

УДК 551.463

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИИ ПРИ ДАЛЬНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЗРЫВНЫХ СИГНАЛОВ

© 2014 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва

e-mail: vadov@akin.ru

Поступила в редакцию 24.09.2012 г.

В опытах по дальнему распространению взрывных сигналов, проводимых в различных регионах Мирового океана, исследователями неоднократно наблюдалась бистатическая поверхностная реверберация, которая не только сопровождала зондирующий (зеркально отраженный от морской поверхности) сигнал, но и предшествовала ему. Часть реверберации, предшествующая зондирующему сигналу, получила название “предреверберация”. Теоретическое объяснение этому явлению в рамках идеализированной модели морской среды для условий приповерхностного звукового канала было дано в 1978 г. и только в начале 2000-х гг. была разработана методика расчета временной структуры предреверберации с учетом реальных условий распространения звука в океане. Серия расчетов, выполненных по этой методике для условий проведения двух опытов (приповерхностный звуковой канал и подводный звуковой канал при скорости звука у дна, превышающей ее значение у поверхности), привела к уточнению наших представлений о механизме формирования структуры предреверберационного сигнала. В статье, помимо краткого описания публикаций других авторов по теме, приводится описание методики расчета временной структуры предреверберационного сигнала, дается краткое описание условий проведения двух опытов, в которых наблюдалась предреверберация, приводятся результаты анализа основных ее характеристик.

DOI: 10.7868/S0030157414010122

Бистатическая реверберация, обусловленная рассеянием звука на взволнованной поверхности океана, наблюдалась при проведении многих гидроакустических опытов. Наблюдалась она и при проведении опытов по дальнему распространению взрывных сигналов, когда расстояние между источником и приемником составляло десятки–сотни километров. Бистатическая поверхностная реверберация в этих опытах регистрировалась не только после, но и непосредственно перед приходом к приемнику зондирующего сигнала. Реверберация появлялась, плавно нарастая, перед приходом к приемнику первого сигнала четверки и исчезала, плавно спадая, после его прихода. При проведении таких опытов в отдельных случаях экспериментаторам на слух по нарастающему “гулу” удавалось предугадывать момент прихода взрывного сигнала к приемной системе. Эта часть реверберационного сигнала получила название “предреверберация”. Предваряя приход к приемнику первого элементарного сигнала первой из регистрируемых на данном расстоянии от источника классической четверки сигналов, предреверберация являлась неким предвестником многолучевого взрывного сигнала.

Впервые на эту часть бистатической реверберации в конце 1960-х гг. обратил внимание Студеничник [8]. Считалось вполне естественным появление реверберационного сигнала вслед за пря-

мым сигналом и необычным – его появление перед приходом в точку приема основного, зеркально отраженного от поверхности прямого сигнала. На основе анализа экспериментальных данных, полученных им, констатировалось [8, 1] следующее:

- предреверберация наблюдается только в том случае, если сигнал распространяется по лучу, сошедшему хотя бы один полный цикл около оси канала или отразившемуся не менее одного 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 длительность растут с увеличением расстояния.

В конце 1970-х гг. были произведены теоретические оценки положения предреверберационного сигнала относительно сигнала, зеркально отраженного от поверхности океана, пояснявшие

механизм формирования поверхностной реверберации. Оценки проводились для идеализированного приповерхностного звукового канала (от поверхности до дна — положительный градиент скорости звука, равный гидростатическому) при расположении источника и приемника непосредственно у поверхности [1].

В рамках такой же модели идеализированного приповерхностного канала были сделаны оценки зависимости уровня предреверберации от времени [6] (закон нарастания уровня предреверберации близок к экспоненциальному), а также зависимости длительности поверхностной предреверберации от скорости ветра, частоты звука, расстояния от источника [5] (с увеличением этих факторов длительность предреверберации в зоне второго выхода лучей к поверхности уменьшается).

В монографии [2] кратко изложены основные результаты теоретических исследований, проведенных в рамках идеализированной модели. Помимо рассеяния звука на взволнованной поверхности к основным источникам предреверберации авторы монографии причисляют также рассеяние на неровностях дна и на неоднородностях водной толщи океана.

В работе [9] приводятся экспериментальные значения длительности предреверберации, оцененные по результатам одного из опытов, проведенных в северной части Тихого океана в условиях сформированного подводного звукового канала (при превышении скорости звука у дна над ее значением у поверхности на  $\sim 50$  м/с) и ветрового волнения от 2–3 до 5–7 баллов. В этом опыте предреверберация регистрировалась при удалении от источника до 600 км. Основной вывод по материалам этой статьи — длительность предреверберации увеличивается пропорционально расстоянию между источником и приемником.

Нами поверхностная предреверберация неоднократно наблюдалась экспериментально и регистрировалась в опытах по дальнему распространению взрывных сигналов как в условиях приповерхностного звукового канала (ППЗК), так и в условиях подводного звукового канала (ПЗК) при превышении значения скорости звука у дна над его значением у поверхности. Типичные сигналы классической четверки, зарегистрированной в одном из таких опытов на расстоянии около 100 км от источника, представлены на рис. 1. Перед ударной волной первого сигнала четверки хорошо просматривается предреверберационный сигнал, обусловленный рассеянием звука на взволнованной поверхности океана (в опыте степень ветрового волнения оценивалась в 4–6 баллов). Обратим внимание на тот факт, что предреверберация при первом сигнале четверки не под-

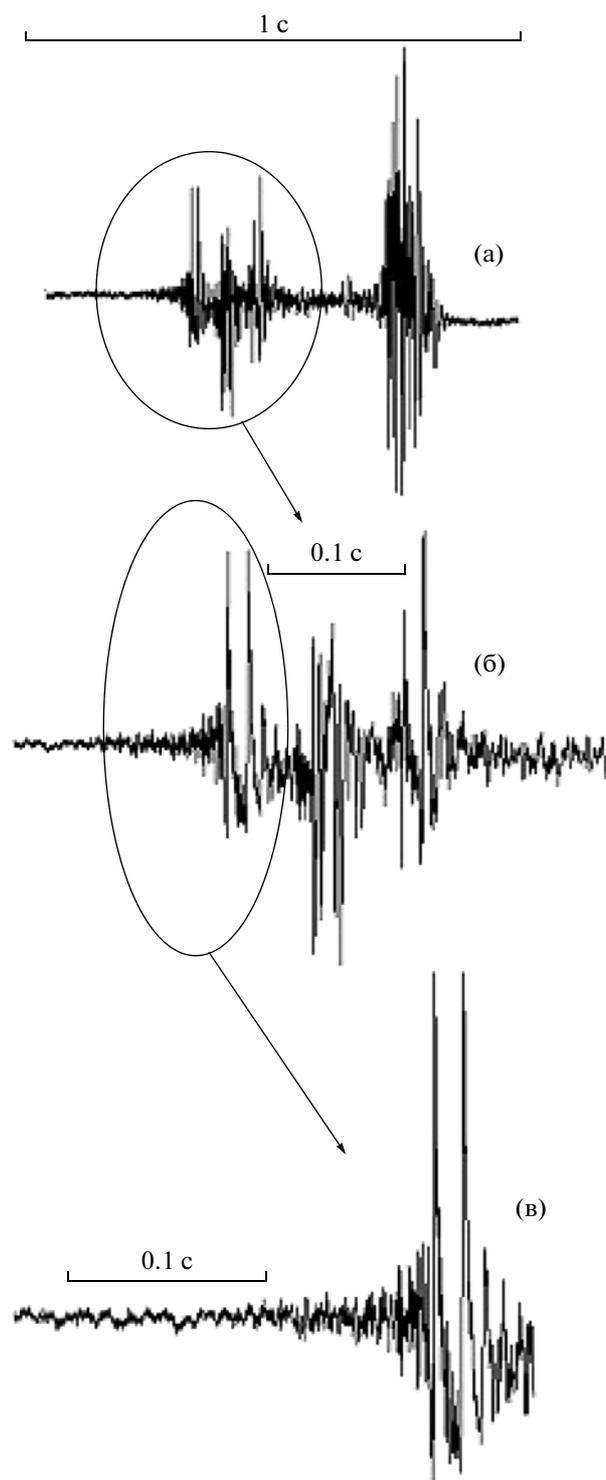


Рис. 1. Временная структура взрывного сигнала (а), первой четверки сигналов (б) и первого сигнала четверки (в).  $R = 102.5$  км.

вержена влиянию реверберационной помехи, формируемой остальными ее сигналами, что особенно важно при экспериментальной оценке ее характеристик.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИИ

В начале 2000-х гг. была разработана методика расчета временной структуры предреверберации [3], обусловленной рассеянием звука на взволнованной поверхности, практически для любых реальных профилей изменения скорости звука с глубиной в условиях ППЗК, а также в условиях ПЗК при скорости звука у дна, превышающей ее значение у поверхности. Поясним суть разработанной методики на примере формирования поверхностной предреверберации, регистрируемой во второй зоне выхода лучей к приемнику.

При проведении расчетов, помимо зеркального отражения от поверхности океана, рассматриваются сигналы, рассеянные под углами, отличными от зеркального. Для формального описания угловой зависимости коэффициента рассеяния звука взволнованной поверхностью океана используется индикатриса рассеяния  $D_p(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ , где  $\Delta\theta$  — отклонение рассеянного сигнала от зеркального направления в вертикальной плоскости,  $\Delta\varphi$  — отклонение рассеянного сигнала от зеркального направления в горизонтальной плоскости.

При  $\Delta\varphi = 0^\circ$  для расстояний от источника от 40 до 60 км с шагом  $\Delta R$  рассчитывается угол падения на поверхность и время распространения сигнала вдоль луча, вышедшего из источника и пришедшего к поверхности, совершив один рефракционный разворот на большой глубине. Расчет проводится дважды. Сначала источник располагается на горизонте подрыва зарядов взрывчатого вещества, затем — на глубине приемной системы. На первом этапе проводится расчет для прямого сигнала, распространяющегося от источника до касания взволнованной поверхности океана, на втором этапе — расчет для рассеянного на взволнованной поверхности сигнала, распространяющегося к приемнику (выполнение принципа взаимности сомнению не подвергается). Результаты первого и второго расчетов рассматриваются попарно для расстояний от источника, составляющих в сумме  $R_0$  (расстояние от источника до приемника). Для каждой пары определяется суммарное время распространения ( $\tau_1 + \tau_2$ ) и разность углов скольжения при контакте с поверхностью  $\Delta\theta = (\theta_1 - \theta_2)$ , которая характеризует отклонение составляющей рассеянного сигнала от зеркального отражения.

Таким образом, для фиксированного расстояния  $R_0$  и всего диапазона углов  $\Delta\theta$  определяется время распространения соответствующей составляющей рассеянного поверхностью сигнала, а затем и время опережения прямого, зеркально отраженного от поверхности сигнала. По результатам выполненных расчетов для каждого взаимного расположения источника и приемника в пределах дистанций 80–120 км определяются также макси-

мальные значения разницы времен распространения рассеянного и прямого сигналов при различной ширине индикатрисы рассеяния в вертикальной плоскости.

Аналогичные расчеты проводятся для сигналов, отраженных не зеркально, при  $\Delta\varphi$  отличных от  $0^\circ$  ( $\Delta\varphi = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  и т.д.). 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 ( $R_0$ ) и углом при вершине ( $180^\circ - \Delta\varphi$ ):

$$R_2 = [(R_0)^2 - (R_1)^2 \sin^2(\Delta\varphi)]^{0.5} - R_1 \cos(\Delta\varphi).$$

В формировании предреверберационного сигнала, предшествующего сигналу, зеркально отраженному от поверхности и дважды развернувшись на большой глубине, участвует поверхность океана, соответствующая довольно протяженному участку трассы, расположенному между источником и приемником. Для сигнала, трижды развернувшегося на большой глубине, в формировании предреверберации участвует поверхность океана, соответствующая двум протяженным участкам трассы, расположенным между источником и приемником. Расчет временной структуры предреверберации в этом случае проводится аналогичным образом сначала для первого, а затем для второго участков трассы. Для сигнала, четырежды развернувшегося на большой глубине, в формировании предреверберации участвует поверхность океана, соответствующая трем протяженным участкам трассы. В этом случае расчет проводится аналогичным образом сначала для первого, затем для второго, затем для третьего участков трассы. И так далее...

Проведенные по этой методике расчеты временной и угловой структуры поверхностной предреверберации позволили выявить некоторые их особенности, на которые ранее не обращалось внимание. При этом результаты расчетов сопоставлялись с экспериментальными материалами.

### ДВА ОПЫТА, ПРОВЕДЕННЫХ В ТИХОМ ОКЕАНЕ

В качестве иллюстрации поверхностной предреверберации, наблюдающейся в океане при разных гидрологических условиях, особенностей ее формирования, а также для оценки достоверности некоторых теоретических выводов (по результатам проводимых расчетов) воспользуемся материалами двух опытов по дальнему распространению взрывных сигналов, проведенных нами в Тихом океане.

**Первый опыт** проводился в глубоководном районе (глубина места составляла ~5500 м) северо-западной части Тихого океана в зимних усло-

виях (декабрь месяц) при сформированном по всей глубине ПЗК. Профиль изменения скорости звука с глубиной, зарегистрированный во время проведения опыта, представлен на рис. 2. Опыт проводился в два этапа при усиливающемся ветровом волнении. На первом этапе скорость ветра составляла 8–10 м/с (направление относительно трассы распространения  $\sim 45^\circ$ ), ветровое волнение достигало 3–4 балла. На втором этапе скорость ветра увеличилась до 11–13 м/с (направление относительно трассы распространения  $\sim 55^\circ$ ), ветровое волнение достигало 4–5 баллов. Взрывные работы на расстоянии от приемного судна  $\sim 100$  км на первом и втором этапах проводились с разницей во времени около 2–3 часов.

В качестве источника взрывных сигналов использовались малые заряды взрывчатого вещества – детонаторы гидростатического действия. Подрывы зарядов производились на глубине 150 м (на первом этапе) и на глубине 50 м (на втором этапе), прием осуществлялся на ненаправленные системы, расположенный на глубинах 80 и 500 м.

**Второй эксперимент** проводился в глубоководном районе (глубина места составляла  $\sim 5200$  м) северной части Тихого океана в осенних условиях (октябрь месяц) при сформированном ПЗК. Ось канала располагалась на глубине около 300 м, толщина перемешанного приповерхностного слоя составляла 35–45 м, значение скорости звука у дна превышало ее значение у поверхности на 50–55 м/с. Профиль изменения скорости звука с глубиной также представлен на рис. 2. Во время проведения опыта скорость ветра составляла 10–11 м/с (направление относительно трассы распространения  $\sim 50$ – $70^\circ$ ), ветровое волнение – 4–6 баллов.

Подрыв малых зарядов производился на глубине 200 м через каждые 2–3 км, что позволило получить достаточно подробную информацию о структуре звукового поля, формирующейся на исследуемой трассе. Прием сигналов осуществлялся на ненаправленные системы, расположенные на глубинах 250 и 600 м.

Полоса частот при приеме, регистрации и преобразовании сигналов из аналоговой в цифровую форму составляла как в первом, так и во втором опытах 50–2500 Гц.

На рис. 3 представлена временная структура взрывных сигналов, зарегистрированных в этих опытах на 80-километровом участке трассы (на расстоянии от приемных систем  $R = 50$ – $127$  км). В многолучевых взрывных сигналах можно выделить две группы элементарных сигналов.

Первая – основная по энергетике группа практически не разделяющихся во времени элементарных (однолучевых) сигналов, многократно отраженных от поверхности, а также рассеянных на ней, и распространяющихся вблизи оси ПЗК. В

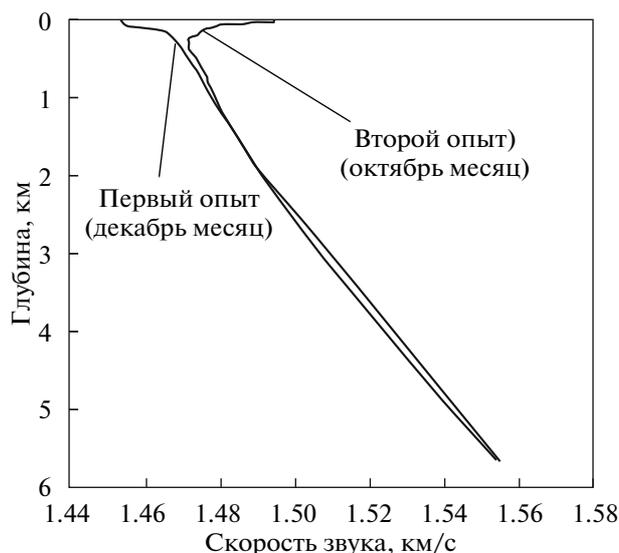


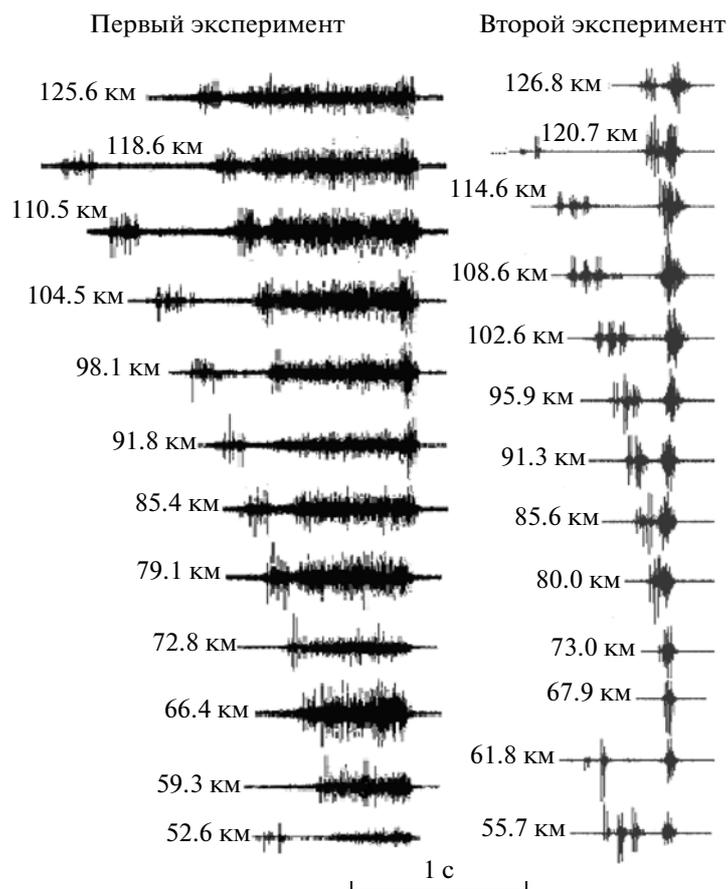
Рис. 2. Вертикальные профили изменения скорости звука с глубиной  $C(z)$ , зарегистрированные в опытах, проведенных в Тихом океане.

зимних условиях это протяженная во времени группа сигналов. В условиях сформированного ПЗК это довольно компактная группа сигналов, распространяющихся со скоростью, близкой к ее значению на оси канала.

Вторая – группа элементарных сигналов, которые приходят к приемнику с некоторым опережением относительно основной группы. Сигналы этой группы формируются в виде разделяющихся между собой классических четверок. При удалении от источника опережение этих четверок относительно первой группы увеличивается, формируются отдельные “ветви”, различающиеся количеством отражений от поверхности ( $N$ ), характеризующим средние сигналы четверок этой ветви (для первого сигнала четверки число отражений равно  $N - 1$ , для последнего сигнала четверки число отражений –  $N + 1$ ). На некотором расстоянии от источника сигналы сформированной ветви касаются дна, ветвь обрывается. На рисунке хорошо представлена вторая ( $N = 2$ ) ветвь с момента ее формирования (на расстоянии от источника  $\sim 72$  км в первом и  $\sim 80$  км во втором эксперименте) до ее исчезновения (на расстоянии  $\sim 120$  км).

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Разработанная методика расчета временной структуры предреввербрации была использована при анализе экспериментальных материалов двух описанных выше опытов по дальнему распространению взрывных сигналов в Тихом океане [3, 4]. Расчеты элементов звукового поля проводились в лучевом приближении по программе Тебякина [10]



**Рис. 3.** Временная структура взрывных сигналов, принятых на расстоянии от 50 до 120 км от источника в Тихом океане. Глубины источника и приемника в первом эксперименте 150 и 80 м, во втором 200 и 250 м соответственно.

в предположении горизонтальной слоистости океана. Расчеты проводились для реальных глубин подрыва зарядов и размещения приемников.

#### *Условия возникновения бистатической поверхностной реверберации*

Рассмотрим условия формирования реверберации, предшествующей первому сигналу четверки второй ветви, представленной на рис. 1. Для того чтобы возникла поверхностная реверберация, необходима засветка излучаемым сигналом некоторого участка поверхности океана. Для того чтобы реверберационный сигнал сопутствовал сигналу, зеркально отраженному от поверхности, необходима засветка поверхности океана прямыми сигналами, аналогичными (по конфигурации траектории распространения) основному сигналу. В формировании реверберационного сигнала принимает участие взволнованная поверхность океана на ограниченном участке трассы, расположенном между источником и приемником.

**В условиях ППЗК** (первый опыт) дальняя граница зоны засветки поверхности определяется

расстоянием от источника ( $R_1$ ), на котором к поверхности придет сигнал, развернувшийся на глубине, равной глубине океана. При расположении приемника на той же глубине, что и источник, к нему придет сигнал, рассеянный на поверхности океана, удаленной от приемника не более чем на такое же расстояние ( $R_1$ ). Таким образом, на расстоянии от источника  $R_0 > R_1$  в формировании реверберационного сигнала будет участвовать поверхность океана протяженностью  $(2R_1 - R_0)$ . Ближняя к приемнику граница этого участка трассы находится на удалении  $(R_0 - R_1)$  от него.

**В условиях сформированного ПЗК при значении скорости звука у дна, превышающем его значение у поверхности** (второй опыт), существует и ближняя граница зоны засветки поверхности, которая будет определяться расстоянием  $R_2$ , на котором к поверхности придет сигнал с нижней точкой заворота на глубине, при которой скорость звука принимает значение, равное максимальному ее значению в приповерхностном слое. При расположении приемника на той же глубине, что и источник, к нему придет сигнал, рассеянный на поверхности океана, удаленной от приемника не

менее чем на такое же расстояние ( $R_2$ ). В этом случае на расстоянии от источника  $R_0 < R_1$  в формировании реверберационного сигнала будет участвовать поверхность океана протяженностью ( $R_0 - 2R_2$ ). Таким образом, во второй дальней зоне выхода лучей к поверхности реверберационный сигнал будет наблюдаться лишь на расстоянии  $R_0$ , удовлетворяющему условию:  $2R_2 < R_0 < 2R_1$ .

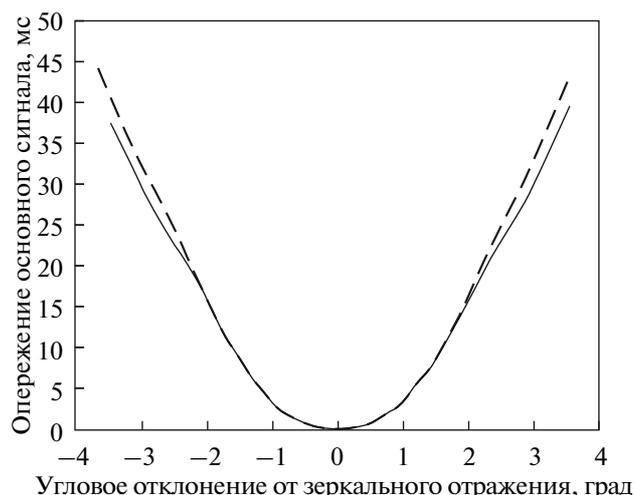
Проведение опыта по дальнему распространению взрывных сигналов при волнении, стабильном во времени, одинаковом (и контролируемом!) вдоль достаточно протяженной (до 600 км и более) трассы, — задача практически невыполнимая. Принимая этот факт во внимание, основная серия расчетов была нами выполнена для расстояний между источником и приемником, не превышающих 120 км.

#### Результаты расчетов по первому опыту

**Расстояние между источником и приемником  $R = 98$  км.** Для углов рассеяния  $\Delta\theta$  в пределах  $\pm 3-4^\circ$  определялось время прихода в точку приема (относительно момента излучения) соответствующей составляющей рассеянного сигнала. Определялось расположение реверберационного сигнала относительно прямого (зеркально отраженного от поверхности) сигнала на временной шкале.

Соответствующее 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  $|\Delta\theta|$ .

При  $\Delta\varphi = 0^\circ$ . Угловая зависимость разности времен распространения реверберационного и прямого (зеркально отраженного от поверхности) сигнала для первого сигнала классической четверки при расположении корреспондирующих точек на глубинах 100 и 150 м представлена на рис. 4 (сплошная линия). Кривая зависимости  $\Delta t$  ( $\Delta\theta$ ) достаточно симметрична, значения  $\Delta t$  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  $14.5^\circ - 18.5^\circ$ . На рис. 4 представлены также результаты расчетов, выполненных для расположения приемной системы на глубине 500 м (штриховая линия). Различия в размещении приемных систем привели к сравнительно небольшим изменениям кривых зависимости  $\Delta t$  ( $\Delta\theta$ ). Максимальные изменения наблюдались на краях диапазона изменений  $\Delta\theta$ . При

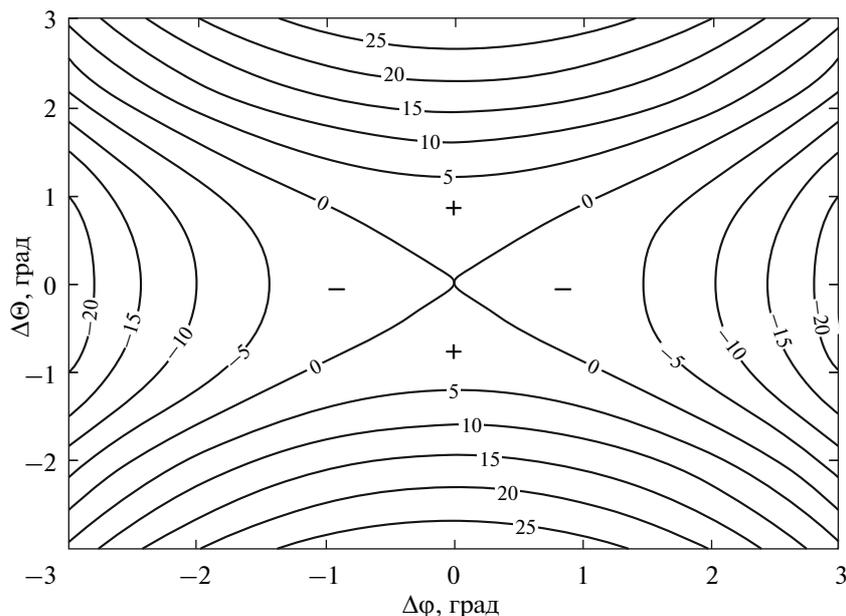


**Рис. 4.** Результаты расчета временных соотношений между зеркально-отраженным первым сигналом четверки и рассеянными поверхностью океана сигналами, принятыми на расстоянии 98 км от источника, расположенного на глубине 150 м. Сплошная линия — приемник расположен на глубине 100 м, прерывистая линия — на глубине 500 м.

значениях  $\Delta\theta = -3^\circ, +3^\circ$  изменения  $\Delta t$  не превысили 6%.

Аналогичные расчеты были проведены для сигналов, отраженных не зеркально, при  $\Delta\varphi = \text{Const} = 1^\circ, 2^\circ$  и  $3^\circ$ . Зависимость  $\Delta t$  ( $\Delta\theta$ ), рассчитанная для этих значений  $\Delta\varphi$ , различалась лишь постоянным, практически не зависящим от значений  $\Delta\theta$ , но различным для разных значений  $\Delta\varphi$  сдвигом вдоль оси  $\Delta t$ : на 0,  $-2.3$ ,  $-9.7$ ,  $-23.3$  мс соответственно. Результаты этих расчетов представлены на рис. 5 в виде 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 запозданием относительно прямого сигнала. Максимальное опережение предреверберационного сигнала (относительно зондирующего), формируемого при углах рассеяния  $\Delta\varphi$ , отличных от нулевого, уменьшается с увеличением  $|\Delta\varphi|$ .

**Расстояние между источником и приемником — 144 км.** На этой дистанции сигнал трижды испытал рефракционный разворот на большой глубине. Первый сигнал четверки всего 2 раза отразился от поверхности (на расстоянии  $\sim 50$  и  $\sim 100$  км).

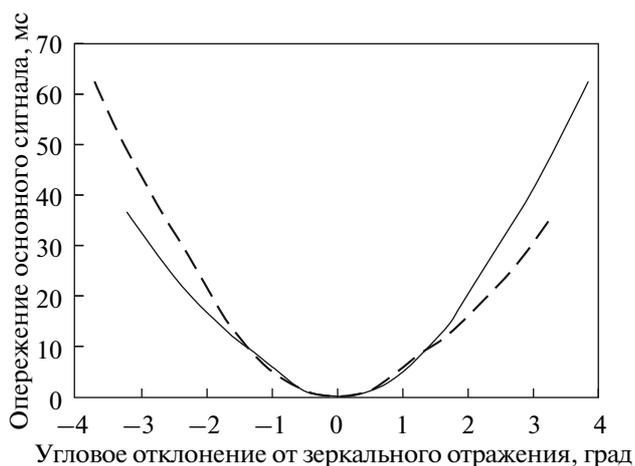


**Рис. 5.** Результаты расчета угловой (в горизонтальной и вертикальной плоскостях) зависимости разности времен распространения зеркально-отраженного и рассеянного поверхностью сигналов. Глубина источника – 150 м, приемника – 100 м,  $R = 98$  км.

Числа у изолиний – разность времен распространения, мс.

Реверберационный сигнал формировался на двух участках трассы: 40–58 км и 85–105 км. Расчет выполнялся (по той же схеме) сначала для первого, а затем для второго участка трассы.

Кривая зависимости  $\Delta\tau(\Delta\theta)$  при  $\Delta\phi = 0^\circ$  для первого участка трассы, построенная по результа-



**Рис. 6.** Результаты расчета временных соотношений между зеркально-отраженным первым сигналом четвёрки и рассеянными поверхностью океана сигналами, принятыми на расстоянии 144 км от источника, расположенного на глубине 150 м, глубина приема 100 м сплошная линия – рассеяние на участке трассы 40–58 км, прерывистая линия – рассеяние на участке трассы 85–105 км.

там расчета, представлена на рис. 6 сплошной линией. 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  $\sim$  в 2 раза меньше, чем до приемника. До этого участка сигнал совершил один рефракционный разворот, после этого участка – два.

Результаты расчета, выполненного для реверберационного сигнала, формируемого на участке трассы 86–104 км (штриховая линия на рис. 6), 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  $\sim 3^\circ$  приводит к опережению, в 1.5 раза превышающему значение опережения, полученное для дистанции 98 км.

**Расстояние между источником и приемником – 52 км.** Сигнал поверхностной реверберации в этом случае формируется участками трассы, рас-

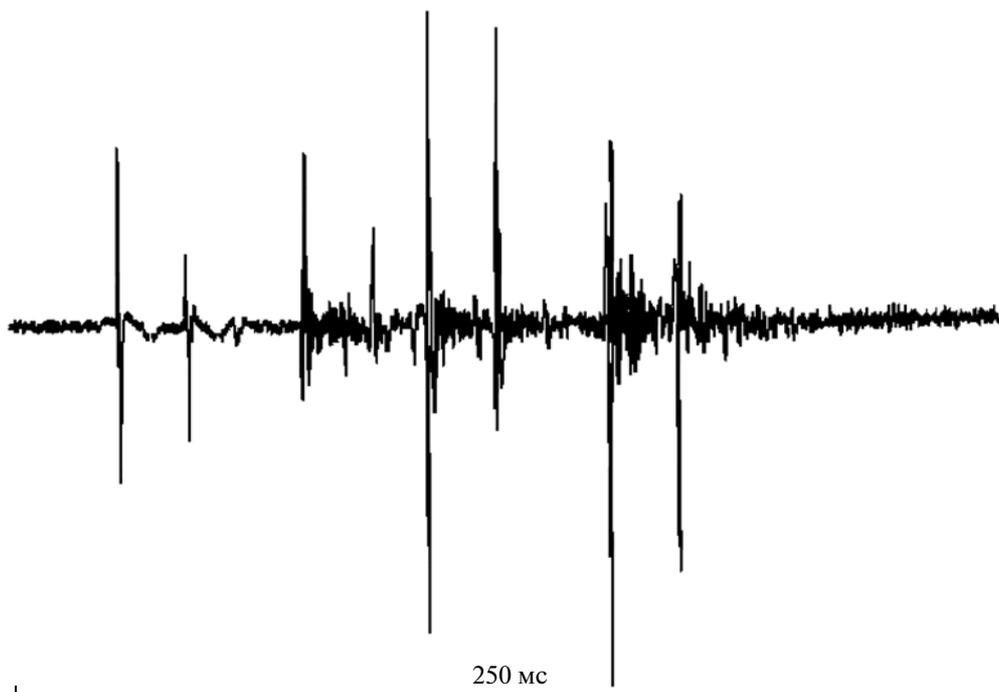


Рис. 7. Временная структура первой четверки элементарных сигналов, зарегистрированных на расстоянии 52 км от источника.

положенными в непосредственной близости от источника и приемника. Для взрывного сигнала, принятого на расстоянии 52 км от источника, нетрудно показать, что реверберационный сигнал (в пределах угловых отклонений рассеяния от зеркального отражения  $\pm 3^\circ$ ) формируется на 250-метровом участке трассы, начало которого находится на удалении 100 м от источника, конец — на удалении 350 м. Предреверберационный сигнал в этом случае, как показали расчеты, отсутствует, что и подтверждается экспериментом (см. рис. 7): вторая и третья пара (ударная волна и импульс пульсации газового пузыря) сигналов четверки отразились от поверхности по одному разу.

**Изменение предельной длительности предреверберации с расстоянием.** По результатам проведенных расчетов нетрудно было оценить изменение предельной (при неограниченной ширине индикатрисы рассеяния звука поверхностью океана) длительности предреверберации, формируемой на расстоянии от 70 до 120 км от источника. Результаты такой оценки представлены на рис. 8. Влияние дна океана проявляется в монотонном уменьшении с расстоянием (вплоть до нуля) предельной длительности предреверберации, которая определяется глубиной океана и гидрологическими условиями в районе проведения опыта.

Реальная длительность предреверберации существенно зависит от степени волнения поверх-

ности моря. На рисунке, помимо предельной длительности предреверберации (кривая 1), приведены кривые 2, 3 и 4, представляющие зависимость длительности предреверберации от расстояния при индикатрисе рассеяния, ограниченной значениями углов  $9^\circ$ ,  $6^\circ$  и  $3^\circ$  соответственно.

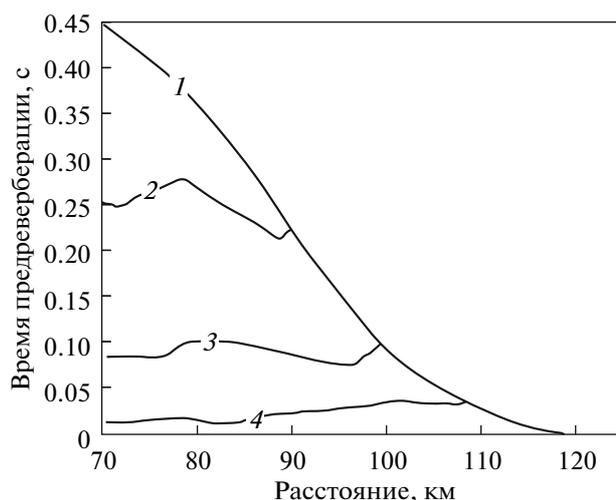
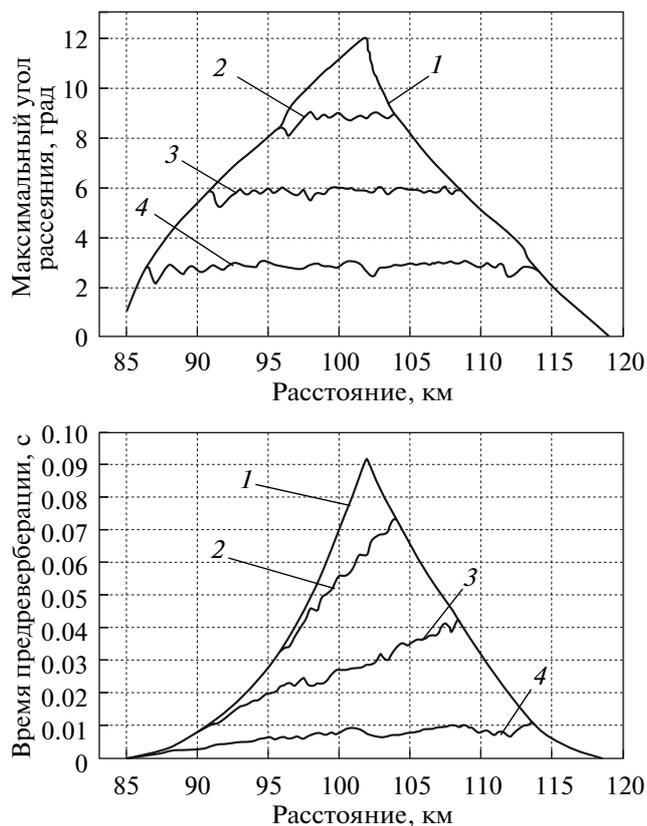


Рис. 8. Первый опыт — глубина источника 150 м, глубина приемника 80 м.

Вторая зона выхода лучей к поверхности. Зависимость от расстояния предельной длительности предреверберации (1) и ее длительности при ширине индикатрисы рассеяния:  $9^\circ$  (2),  $6^\circ$  (3),  $3^\circ$  (4).



**Рис. 9.** Второй опыт. Вторая зона выхода лучей к поверхности.

Зависимость от расстояния максимального угла рассеяния (вверху), предельной длительности предреверберации (1), и ее длительности при ширине индикатрисы рассеяния  $9^\circ$  (2),  $6^\circ$  (3),  $3^\circ$  (4) (внизу).

#### Результаты расчетов по второму опыту

На расстоянии  $R \sim 100$  км первый сигнал четверки дважды развернулся на большой глубине и один раз отразился от поверхности океана.

В условиях второго опыта к поверхности океана попадут лишь сигналы, нижняя точка заворота которых расположена на глубинах, превышающих глубину, при которой скорость звука принимает значение, равное максимальному ее значению в приповерхностном слое. К поверхности океана такие сигналы попадут на расстоянии от источника 44 км и более. Верхний предел зоны засветки поверхности — расстояние от источника, на котором к поверхности придет сигнал, развернувшийся на глубине, равной глубине океана. Для этого опыта (при глубине океана  $\sim 5200$  м) это расстояние равно 59 км. Таким образом, акустическим сигналом во втором опыте засвечивалась поверхность океана, удаленная от источника на расстояние от 44 до 59 км. Приемник расположен несколько глубже. Однако предельные дистанции, с которых к нему придут сигналы, рассеянные поверхностью (определенные аналогичным

образом), составят практически те же 44 и 59 км. Нетрудно оценить различия зон формирования реверберационного сигнала при разном по дистанции (в пределах 88–118 км) разнесении корреспондирующих точек. Так, максимальная зона формирования реверберационного сигнала (15 км) будет наблюдаться при расстоянии от источника 103 км (44 км + 59 км). На расстоянии от источника 110 км протяженность этой зоны составит 8 км, а на расстоянии 115 км — всего лишь 3 км.

На рис. 9 приведены результаты расчета длительности предреверберации, выполненного для условий проведения второго опыта (глубина источника — 200 м, глубина приемника — 250 м) для сигнала, дважды развернувшегося на большой глубине (1 — предельная длительность предреверберации, 2, 3, 4 — длительность предреверберации при ширине индикатрисы рассеяния  $\pm 9^\circ$ ,  $\pm 6^\circ$  и  $\pm 3^\circ$  соответственно). Расчет выполнялся для расстояний от источника от 85 до 118 км с шагом по дистанции, равным 1 км, при  $\Delta\varphi = 0^\circ$ . Основным выводом — диапазон углов рассеяния поверхностью океана  $\Delta\theta$ , принимающих участие в формировании реверберации, существенно зависит от расстояния до источника. Если для  $R = 103$  км диапазон предельных изменений  $\Delta\theta$  составил более  $\pm 10^\circ$ , то для  $R = 109$  км он уменьшился в два раза. Предельные изменения допустимого угла рассеяния  $\Delta\theta$  определяют значения предельной длительности предреверберационного сигнала. От ширины индикатрисы рассеяния зависит не только среднее значение времени предреверберации, но и расстояние, на котором наблюдается его максимальное значение, а также скорость его нарастания до максимального значения. На этом же рисунке приведен график изменения с расстоянием максимальных отклонений рассеянного сигнала, формирующего предреверберацию, от сигнала, зеркально отраженного от поверхности. Этот график помогает понять причины изменения с расстоянием протяженности предреверберационного сигнала при изменении ширины индикатрисы рассеяния.

На рис. 10 представлены сигналы первых четверок (соответствующих расчету), принятых на расстоянии от источника с 91 до 120 км. Увеличение длительности предреверберационного сигнала при изменении расстояния от источника с 91 до 103 км, а также ее уменьшение при изменении расстояния с 103 до 120 км (на расстоянии 120.6 км первый сигнал четверки исчез, коснувшись дна), наблюдаемое в эксперименте, достаточно хорошо согласуется с расчетом.

Серия расчетов была проведена также для сигналов, имевших три, четыре и пять разворотов на большой глубине. По результатам выполненных расчетов был построен суммарный график (рис. 11) зависимости от расстояния предельной длитель-

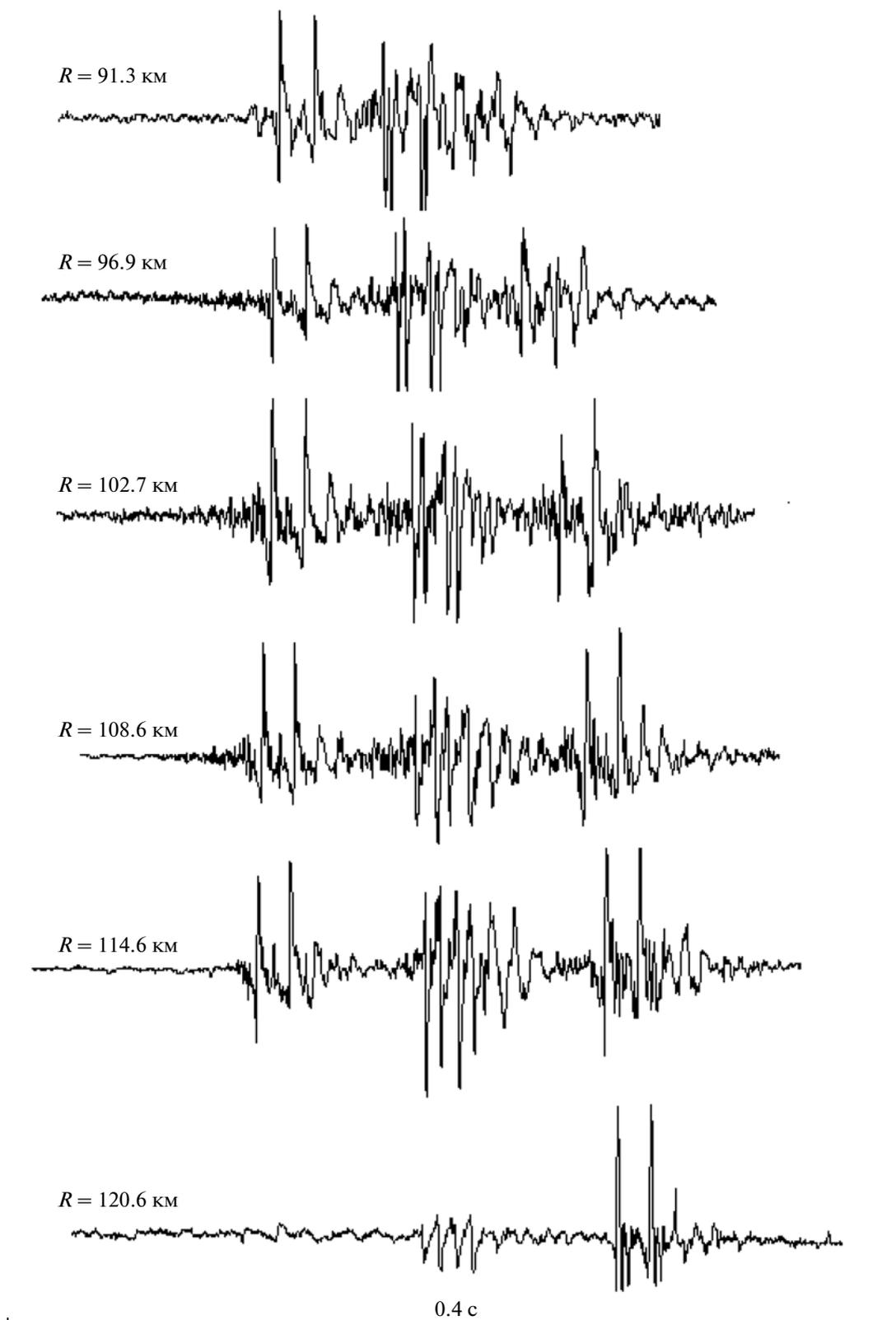
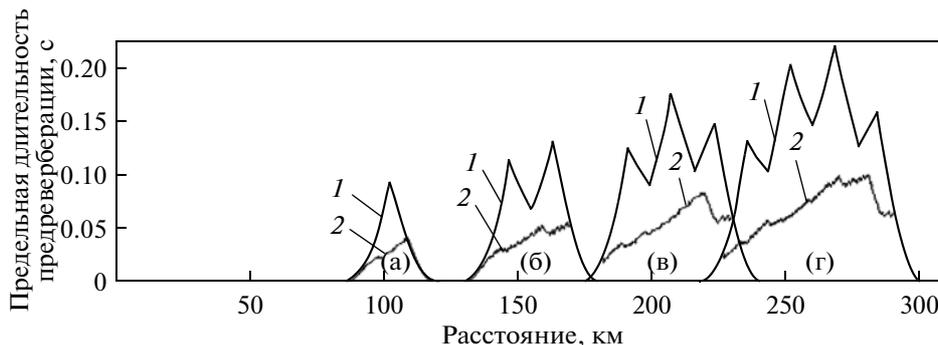


Рис. 10. Различия длительности предреверберации, наблюдаемые при изменении расстояния от источника  $R$ .



**Рис. 11.** Зависимость от расстояния предельной длительности предреверберации (1) и ее длительности при ширине индикатрисы рассеяния  $6^\circ$  (2). Второй опыт – расчет для первых сигналов четверок, развернувшихся на большой глубине 2 (а), 3 (б), 4 (в) и 5 (г) раз.

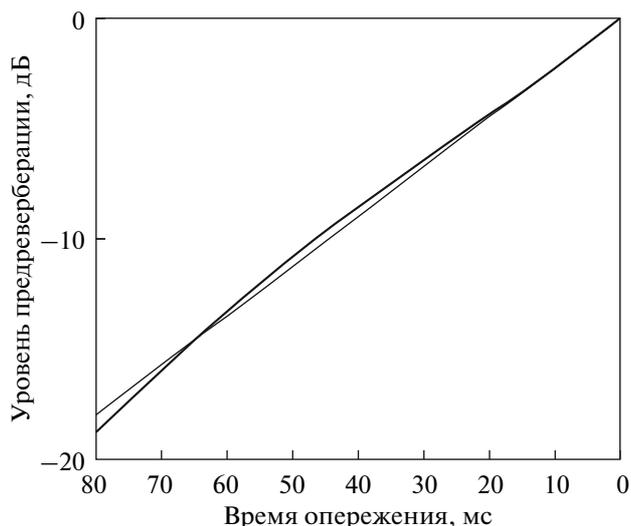
ности предреверберации и длительности предреверберации при ширине индикатрисы рассеяния  $\pm 6^\circ$  для первых сигналов классических четверок, развернувшихся на большой глубине два (а), три (б), четыре (в) и пять (г) раз. На 300-километровом участке трассы четко проявились четыре области существования реверберационного предвестника. Обращает на себя внимание различие зависимости от расстояния предельных времен реверберации для каждой из этих областей. Если в ближней к приемному судну области эта зависимость имеет явно выраженный один максимум, то в следующих за ней второй, третьей и четвертой областях количество максимумов увеличивается до двух, трех и четырех соответственно. Такое изменение количества максимумов обусловлено различием протяженности зон засветки поверх-

ности сигналами и различием количества этих зон при разной кратности разворота на большой глубине. При ограничении ширины индикатрисы рассеяния эти различия несколько нивелируются. Следует также отметить, что между второй, третьей и последующими областями существования предреверберации наблюдается их частичное перекрытие. Отметим также, что средние значения предельной длительности предреверберации по каждой из четырех областей ее существования изменяются пропорционально расстоянию от источника.

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРЕДРЕВЕРБАЦИИ (ПО МАТЕРИАЛАМ ДВУХ ОПЫТОВ)

В работе [6] для упрощенной модели океана (приповерхностный канал, постоянный от поверхности до дна градиент скорости звука, источник и приемник у поверхности) в лучевом приближении для ветрового волнения  $\sim 5$  баллов при определенных характеристиках спектра волнения был проведен расчет крутизны нарастания интенсивности предреверберационного сигнала. Результаты расчета в линейно-логарифмическом масштабе представлены на рис. 12. Обращает на себя внимание: в таком масштабе зависимость уровня предреверберационного сигнала от времени близка к линейной (скорость нарастания расчетного уровня предреверберации составила 225 дБ/с). Именно такой масштаб отображения временной структуры квадрата амплитуды предреверберационного сигнала и был выбран нами для анализа закона нарастания предреверберации, экспериментально наблюдаемого в тихоокеанских опытах.

На результате оценки экспериментального закона нарастания предреверберации не может не сказываться шумовая помеха. Для снижения ее влияния квадрат амплитуды предреверберационного сигнала уменьшался на среднее значение квадрата амплитуды помехи, определенное на



**Рис. 12.** Нарастание предреверберации.

Толстая кривая – расчет [6] для идеализированного приповерхностного канала, тонкая линия – линейная аппроксимация (скорость нарастания 225 дБ/с).

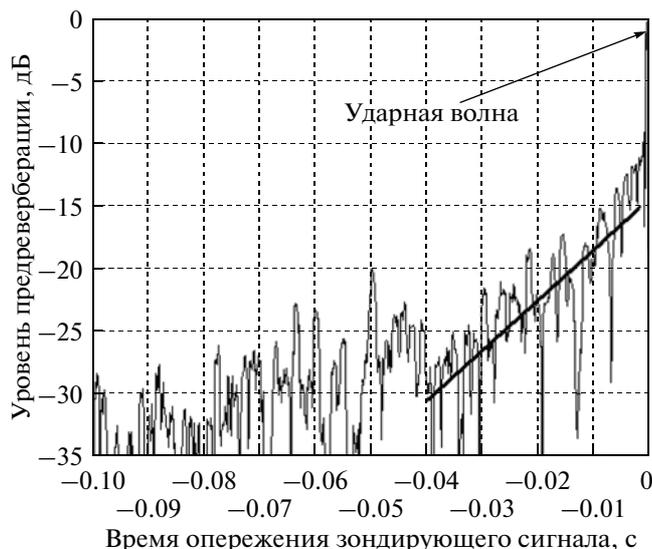


Рис. 13. Первый опыт. Нарастание предреверберационного сигнала.

$R = 85.4$  км, глубина источника 150 м, глубина приемника 80 м.

интервале времен опережения, превышающих длительность предреверберации. Для сглаживания кривой нарастания сигнала было проведено скользящее усреднение предреверберационного сигнала по интервалу 1 мс.

#### Первый опыт

Явное монотонное нарастание предреверберационного сигнала при глубине подрыва зарядов 150 м на расстоянии 85.4 км от источника наблюдается за 35–45 мс до вступления ударной волны. Скорость нарастания уровня предреверберации  $\beta$ , определенная для этого сигнала на интервале  $-40 \dots -2$  мс, составила 403 дБ/с. Пересечение аппроксимирующей прямой с ударной волной (см. рис. 13) произошло на уровне  $V = -14.6$  дБ отно-

сительно максимума зондирующего сигнала (в нашем случае относительно максимума ударной волны).

При глубине подрыва зарядов 50 м практически на том же расстоянии от источника (87.1 км) явное монотонное нарастание предреверберационного сигнала наблюдалось за 60–70 мс до вступления ударной волны. Скорость нарастания сигнала при этом составила 136.9 дБ/с, пересечение аппроксимирующей прямой с ударной волной произошло на уровне  $V = -22.6$  дБ.

Результаты анализа предреверберационных сигналов, принятых и зарегистрированных в широкой полосе частот (50–2500 Гц) на расстоянии от источника  $70 \text{ км} < R < 120 \text{ км}$ , представлены в табл. 1. При глубине подрывов 150 м были получены, как правило, более высокие значения  $\beta$  и менее высокие значения  $V$ . При этой глубине подрывов наблюдалась тенденция к росту параметра  $\beta$  с увеличением расстояния. При глубине подрывов 50 м систематических изменений этих параметров с расстоянием от источника не наблюдалось.

Несколько слов о времени предреверберации “ $T$ ”. Понятие “реверберация” в гидроакустику пришло из архитектурной акустики, акустики замкнутых помещений. Там же для количественной оценки одной из основных акустических характеристик того или иного помещения было введено понятие “время реверберации  $T$ ” — время, за которое уровень реверберации спадает на 60 дБ (см. [7], стр. 421). В четвертой и восьмой колонке таблицы приведены результаты пересчета скорости нарастания предреверберации во время предреверберации — время, за которое уровень предреверберации поднялся бы на 60 дБ. Это одна из энергетических и временных характеристик предреверберации, поддающаяся инструментальной оценке по экспериментальным данным.

Частотная зависимость параметров  $\beta$  и  $V$  исследовалась на сигналах, принятых на расстоя-

Таблица 1. Результаты анализа материалов первого опыта. Зависимость параметров закона нарастания предреверберационного сигнала от расстояния

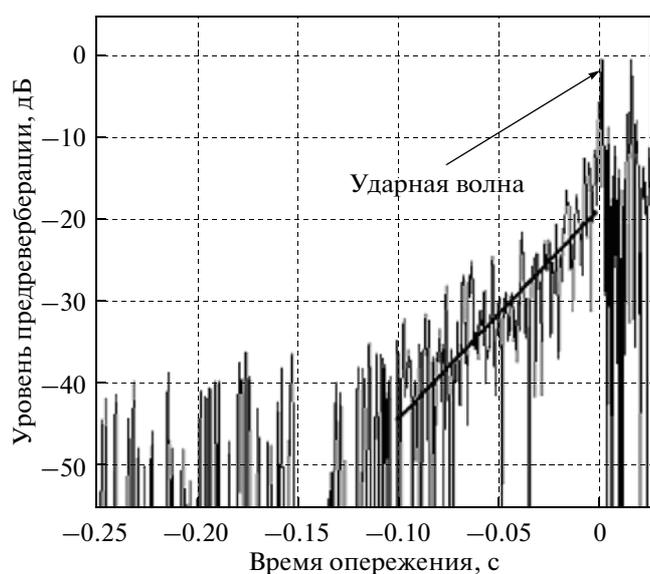
Глубина подрыва 150 м, глубина приема 80 м				Глубина подрыва 50 м, глубина приема 80 м			
$R$ , км	$\beta$ , дБ/с	$V$ , дБ	$T$ , мс	$R$ , км	$\beta$ , дБ/с	$V$ , дБ	$T$ , мс
72.8	322.0	-21.3	186	74.5	203.6	-25.2	295
79.1	476.2	-12.6	126	80.8	358.0	-17.0	168
85.4	403.0	-14.6	149	87.1	136.9	-22.6	438
91.8	482.0	-11.1	124	93.4	128.9	-15.1	465
98.1	416.3	-18.8	144	99.7	90.2	-24.4	665
104.5	487.6	-12.4	123	106.1	454.7	-11.7	132
111.5	604.3	-13.9	99	112.4	361.7	-17.3	166
118.6	640.0	-7.9	94	118.8	279.9	-10.0	214

**Таблица 2.** Результаты анализа материалов первого опыта. Частотная зависимость параметров закона нарастания предреверберационного сигнала

Частота, Гц	Глубина подрыва 150 м, $R = 85.4$ км			Глубина подрыва 50 м, $R = 87.1$ км		
	$\beta$ , дБ/с	$B$ , дБ	$T$ , мс	$\beta$ , дБ/с	$B$ , дБ	$T$ , мс
160	333.6	-11.8	180	180.1	-15.4	331
250	334.0	-9.6	180	259.6	-15.8	231
400	586.7	-9.6	102	224.8	-12.9	267
630	690.1	-11.8	87	244.1	-17.8	246
1000	441.6	-13.3	136	99.2	-24.3	605
1600	334.9	-10.9	179	175.1	-13.2	343
2000	419.4	-7.9	143	195.4	-10.0	307
Ш.п.	403.0	-14.6	149	136.9	-22.6	438

нии  $\sim 86$  км от источника. Сигналы фильтровались в октавных полосах с центральными частотами, отстоящими друг от друга на  $2/3$  октавы (кроме последней пары полос). Результаты проведенного в частотном диапазоне 100–2500 Гц анализа представлены в табл. 2. Для сравнения в последней строчке таблицы приведены результаты анализа этих же сигналов в широкой полосе частот.

Максимальные значения параметра  $\beta$  и минимальные значения времени предреверберации  $T$  наблюдались на частотах 400–630 Гц при подрыве зарядов на глубине 150 м и 250–630 Гц при глубине подрыва 50 м; изменения параметра  $B$  не носили регулярного характера.



**Рис. 14.** Второй опыт. Нарастание предреверберационного сигнала.

$R = 102.6$  км, глубина источника 200 м, глубина приемника 250 м.

### Второй опыт

Явное монотонное нарастание предреверберационного сигнала при глубине подрыва зарядов 200 м и приема на горизонте 250 м на расстоянии 102.6 км от источника наблюдается за 80–100 мс до вступления ударной волны (см. рис. 14). На таком расстоянии от источника в этом опыте наблюдалась максимальная длительность предреверберации. Скорость нарастания предреверберации  $\beta$ , определенная для этого сигнала, составила 260 дБ/с. Пересечение аппроксимирующей прямой с ударной волной произошло на уровне  $B = -18.3$  дБ относительно зондирующего сигнала. Скорость нарастания реверберационного сигнала определялась по изменению уровня предреверберации на участке от  $-100$  до  $-2$  мс.

В табл. 3 приведены параметры  $\beta$  и  $B$ , определенные для сигналов, принятых на приемники, расположенные на глубинах 250 и 600 м при различных расстояниях от источника. В таблице представлены расчетные значения времен максимального опережения предреверберацией зондирующего сигнала (ударной волны)  $\Delta T$ . При удалении от источника с 102.6 до 111.6 км скорость нарастания предреверберационного сигнала увеличивается с 262.5 до 650 дБ/с ( $\sim$  в 2.5 раза) на горизонте приема 250 м и с 254.1 до 612 дБ/с ( $\sim$  в 2.4 раза) на горизонте приема 600 м. При приближении к источнику с 102.6 до 94.1 км скорость его нарастания увеличивается с 262.5 до 845 дБ/с ( $\sim$  в 3.2 раза) на горизонте 250 м и с 254.1 до 817.7 дБ/с (также  $\sim$  в 3.2 раза) на горизонте 600 м. На момент прихода зондирующего сигнала уровень предреверберации относительно его пикового значения изменяется в пределах  $-15 \dots -25$  дБ. Эти изменения не носят регулярного характера (они довольно хаотичны). Максимальное значение времени предреверберации наблюдалось для горизонта приема 250 м на расстоянии 102.6 км, что хорошо согласуется с результатами расчета предельной ее длительности (см. рис. 9), для горизонта приема 600 м — на расстоянии

**Таблица 3.** Результаты анализа материалов второго опыта. Зависимость параметров закона нарастания предревверберационного сигнала от расстояния

$R$ , км	Приемник на глубине 250 м				Приемник на глубине 600 м			
	$\Delta T$ , мс	$\beta$ , дБ/с	$B$ , дБ	$T$ , мс	$\Delta T$ , мс	$\beta$ , дБ/с	$B$ , дБ	$T$ , мс
111.6	22.5	650	-15.4	92	16.4	612	-16.2	98
108.6	42.0	538.4	-16.6	111	35.0	540.4	-16.0	111
104.7	70.0	301.6	-17.5	199	63.0	273.5	-21.9	219
102.6	91.7	262.5	-19.0	229	78.0	254.1	-21.4	236
99.8	66.0	385.5	-14.8	156	92.0	253.4	-25.5	237
96.9	37.0	407.9	-22	147	58.5	332.0	-20.9	181
94.1	25.0	845.0	-15.65	71	34.0	817.7	-16.3	97

**Таблица 4.** Результаты анализа материалов второго опыта. Частотная зависимость параметров закона нарастания предревверберационного сигнала

$H_{пр}$ , м	$R$ , км	$\beta$ , дБ/с ( $B$ , дБ)							
		200 Гц	250 Гц	315 Гц	400 Гц	500 Гц	630 Гц	800 Гц	1000 Гц
250	99.8	408(-17)	362(-20)	374(-17)	236(-19)	349(-12)	300(-13)	262(-12)	240(-13)
250	102.6	310(-17)	240(-21)	252(-18)	288(-14)	287(-14)	243(-17)	286(-15)	238(-16)
250	104.7	390(-13)	426(-13)	400(-13)	340(-13)	414(-13)	360(-17)	298(-18)	170(-17)
600	99.8	150(-24)	210(-22)	237(-19)	246(-20)	270(-19)	276(-17)	193(-20)	170(-22)
600	102.6	337(-15)	305(-17)	237(-19)	256(-20)	259(-18)	250(-17)	236(-18)	252(-16)
600	104.7	262(-19)	436(-18)	379(-18)	350(-21)	230(-23)	206(-22)	250(-19)	249(-16)

102.6–99.8 км, что также подтвердилось выполненными расчетами (результаты этих расчетов приведены в [4]).

Частотная зависимость предревверберации в этом опыте исследовалась на сигналах, принятых на расстояниях 99.8, 102.6 и 104.7 км, когда расчетные значения предельной длительности предревверберационного сигнала превышали 65 мс. Сигналы фильтровались в октавных полосах с центральными частотами, отстоящими друг от друга на 1/3 октавы.

Значения параметров  $\beta$  и  $B$  (в скобках), полученные для диапазона частот 200–1000 Гц в результате проведенного анализа, представлены в табл. 4. В этом диапазоне частот наблюдаются незначительные изменения параметров  $\beta$  и  $B$ , явной частотной их зависимости не отмечается. Среднеквадратическое значение разброса параметра  $\beta$  на расстоянии от источника 102.6 км составило 10% от его среднего значения для горизонта приема 250 м и 13% от его среднего значения для горизонта приема 600 м.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На основании результатов анализа материалов двух опытов, проведенных при разных гидрологических и метеорологических условиях, а также результатов расчета временной структуры бистатистической поверхностной предревверберации, выполненного с использованием изложенной выше методики для реальных гидрологических условий проведения этих опытов, можно сделать следующие выводы.

– В формировании предревверберационного сигнала принимает участие взволнованная поверхность океана на ограниченных участках трассы, расположенных между источником и приемником в зонах выхода лучей к поверхности после предварительного их заглубления. Регистрируется предревверберационный сигнал на ограниченных участках трассы в зонах выхода лучей к поверхности, начиная со второй (в первой зоне предревверберация не наблюдается).

– Существуют предельные длительности предревверберации, определяемые гидрологическими условиями и не зависящие от раствора индикатора.

трисы рассеяния сигнала взволнованной морской поверхностью.

При гидрологических условиях первого опыта (для источника и приемника, расположенных на глубинах 150 и 80 м соответственно) предельные длительности предреверберации при растворе индикатрисы рассеяния  $3^\circ$  наблюдались бы на расстоянии 108–120 км, при растворе индикатрисы  $6^\circ$  – на расстоянии 99–120 км, при растворе индикатрисы  $9^\circ$  – на расстоянии 90–120 км. Так проявляется влияние дна на формирование предреверберации.

При гидрологических условиях второго опыта изменения длительности предреверберации с расстоянием во второй зоне выхода лучей к поверхности хорошо согласуются с результатами расчета предельной длительности. На расстоянии 102.5 км от источника наблюдается максимальное значение длительности предреверберации; при увеличении и уменьшении расстояния длительность предреверберации уменьшается. В этом случае сказывается не только влияние дна, но и влияние подводного звукового канала, той его части, которая удерживает только водные лучи.

Для гидрологических условий второго опыта по результатам серии расчетов, проведенных для сигналов, имевших два, три, четыре и пять разворотов на большой глубине, проявились четыре области существования предреверберации на 300-километровом участке трассы. Если в ближней к приемному судну области зависимость предельной длительности предреверберации от расстояния имеет явно выраженный один максимум, то в следующих за ней второй, третьей и четвертой областях количество максимумов увеличивается до двух, трех и четырех соответственно. Такое изменение количества максимумов обусловлено различием протяженности зон засветки поверхности сигналами и количеством этих зон при разной кратности рефракционного разворота зондирующего сигнала на большой глубине. Средние значения предельной длительности реверберации по каждой из четырех областей существования предреверберации изменяются пропорционально расстоянию от источника.

– Материалы двух опытов анализировались с целью оценки скорости нарастания предреверберации  $\beta$ , ее максимального уровня  $V$  относительно зондирующего сигнала (ударной волны) в зависимости от расстояния до источника и частоты (при фильтрации сигналов в октавных полосах).

По материалам первого опыта. При глубине источника 150 м были получены более высокие значения параметра  $\beta$  и менее высокие значения параметра  $V$  по сравнению с расположением источника на глубине 50 м. При этом наблюдалась тенденция к росту параметра  $\beta$  с увеличением расстояния от источника, чего при глубине ис-

точника 50 м не наблюдалось. При анализе частотной зависимости этих параметров максимальные значения  $\beta$  и минимальные значения параметра  $V$  были получены на частотах  $\sim 400$  Гц. К сожалению, проведение второго этапа этого опыта происходило после довольно резкого изменения скорости ветра. Увеличение скорости ветра продолжалось и во время всего опыта. При развивающемся волнении интерпретация результатов проведенного анализа затруднительна.

По материалам второго опыта. Принимая во внимание тот факт, что значения параметра  $\beta$  обратно пропорциональны длительности предреверберации, следует признать полученные экспериментально изменения параметра  $\beta$  с расстоянием хорошо согласующимися с результатами расчета предельной длительности предреверберации. Минимальному значению  $\beta$  (на расстоянии 102.5 км от источника) соответствует максимальное значение длительности предреверберации, увеличению значения  $\beta$  с увеличением и уменьшением расстояния до источника соответствует уменьшение длительности предреверберации. При фильтрации сигналов в октавных частотных полосах явной частотной зависимости параметров  $\beta$  и  $V$  не выявлено. Одной из наиболее вероятных причин независимости этих параметров от частоты может быть достаточно высокий угловой раствор индикатрисы рассеяния звука взволнованной морской поверхностью на каждой из анализируемых частот. В этом случае длительность предреверберации – предельная, зависящая, как показали расчеты, только от гидрологических условий.

В заключение – о терминологии. В ранее опубликованных работах по предреверберации (в том числе и автора данной статьи) нередко “длительность предреверберации” обозначалась как “время реверберации”. Однако в акустике за “время реверберации” издавна принималось время, за которое уровень реверберации спадает на 60 дБ. По-видимому, было бы целесообразно и вполне естественно под “временем предреверберации” понимать время, за которое уровень предреверберации изменится (увеличится) на 60 дБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В. К теории предреверберации звука в океане // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239. С. 211–213.
2. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана (Памятники отечественной науки. XX век). М.: Наука, 2007. 370 С.
3. Вадов Р.А. Временная структура бистатической реверберации при дальнем распространении взрывных сигналов // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 2. С. 207–215.

4. *Вадов Р.А.* Поверхностная предреверберация при дальнем распространении взрывных сигналов в подводном звуковом канале // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 2. С. 169–178.
5. *Копыл Е.А., Лысанов Ю.П.* Оценки времен и углов прихода поверхностной предреверберации в океане // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 658–661.
6. *Лысанов Ю.П., Фролов В.М.* Временная зависимость интенсивности высокочастотной поверхностной предреверберации звука в океане // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 6. С. 841–843.
7. *Морз Ф.* Колебания и звук : пер. с англ. М-Л.: ГИТТЛ. 1949. 449 С.
8. *Студеничник Н.В.* Явление предреверберации в подводном звуковом канале // Сб. докл. IX Акустической конференции. М.: АН СССР, 1977. Секция Д. С. 45–48.
9. *Студеничник Н.В.* Исследования времен предреверберации в глубоководном и приповерхностном звуковых каналах // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 1. С. 123–130.
10. *Тебякин В.П. и др.* Raymod52 – базовый комплекс программ для вычисления звуковых полей в слоисто-неоднородном океане лучевым методом // Отчет АКИН. М.: АКИН, 1990.

## Peculiarities of Pre-Reverberation Formed during Long Range Propagation of Explosive Signals

R. A. Vadov<sup>†</sup>

Researchers repeatedly observed bi-static superficial reverberation in experiments on long range propagation of the explosive signals carried out in various regions of the World Ocean, which not only accompanied the probe signal (mirroring with respect to the sea surface), but also preceded it. The part of reverberation preceding the probe signal was named “pre-reverberation”. The theoretical explanation of this phenomenon within the idealized model of the sea environment in the conditions of the near-surface sound channel was given in 1978 and only in the beginning of the 2000s, the calculation procedure of the time structure of pre-reverberation in the real conditions of sound propagation in the ocean was developed. A series of the calculations executed by this technique for the conditions of carrying out of two experiments (the near-surface sound channel and the underwater sound channel at a sound speed at the bottom, exceeding its value at a surface), led to an improvement of our knowledge about the mechanism of formation of the structure of the pre-reverberation signal. Besides a brief description of publications of other authors on this theme, a description of the calculation procedure of the time structure of pre-reverberation signal is given here and a brief description of conditions of carrying out of the two experiments, in which pre-reverberation was observed, was presented. The results of the analysis are analyzed.