лучам *5–5–5–5* и *4–4–4'* на расстоянии R равна $\delta t_R = (a^2R^3/32c_0)[(H/h)/(1 + 2H/h)]^2$, что для $R = 104$ км составляет ~30 мс.

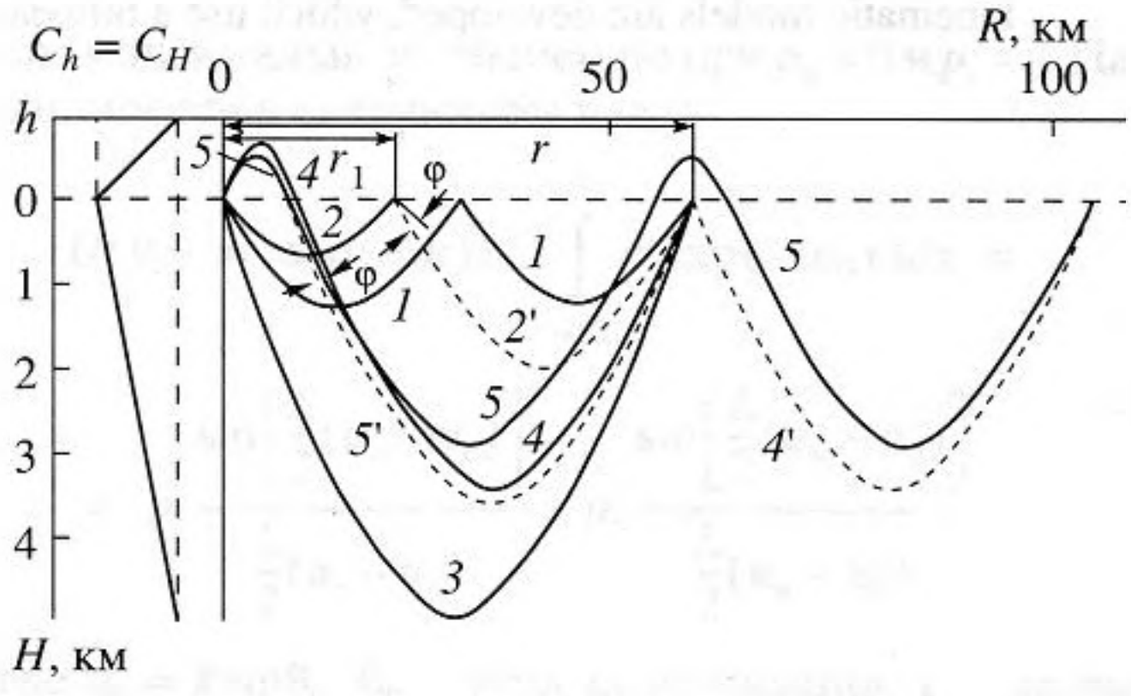

Рис. 4. Билинейная модель для расчета времен предреверберации.

Приведенные экспериментальные данные и расчетные оценки свидетельствуют о том, что явление предреверберации (в широком смысле слова) может объясняться не только рассеянием звука поверхностью океана, но и его переизлучением в океанской толще на тонкоструктурных и турбулентных неоднородностях скорости звука. Предреверберация несет полезную информацию о характеристиках рассеивателей и может быть использована в системах акустического мониторинга неоднородностей океана и для определения их пространственных спектров аналогично тому, как это делается в [7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код № 98-05-64302).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Студеничник Н.В.* Явление предреверберации в подводном звуковом канале // IX всесоюзная акустическая конференция. Секция Д. М.: АКИН, 1977. С. 45–48.
2. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В.* К теории предреверберации звука в океане // Докл. АН СССР. 1975. Т. 239. № 1. С. 211–213.
3. *Гостев В.С., Швачко Р.Ф.* Экспериментальные исследования звуковых сигналов, наблюдаемых в зонах геометрической тени // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282. № 5. С. 1082–1085.

4. *Гостев В.С., Неклюдов В.И., Чупров С.Д., Швачко Л.В., Швачко Р.Ф.* О засветке зоны тени. Акустика океанской среды. М.: Наука, 1989. С. 88–97.

5. *Гостев В.С., Носова Л.Н., Швачко Р.Ф.* Исследование звукового поля взрывного сигнала в зонах геометрической тени глубокого океана // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 2. С. 201–205.

6. *Гостев В.С., Носова Л.Н., Швачко Р.Ф.* О некоторых возможностях акустической диагностики тонкоструктурных неоднородностей в океане // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 844–847.

7. *Ewart T.E., Reynolds S.A., Rouseff D.* Obtaining of ocean index of refraction spectrum from the acoustic amplitude fluctuations // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100. № 4. Pt. 2. P. 2666(A).

Some Kinematic Models of Volume Prereverberation in the deep Ocean

V. S. Gostev and R. F. Shvachko

The extended notion of prereverberation is introduced as an earlier arrival of acoustic signals than it follows from classic representations, which forestall main zonal arrivals in temporal (prereverberation proper) and spatial (smearing of the convergence zone boundaries) domains. For the interpretation of experimentally observed effects of volume prereverberation, we use a model of sound scattering by fine-structured and turbulent inhomogeneities (refractive index fluctuations) in caustic zones. For numerical estimates of prereverberation times, kinematic models are developed, which use a bilinear sound velocity profile.