

## ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА БИСТАТИЧЕСКОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ ПРИ ДАЛЬНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЗРЫВНЫХ СИГНАЛОВ

© 2007 г. Р. А. Вадов

*Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН*

*117036 Москва, ул. Шверника 4*

*E-mail: vadov@akin.ru*

Поступила в редакцию 29.10.05 г.

При проведении опытов по дальнему распространению взрывных сигналов неоднократно наблюдалось зашумление классических четверок. Шумовой фон появлялся, плавно нарастая перед приходом к приемнику первого сигнала четверки, и спадал, исчезая полностью, после прихода последнего сигнала этой же четверки. Рассматриваются результаты одного из опытов, проведенных в зимних условиях в северо-западной глубоководной части Тихого океана. На материалах этого опыта иллюстрируется обсуждаемое явление и показывается, что зашумленность четверки сигналов является проявлением бистатической реверберации, обусловленной рассеянием звука на взволнованной поверхности океана в направлении приемника, находящегося на значительном удалении от источника. Предлагается методика расчета временных соотношений между прямым сигналом и сигналом поверхностной реверберации, легко реализуемая на практике. Проводятся расчеты временной структуры сигнала бистатической поверхностной реверберации, поясняющие наблюдаемые особенности этого явления.

PACS: 43.30.Cq, 43.30.Gv, 43.30.Lz

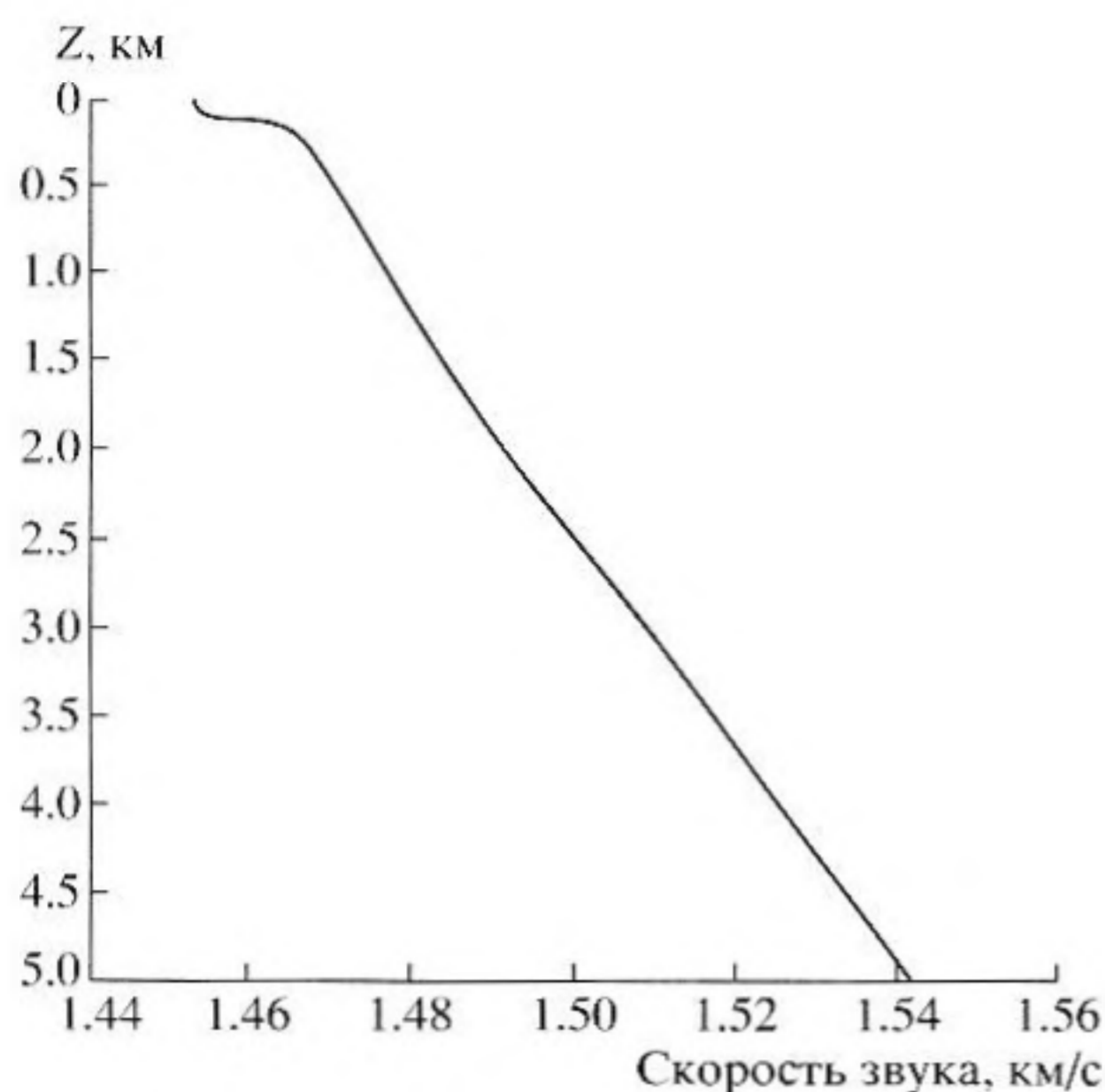
Рассеяние звука на неоднородностях морской среды, неровном дне, взволнованной поверхности океана проявляется при проведении многих гидроакустических опытов. Рассеянный сигнал регистрируется и при проведении опытов по дальнему распространению, когда расстояние между источником и приемником составляет десятки–сотни км. В зависимости от гидрологических, метеорологических условий, характера неровностей дна рассеянный сигнал может быть различным по своему уровню, а также сопутствуя прямому сигналу, появляться не только вслед за ним, но и перед его приходом в точку приема. В зависимости от уровня шумовой помехи он может регистрироваться или быть незамеченным.

При канальном распространении акустических сигналов в океане во временной структуре звукового поля формируются отдельные четверки сигналов [1, 2]. В опытах по дальнему распространению взрывных сигналов при исследовании временной структуры звукового поля неоднократно наблюдалась зашумленность этих четверок [3, 4]. Шумовой фон заметно возрастал перед приходом первого сигнала четверки и спадал, исчезая полностью, после прихода последнего сигнала четверки. При этом отмечалось, что уровень шумового фона в четверках сигналов, формирующихся при участии поверхности океа-

на, заметно превышал уровень зашумленности четверок чисто водных (не касающихся дна – поверхности) сигналов [5]. Уровень шумового фона в первом случае существенно зависел от состояния морской поверхности, что дает основание рассматривать рассеяние на взволнованной поверхности моря в качестве основного источника наблюдаемого в этих опытах шумового фона.

В конце 60-х гг. шумовому сигналу, предшествующему каждому из сигналов четверки, было дано название “предреверберации” [6]. Внимание было обращено на ту часть шумового реверберационного фона, которая предшествовала прямому сигналу. При этом считалось вполне естественным появление реверберационного сигнала вслед за прямым сигналом и необычным – его появление перед приходом в точку приема основного – прямого сигнала. Внимание также акцентировалось на том, что “предреверберация” наблюдалась в большинстве опытов по дальнему распространению взрывных сигналов, проведенных в различных регионах Мирового океана. На основе анализа экспериментальных данных констатировалось [6, 7]:

– “предреверберация” наблюдается только в том случае, если сигнал распространяется по лучу, совершившему хотя бы один полный цикл около оси канала или отразившемуся не менее од-



**Рис. 1.** Профиль изменения скорости звука с глубиной, зарегистрированный при проведении зимнего эксперимента по распространению взрывных сигналов в северо-западной части Тихого океана.

ного раза от поверхности океана (при распространении в приповерхностном канале);

- для сигнала, распространяющегося по граничному (касающемуся дна или нижней границы приповерхностного канала) лучу, “предреверберация” отсутствует;

- интенсивность “предреверберации” нарастает к моменту прихода основного сигнала и обычно превышает интенсивность реверберации (следующей за основным сигналом);

- относительный уровень “предреверберации”, а также ее продолжительность растет с увеличением расстояния.

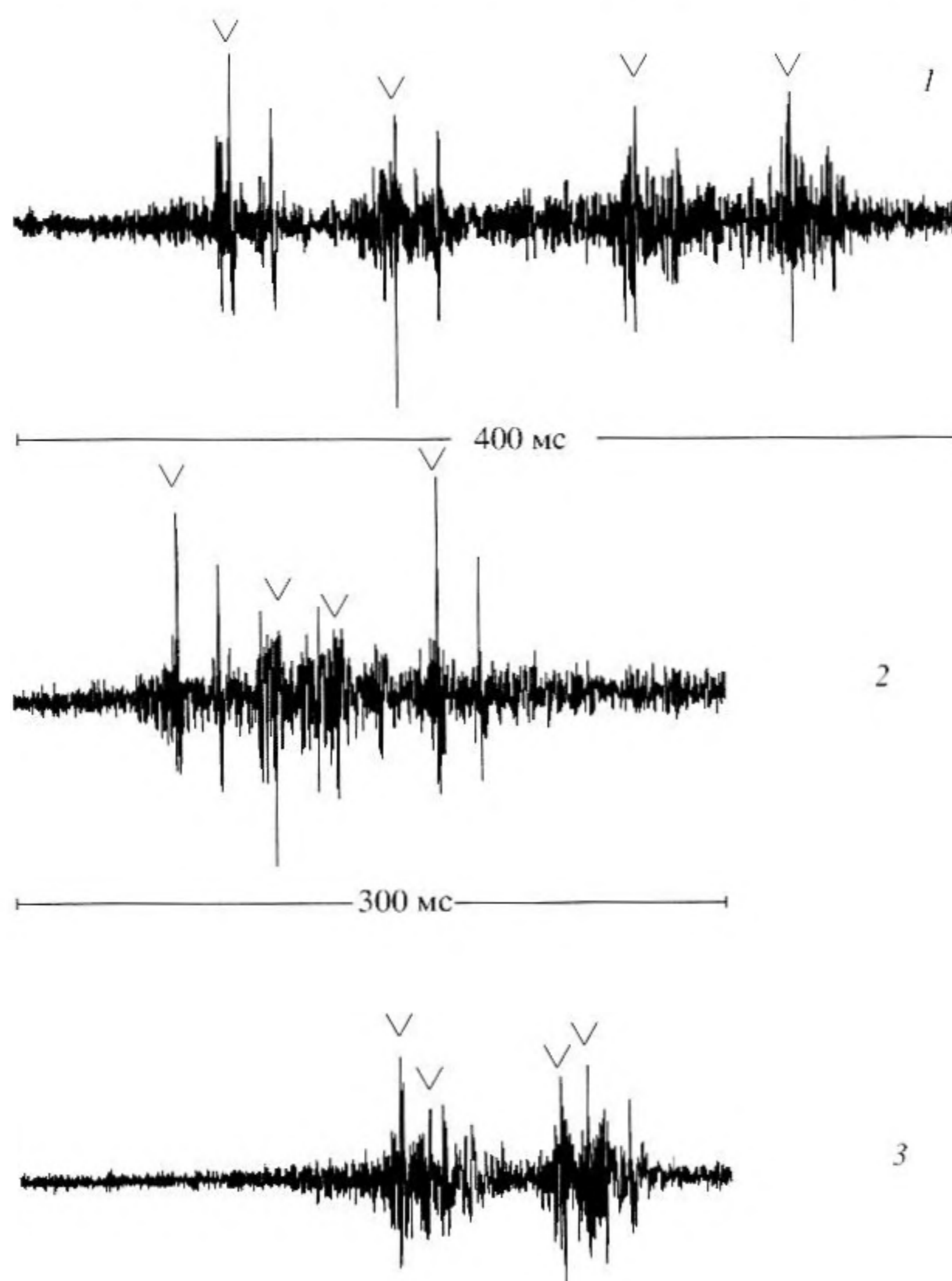
В конце 70-х гг. были произведены теоретические оценки положения сигнала “предреверберации” относительно прямого сигнала для идеализированного приповерхностного звукового канала (положительный градиент скорости звука от поверхности до дна, равный гидростатическому) при расположении источника и приемника непосредственно у поверхности [7]. Теоретически было получено соотношение, определяющее время опережения “предреверберации” (обусловленной рассеянием звука на взволнованной поверхности океана) относительно прямого (зеркально отраженного от поверхности) сигнала.

Вопрос о временных соотношениях, формируемых между прямым и реверберационным сигналом в реальных гидрологических условиях при дальнем распространении, представляет несомненный интерес. Анализ этих соотношений и посвящена данная работа.

Рассмотрим результаты одного из экспериментов, проведенных в зимних (декабрь месяц) условиях в глубоководном районе (глубина места ~5500 м) северо-западной части Тихого океана. Благодаря осенне-зимнему охлаждению приповерхностных вод в регионе сформировался приповерхностный звуковой канал. Профиль изменения скорости звука с глубиной, зарегистрированный при проведении опыта, представлен на рис. 1. Во время проведения опыта скорость ветра достигала 8–10 м/с, его направление относительно трассы распространения составляло ~45°. Волнение оценивалось в 3–4 балла. В качестве источника звука использовались малые заряды ВВ – детонаторы гидростатического действия. Подрывы осуществлялись на глубине 150 м. Прием взрывных сигналов производился на ненаправленные системы, расположенные на горизонтах 20, 100 и 500 м. Полоса частот при приеме, регистрации и преобразовании сигналов из аналоговой в цифровую форму составляла 50–2500 Гц. На рис. 2 приведены сигналы классической четверки, пришедшие первыми к приемной системе на расстоянии 98 км от источника.

Уместно будет напомнить, что взрывной сигнал, принятый в полосе частот от 10–20 Гц до 1–2 кГц с дистанции 10–20 км и более в условиях однолучевого распространения, представляет собой во временной области два кратковременных (длительностью <1 мс) импульса, равных по величине, одного и того же знака (ударная волна и первая пульсация газового пузыря). Расстояние между ними соответствует периоду первой пульсации газового пузыря (период пульсации в данном опыте составил около 18 мс). В условиях многолучевого приема каждому лучу во временной структуре взрывного сигнала соответствует своя пара таких импульсов. На рис. 2 галочками (знаком “v”) сверху помечена ударная волна в каждом из принятых элементарных (однолучевых) сигналов. Соответствующие им импульсы первой пульсации пузыря следуют за ударной волной с 18-миллисекундным интервалом.

Элементарные сигналы четверки, принятой и зарегистрированной в данном опыте на расстоянии 98 км от источника, различаются траекториями их распространения от источника к приемнику. Лучевая картинка, поясняющая их различия, представлена на рис. 3. Первым к приемнику приходит сигнал, распространяющийся вдоль лучевой траектории, касающейся поверхности лишь один раз (на расстоянии от источника ~50 км). Затем приходят два сигнала – каждый из них дважды коснувшийся поверхности: один раз вблизи от источника или приемника и один раз на расстоянии от них ~50 км. Последним приходит сигнал, коснувшийся поверхности трижды (по разу у источника и у приемника, а также на расстоянии от них ~50 км). В зависимости от горизонта приема



**Рис. 2.** Фрагменты временной структуры взрывного сигнала (первая четверка элементарных сигналов), принятого и зарегистрированного на расстоянии 98 км от источника. Глубины приема: 500 м (1), 100 м (2) и 20 м (3). Глубина подрыва заряда 150 м.

эти сигналы лучше или хуже разделяются между собой. Лучше разделяются при расположении приемного гидрофона на глубине 500 м, хуже разделяются пары сигналов при расположении гидрофона на глубине 100 м (второй и третий сигнал в четверке) и на горизонте 20 м (первый и второй, а также третий и четвертый).

Пришедший первым в точку приема сигнал дважды развернулся (рефрагировал) на большой глубине (3300–3500 м) и только один раз отразился от поверхности океана. На всех горизонтах приема перед ним зарегистрирован нарастающий во времени шумовой фон. После прихода прямого сигнала этот фон снижается. Заметное его снижение хорошо просматривается на отдельных парах элементарных сигналов, принятых на горизонте 20 м.

Используя материалы этого же эксперимента, нетрудно показать, что шумовой фон обусловлен рассеянием звука на взволнованной поверхности океана. Для этого достаточно проанализировать запись первой четверки элементарных сигналов, принятых на расстоянии 52 км от источника (см. рис. 4). На этой дистанции первым к приемнику приходит сигнал, развернувшийся (рефрагированный) на большой глубине всего лишь один раз и ни разу не коснувшийся поверхности. Никакого более или менее заметного шумового фона, ни предшествующего сигналу, ни последующего за ним, не наблюдается. В то же время за каждым из трех остальных элементарных сигналов четверки следует плавно спадающий во времени шумовой (реверберационный) фон. Обращает на себя внимание, что вопреки выводам, сделанным в работах [3, 4], никакого нарастающего шумового фо-

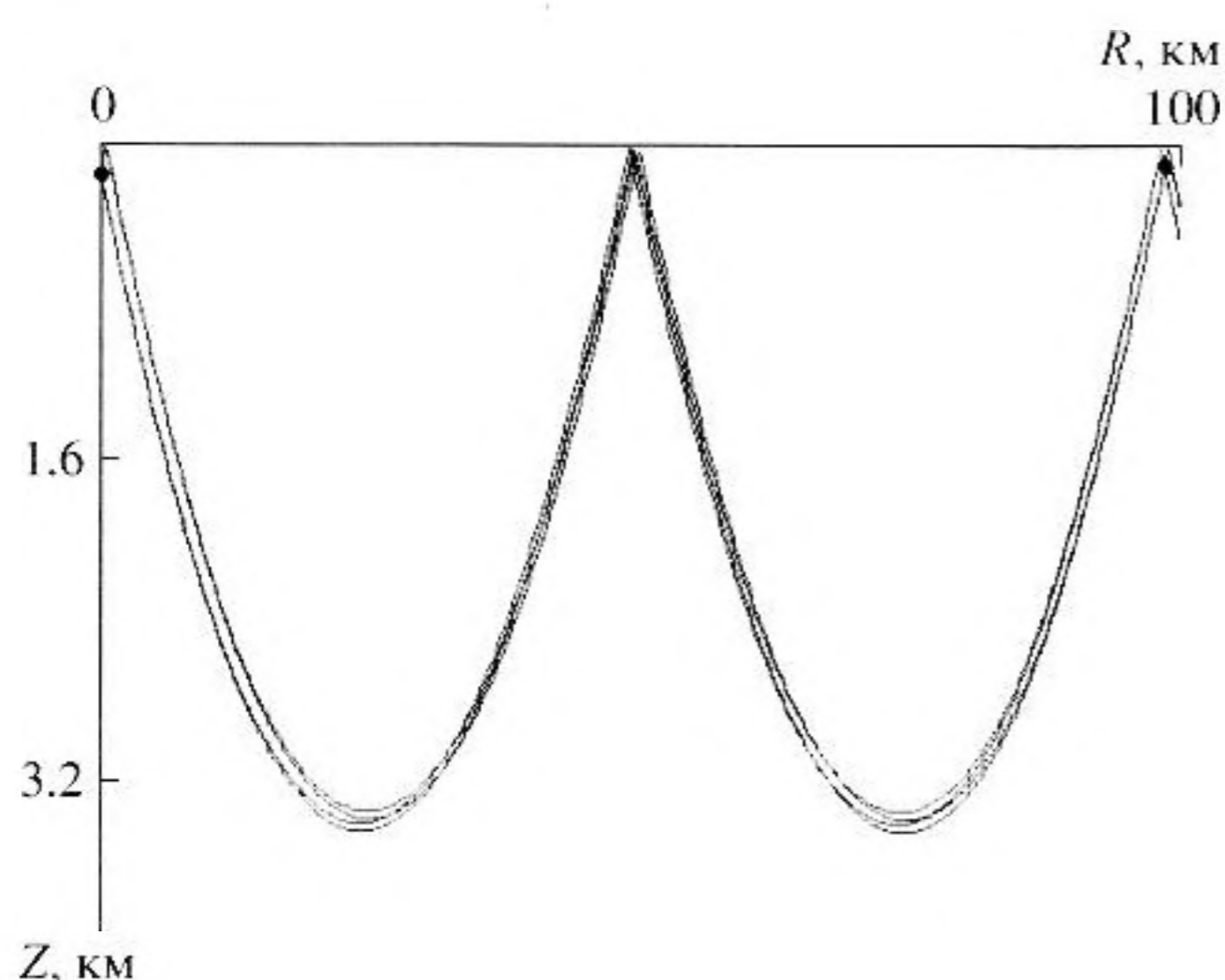


Рис. 3. Лучевая картинка, поясняющая пути распространения сигналов первой четверки от источника к приемнику, расположенному на глубине 100 м, на расстоянии 98 км от него. Глубина подрыва заряда 150 м.

на перед каждым из этих сигналов также не наблюдается. Три последних сигнала в этой четверке в отличие от первого имели: второй и третий по одному, четвертый – два отражения от взволнованной поверхности океана.

В чем причина такого различия в характере реверберационного (рассеянного на поверхности) сигнала, зарегистрированного на расстоянии 52 и 98 км от источника?

Для ответа на этот вопрос была проведена серия расчетов. Расчеты элементов звукового поля

проводились в лучевом приближении в предположении горизонтальной слоистости океана по программе В.П. Тебякина [8].

Полагая вполне приемлемым следование реверберационного сигнала непосредственно за прямым (реверберационный сигнал, формируемый за счет рассеяния на участках поверхности, расположенных в непосредственной близости к источнику или приемнику приходит в точку приема с запаздыванием относительно прямого сигнала), основное внимание мы обратили на объяснение реверберационного сигнала, предшествующего прямому сигналу. Такой сигнал наблюдался на расстоянии 98 км и отсутствовал на расстоянии 52 км от источника.

Для описания угловой зависимости коэффициента рассеяния мы воспользовались такой характеристикой, как индикатриса рассеяния звука [9, 10, 11]:  $D_p(\Delta\theta, \varphi)$ , где  $\Delta\theta$  – отклонение рассеянного сигнала от зеркального направления в вертикальной плоскости,  $\varphi$  – отклонение в горизонтальной плоскости.

При расчетах помимо зеркального отражения от поверхности океана рассматривались сигналы, отраженные (рассеянные) под углами, отличными от зеркального в пределах изменений значений  $\Delta\theta$  от  $-4^\circ$  до  $+4^\circ$  при  $\varphi = 0^\circ$ . Для того чтобы реверберационный сигнал сопутствовал сигналу, зеркально отраженному от поверхности, необходима засветка поверхности океана прямыми сигналами, аналогичными (по конфигурации траектории распространения) основному сигналу. Естественно, в формировании реверберационного сигнала участвует поверхность океана, соот-

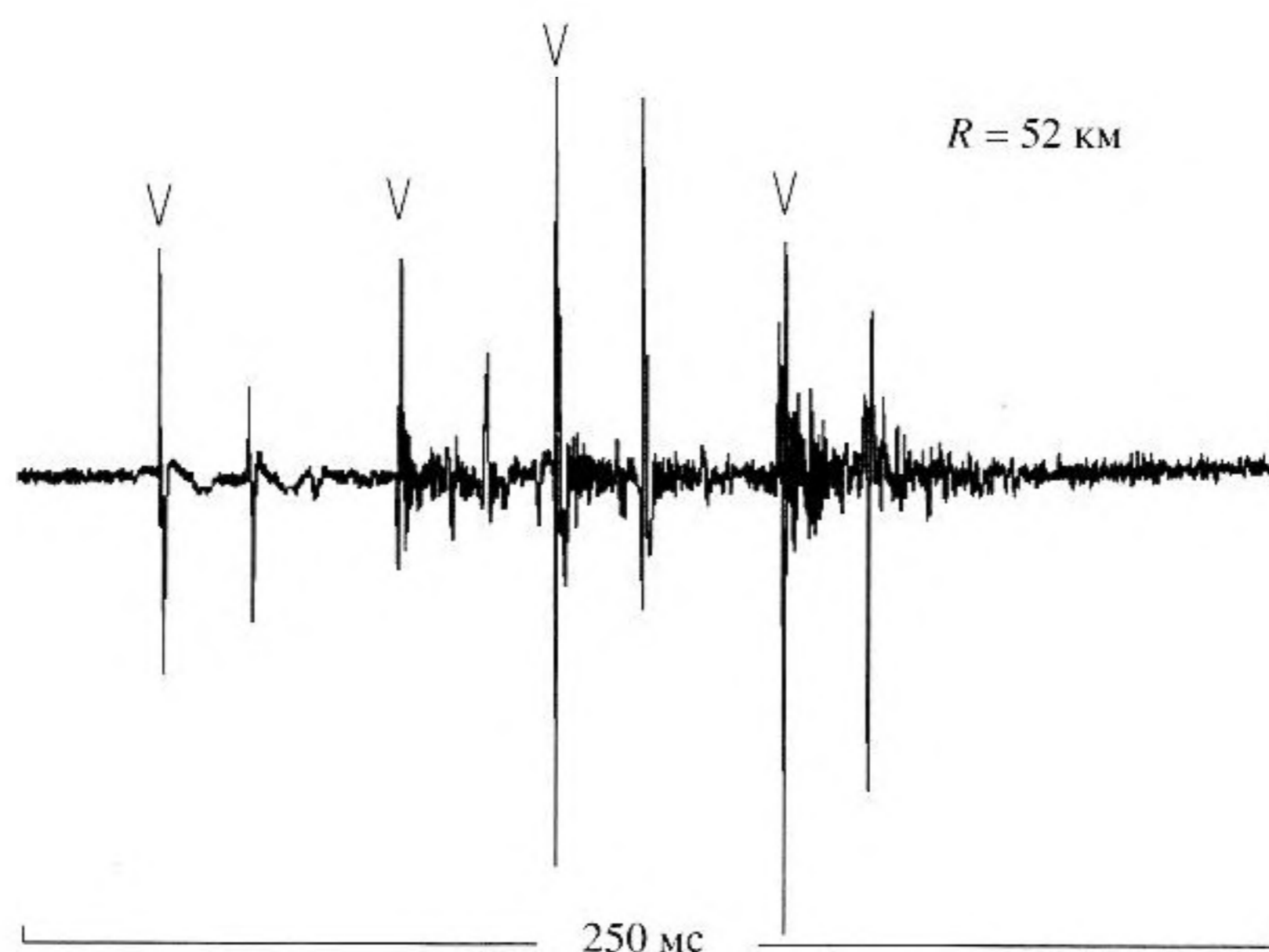


Рис. 4. Фрагменты временной структуры взрывного сигнала (первая четверка элементарных сигналов), принятого и зарегистрированного на расстоянии 52 км от источника. Глубина подрыва заряда 150 м. Глубина расположения приемника 100 м.

**Таблица 1.** Результаты расчета времен распространения сигнала, отразившегося не зеркально от поверхности океана ( $\varphi = \text{const} = 0$ ). Расстояние между источником и приемником 98 км

Гл. ист. = 150 м, гл. пр. = 0 м			Гл. ист. = 100 м, гл. пр. = 0 м			Результирующие:		
$R_1$ , км	$\theta_1$ , град	$\tau_1$ , с	$R_2$ , км	$\theta_2$ , град	$\tau_2$ , с	$\Delta\theta$ , град	$\tau_1 + \tau_2$ , с	$\Delta\tau$ , мс
40	13.9889	27.1541	58	18.8024	39.0337	-4.8135	66.1878	65.9
41	14.4167	27.8213	57	18.5422	38.3818	-4.1255	66.2031	50.6
42	14.8279	28.4873	56	18.2830	37.7289	-3.4551	66.2162	37.5
43	15.2164	29.1520	55	18.0253	37.0748	-2.8089	66.2268	26.9
44	15.5909	29.8155	54	17.7693	36.4197	-2.1784	66.2352	18.5
45	15.7790	30.4780	53	17.5144	35.7639	-1.7354	66.2419	11.8
46	15.9300	31.1400	52	17.2617	35.1073	-1.3317	66.2473	6.4
47	16.1248	31.8016	51	17.0124	34.4497	-0.8876	66.2513	2.4
48	16.3419	32.4623	50	16.7684	34.7910	-0.4265	66.2533	0.4
49	16.5722	33.1222	49	16.3304	33.1315	+0.0418	66.2537	0.0
50	16.8106	33.7816	48	16.3013	32.4715	+0.5093	66.2531	0.6
51	17.0550	34.4401	47	16.0868	31.8106	+0.9682	66.2507	3.0
52	17.3042	35.0975	46	15.8973	31.1488	+1.4096	66.2463	7.4
53	17.5567	35.7540	45	15.7597	30.4868	+1.7970	66.2408	12.9
54	17.8111	36.4097	44	15.5197	29.8241	+2.2914	66.2338	19.9
55	18.0666	37.0647	43	15.1408	29.1604	+2.9258	66.2251	28.6
56	18.3239	37.7186	42	14.7460	28.4954	+3.5779	66.2140	39.7
57	18.5826	38.3714	41	14.3249	27.8292	+4.2577	66.2006	53.1
58	18.8422	39.0231	40	13.8445	27.1617	+4.9977	66.1848	68.9

ветствующая довольно протяженному участку трассы, расположенному между корреспондирующими точками. Рассчитывались угол падения на поверхность и время распространения сигнала вдоль луча, выпущенного из источника и пришедшего к поверхности (совершив один рефракционный разворот на большой глубине) для расстояний от источника от 40 до 58 км с шагом 1 км. Расчет проводился дважды. Сначала источник располагался на горизонте подрыва зарядов ВВ, затем – на горизонте размещения приемной системы. Таким образом, на первом этапе был проведен расчет для прямого сигнала, распространяющегося от источника до касания взволнованной поверхности океана. На втором этапе выполнялся расчет для рассеянного сигнала – от взволнованной поверхности до приемника (выполнение принципа взаимности не подвергается сомнению). Результаты первого и второго расчетов рассматривались попарно для расстояний от источника  $R_1$  и  $R_2$ , составляющих в сумме 98 км. Для каждой пары определялось суммарное время распространения ( $\tau_1 + \tau_2$ ) и разность углов скольжения при контакте с поверхностью  $\Delta\theta = (\theta_1 - \theta_2)$ , которая характеризовала отклонение составляющей рассеянного сигнала от зеркального отражения. Таким образом, для углов в пределах индикатрисы рассеяния определялось время прихода в точку приема (относительно момента излучения) соответствующей составляющей рассеянного поверхностью сигнала. Определялось расположе-

ние реверберационного сигнала относительно прямого (зеркально отраженного от поверхности) сигнала на временной шкале.

Частично результаты такого расчета представлены в табл. 1. Соответствующее суммарной дистанции (98 км) время распространения сигнала при зеркальном отражении от поверхности составило 66.2537 с (погрешность расчета не превышала 0.1 мс). Сигнал, отразившийся от поверхности в направлении, отличном от зеркального, приходит к приемнику (согласно расчету) с заметным опережением. При этом опережение растет по мере увеличения значения  $|\Delta\theta|$ .

Угловая зависимость разности времен распространения прямого (зеркально отраженного от поверхности) и реверберационного сигнала при расположении корреспондирующих точек на глубинах 100 и 150 м представлена на рис. 5 (сплошная линия). Кривая зависимости  $\Delta\tau(\Delta\theta)$  достаточно симметрична, значения  $\Delta\tau$  практически не зависят от знака  $\Delta\theta$ . Отметим тот факт, что при угловом растворе индикатрисы рассеяния  $\pm 4^\circ$  реверберационный сигнал формируется на участке трассы протяженностью  $\sim 16$  км. При этом угол скольжения падающего на поверхность сигнала меняется в пределах от  $14.5^\circ$  до  $18.5^\circ$ .

На рис. 5 представлены также результаты расчетов, выполненных для расположения приемных систем на глубинах: 20 м (пунктирная линия) и 500 м (штриховая линия). Различия в размещении приемных систем привели к сравнительно



**Рис. 5.** Разница времени распространения прямого (зеркально отраженного поверхностью) и рассеянного поверхностью океана (реверберационного) сигнала. Ее зависимость от углового (в вертикальной плоскости) отклонения рассеянного сигнала от зеркального отражения. Результаты расчета, выполненного для первого сигнала четверки. Азимутальное отклонение отсутствует. Глубина источника 150 м, приемника: 100 м (—), 20 м (....) и 500 м (---). Расстояние между ними 98 км.

небольшим изменениям кривых зависимости  $\Delta\tau(\Delta\theta)$ . Максимальные изменения наблюдались на краях диапазона изменений  $\Delta\theta$ . При значениях  $\Delta\theta = -3^\circ, +3^\circ$  изменения  $\Delta\tau$  не превысили 6%.

Аналогичные расчеты были проведены для сигналов, отраженных не зеркально, при  $\varphi = \text{const} = 1, 2 \text{ и } 3^\circ$ . В этом случае при подборе пар дистанций, для которых выполнялись два промежуточных расчета, использовалось соотношение, связывающее длины двух боковых сторон треугольника ( $R_1$  и  $R_2$ ) с известным основанием ( $R_0 = 98$  км) и углом при вершине ( $180^\circ - \varphi$ ):  $R_2 = \sqrt{R_0^2 - R_1^2 \sin^2 \varphi} - R_1 \cos \varphi$ . Результаты расчета, выполненного для азимутального отклонения  $\varphi = 3^\circ$ , приведены в табл. 2.

Зависимость  $\Delta\tau(\Delta\theta)$ , рассчитанная для значений  $\varphi: 0, 1, 2 \text{ и } 3^\circ$  различалась лишь постоянным, практически не зависящим от значений  $\Delta\theta$ , но различным для разных значений  $\varphi$ , сдвигом вдоль оси  $\Delta\tau$ : на 0, -2.3, -9.7, -23.3 мс, соответственно. По результатам этих расчетов был построен гра-



**Рис. 6.** Угловая (в горизонтальной и в вертикальной плоскости) зависимость разности времен распространения прямого (зеркально отраженного от поверхности океана) и реверберационного сигналов. Числа у изолиний – разность времен распространения в мс. Расстояние между источником и приемником 98 км, глубины погружения: источника 150 м, приемника 100 м. Расчет выполнен для первого сигнала четверки, дважды развернувшегося (благодаря рефракции) на глубине  $\sim 3300$  м. Верхний и нижний сектора, отмеченные знаком “+”, соответствуют опережению реверберационным сигналом прямого сигнала. Левый и правый сектора, отмеченные знаком “-”, соответствуют запаздыванию реверберационного сигнала относительно прямого.

фик (рис. 6), представляющий набор изолиний времен опережения реверберационного сигнала, пришедшего с разных направлений, относительно прямого, зеркально отраженного от поверхности сигнала. Числа у изолиний – опережение реверберационного сигнала относительно прямого в мс. Реверберационные сигналы, соответствующие верхнему и нижнему секторам рисунка, помеченным знаком “+”, приходят в точку приема с опережением по отношению к прямому сигналу. Реверберационные сигналы, соответствующие левому и правому секторам рисунка, помеченным знаком “-”, приходят в точку приема с запаздыванием относительно прямого сигнала.

На рис. 7 представлена первая четверка взрывного сигнала, принятого и зарегистрированного в этом же опыте на расстоянии от источника 144 км (приемная система располагалась на глубине 500 м). На этой дистанции сигнал трижды испытал ре-

**Таблица 2.** Результаты расчета зависимости  $\Delta\tau(\Delta\theta)$ , выполненного для  $\varphi = 3^\circ$ . Расстояние между источником и приемником 98 км, глубина источника 150 м, приемника 100 м

$\Delta\theta$ , град	-4.8	-2.8	-1.74	-0.9	-0.43	0.03	0.5	0.96	1.4	1.8	2.9	4.9
$\Delta\tau$ , мс	44.7	5.3	-10.2	-19.5	-21.7	-23.3	-21.0	-19.0	-14.8	-9.1	6.7	47.2

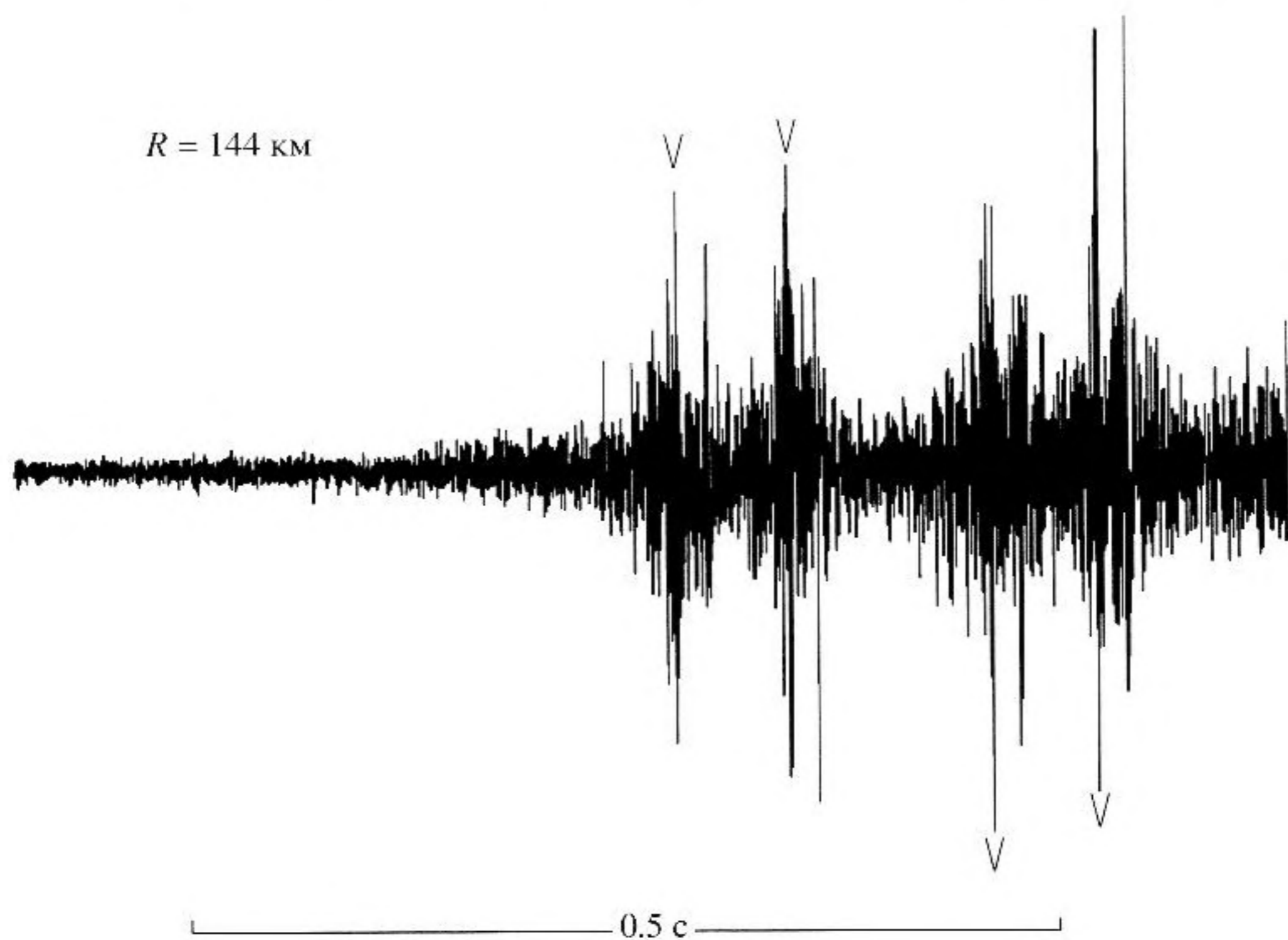


Рис. 7. Фрагменты временной структуры взрывного сигнала (первая четверка элементарных сигналов), принятого и зарегистрированного на расстоянии 144 км от источника. Глубина подрыва заряда 150 м. Глубина расположения приемника 500 м.

фракционный разворот на большой глубине. Первый сигнал этой четверки всего 2 раза отразился от поверхности (на расстоянии ~50 и ~100 км). Реверберационный сигнал формировался на двух участках трассы: 40–58 км и 86–104 км. Расчеты выполнялись (по описанной выше схеме) сначала для первого, а затем для второго участка трассы. Частично результаты расчетов, проведенных для источника, расположенного на глубине 150 м, приемника – на глубине 100 м, представлены в табл. 3.

В таблице приведены результаты расчета параметров реверберационного сигнала, сформированного на участке трассы 40–58 км (при первом контакте взрывного сигнала с поверхностью океана). Кривая зависимости  $\Delta\tau(\Delta\theta)$ , построенная по результатам этого расчета (сплошная линия), представлена на рис. 8. Обращает на себя внимание ее несимметричность относительно оси ординат. Для отрицательных значений  $\Delta\theta$  крутизна этой кривой меньше, чем для положительных значений  $\Delta\theta$ . Эта несимметричность связана непосредственно с геометрией, характерной для расположения участка трассы распространения, ответственного за формирование реверберационного сигнала в этом случае. Расстояние от этого участка до источника ~ в 2 раза меньше, чем до приемника. До этого участка сигнал совершил один рефракционный разворот, после этого

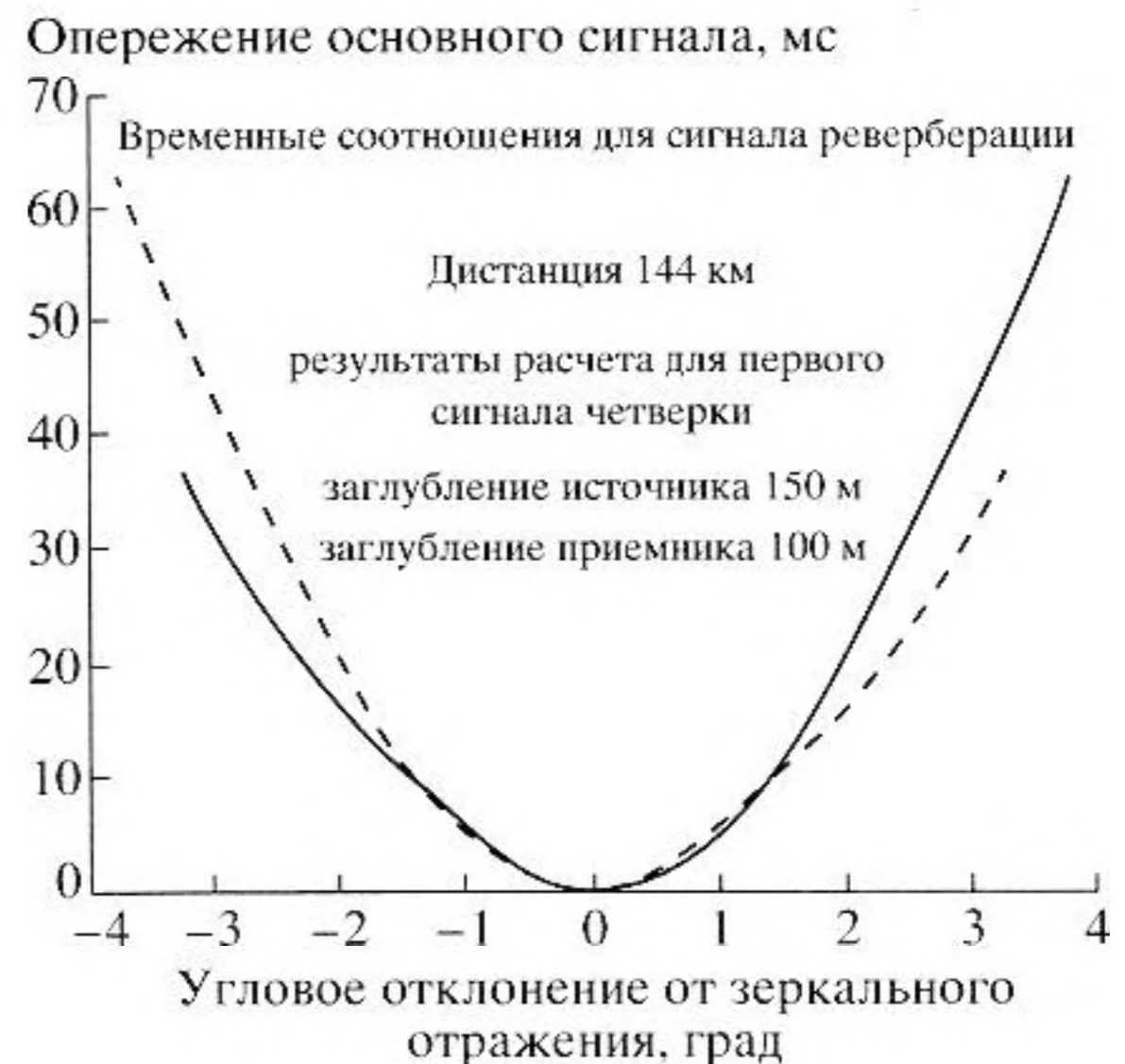


Рис. 8. Разница времен распространения прямого (зеркально отраженного поверхностью) и рассеянного поверхностью океана (реверберационного) сигнала. Ее зависимость от углового (в вертикальной плоскости) отклонения рассеянного сигнала от зеркально отраженного. Результаты расчета, выполненного для первого сигнала четверки. Азимутальное отклонение отсутствует. Глубина источника 150 м, приемника – 100 м, расстояние между ними 144 км. — для реверберационного сигнала, формируемого на участке трассы 40–58 км, - - - - для реверберационного сигнала, формируемого на участке трассы 86–104 км.

**Таблица 3.** Результаты расчета времен распространения сигнала, отразившегося не зеркально от поверхности океана на участке трассы 40–58 км, расположенном между корреспондирующими точками, разнесенными на 144 км

Гл. ист. = 150 м, гл. пр. = 0 м			Гл. ист. = 100 м, гл. пр. = 0 м			Результирующие:		
$R_1$ , км	$\theta_1$ , град	$\tau_1$ , с	$R_2$ , км	$\theta_2$ , град	$\tau_2$ , с	$\Delta\theta$ , град	$\tau_1 + \tau_2$ , с	$\Delta\tau$ , мс
40	13.9570	27.1541	104	17.2203	70.2346	-3.2633	97.3887	35.6
41	14.4151	27.8213	103	17.0953	69.5770	-2.6800	97.3983	26.0
42	14.8266	28.4872	102	16.9713	68.9190	-2.1447	97.4062	18.1
43	15.2152	29.1519	101	16.8485	68.2605	-1.6333	97.4124	11.9
44	15.5896	29.8154	100	16.7271	67.6016	-1.1375	97.4170	7.3
45	15.7785	30.4779	99	16.6074	66.9423	-0.8300	97.4202	4.1
46	15.9294	31.1400	98	16.4897	66.2866	-0.5603	97.4226	1.7
47	16.1243	31.8015	97	16.3745	65.6225	-0.2502	97.4240	0.3
48	16.3412	32.4623	96	16.2624	64.9620	+0.0788	97.4243	0.0
49	16.5713	33.1223	95	16.1541	64.3011	+0.4172	97.4234	0.9
50	16.8100	33.7816	94	16.0508	63.6399	+0.7592	97.4215	2.8
51	17.0547	34.4400	93	15.9543	62.9783	+1.1004	97.4183	6.0
52	17.3036	35.0975	92	15.8672	62.3164	+1.4364	97.4139	10.4
53	17.5556	35.7541	91	15.7944	61.6543	+1.7612	97.4084	15.9
54	17.8100	36.4098	90	15.7462	60.9919	+2.0638	97.4017	22.6
55	18.0661	37.0646	89	15.6371	60.3296	+2.4290	97.3942	30.1
56	18.3236	38.7184	88	15.4501	59.6664	+2.8735	97.3848	39.5
57	18.5821	38.3713	87	15.2602	59.0027	+3.3219	97.3740	50.3
58	18.8414	39.0231	86	15.0668	58.3384	+3.7746	97.3615	62.8

участка – два. Этим объясняется и тот факт, что пределы изменения углов скольжения при падении сигнала на поверхность в районе формирования реверберации ( $13.9^\circ$ – $18.8^\circ$ ) в два с лишним раза превышают пределы изменения углов скольжения при его незеркальном отражении ( $15.1^\circ$ – $17.2^\circ$ ), чего не наблюдалось для реверберации на расстоянии 98 км.

Результаты расчета, выполненного для реверберационного сигнала, формируемого на участке трассы 86–104 км (штриховая линия на рис. 8), дают аналогичную картину – такая же несимметричность кривой  $\Delta\tau(\Delta\theta)$ . Различие лишь в том, что в первом случае более крутая ветвь соответствует положительным значениям  $\Delta\theta$ , а во втором случае – отрицательным. Одна из ветвей зависимости  $\Delta\tau(\Delta\theta)$  практически повторяет результаты расчета, выполненного для дистанции 98 км, другая (более крутая) при отклонении от зеркального отражения на  $\pm 3^\circ$  приводит к опережению, в 1.3 раза превышающему значение опережения, полученное для дистанции 98 км.

И, наконец, о временных соотношениях между прямым сигналом и сигналом реверберации, формируемым участками трассы, расположенными в непосредственной близости от источника и приемника. Для конкретного случая – взрывного сигнала, принятого на расстоянии 52 км от источника (рис. 4), расчет, выполненный для условий проведения опыта, показал, что реверберационный сигнал (в пределах угловых отклонений рассея-

ния от зеркального отражения  $-3^\circ < \Delta\theta < +3^\circ$  при азимутальном отклонении  $\varphi = 0^\circ$ ) формируется на 150-метровом участке трассы, начало которого находится на удалении 270 м от источника. При этом реверберационный сигнал приходит с запаздыванием во времени относительно прямого. Запаздывание изменяется от 0 мс до  $\sim 1$  мс при увеличении значения  $|\Delta\theta|$  до  $3^\circ$ . Таким образом, отсутствие так называемой предреверберации во взрывном сигнале, приведенном на рис. 4, полностью объяснимо. Азимутальное отклонение рассеянного сигнала от зеркального приведет только к увеличению запаздывания реверберационного сигнала относительно прямого.

В заключение сформулируем основные результаты проведенного анализа.

На экспериментальных материалах опыта, проведенного в северо-западной части Тихого океана в зимних условиях, показано, что:

– зашумленность четверки сигналов является проявлением бистатической реверберации, обусловленной рассеянием звука на взволнованной поверхности океана в направлении приемника, находящегося на значительном удалении от источника;

– в формировании бистатической реверберации различную роль играют участки рассеивающей поверхности океана, расположенные в непосредственной близости от источника и приемника (в нескольких сотнях метров от того или другого), и участки поверхности, расположенные на даль-

нем расстоянии от них (несколько десятков и более км – один и более полных циклов луча, вдоль которого распространяется сигнал); в первом случае реверберационный сигнал приходит к приемнику вслед за прямым, во втором случае реверберационный сигнал приходит к приемнику как с опережением (так называемая “предреверберация”), так и с некоторой задержкой относительно прямого сигнала;

Для анализа особенностей формирования временной структуры бистатической реверберации предложена методика расчета времен распространения от источника к приемнику сигналов, отраженных от поверхности под углами, отличными от зеркального.

На основании проведенных расчетов временной структуры реверберационного сигнала, выполненных для условий проведения обсуждаемого опыта, показано, что:

– при отклонениях от зеркального отражения в вертикальной плоскости в пределах  $\pm 3^\circ$ – $4^\circ$  к приемнику приходят сигналы, рассеянные поверхностью, с участков трассы, расположенных в непосредственной близости к источнику (приемнику), протяженностью ~150–200 м и протяженностью до 16–18 км с участков трассы, расположенных на большом удалении, как от источника, так и от приемника;

– с заметным опережением относительно прямого (зеркально-отраженного) приходит лишь сигнал реверберации, формируемый на участках трассы, расположенных на большом удалении как от источника, так и от приемника.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-16959).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ewing M., Worzel J.L. Long-range sound transmission // Geol. Soc. Am. Memoir. 1948. V. 27. P. 1–35.
2. Вадов Р.А. Региональная изменчивость временной структуры звукового поля в подводном звуковом канале // Журнал Океанология. 2000. Т. 40. № 2. С. 165–173.
3. Вадов Р.А. Влияние континентального склона и шельфа на формирование структуры и энергетике сигнала, распространяющегося к берегу // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 5. С. 606–616.
4. Вадов Р.А. Некоторые результаты исследований структуры звукового поля точечного источника в подводном звуковом канале Японского моря // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 4. С. 443–451.
5. Попов Р.Ю., Тюрин П.Г. О вертикальной корреляции шумов, сопровождающих приходы сигнала по отдельным лучам от взрывного источника в глубоком море. М.: АН СССР, 1977. IX Акустическая конференция, доклады секция Д. С. 85–87.
6. Студеничник Н.В. Явление предреверберации в подводном звуковом канале. М.: АН СССР, 1977. IX Акустическая конференция, доклады секция Д. С. 45–48.
7. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В. К теории предреверберации звука в океане // Доклады АН СССР. 1978. Т. 239. С. 211–213.
8. Тебякин В.П. и др. Raymod52 – базовый комплекс программ для вычисления звуковых полей в слоисто-неоднородном океане лучевым методом // Отчет АКИН. М., 1990.
9. Лысанов Ю.П. Рассеяние звука неровными поверхностями. В кн. Акустика океана под ред. акад. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. 696 с.
10. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
11. Копыл Е.А., Лысанов Ю.П. Оценки времен прихода низкочастотной поверхностной предреверберации в океане. Акустика океана. Доклады VIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2000. С. 149–151.

## Time Structure of Bistatic Reverberation in Long-Range Propagation of Explosion-Generated Signals

R. A. Vadov

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia  
e-mail: vadov@akin.ru

**Abstract**—In the experiments on long-range propagation of explosion-generated signals, a noise background accompanying the classical signal quartets are repeatedly observed. The background smoothly increases before the arrival of the first signal of the quartet, then decreases, and completely vanishes after the arrival of the last signal of the same quartet. The data of an experiment performed in winter in a deep-water region of the north-western Pacific are considered. These data are used to demonstrate the phenomenon at hand and to show that the noise background of the quartets is the manifestation of the bistatic reverberation caused by sound scattering by the rough ocean surface towards the receiver located a long distance from the source. An easy-to-use technique is proposed for calculating the time relations between the direct signal and the surface-reverberation one. Calculations are performed for the time structure of the bistatic surface reverberation to explain the observed features of the phenomenon.