

ПОВЕРХНОСТНАЯ ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИЯ ПРИ ДАЛЬНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ВЗРЫВНЫХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

© 2011 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: vadov@akin.ru

Поступила в редакцию 08.07.09 г

Приводятся результаты анализа экспериментальных данных по дальнему распространению взрывных сигналов в условиях сформированного подводного звукового канала. Во время опыта скорость ветра достигала 10–11 м/с, волнение поверхности – 4–6 баллов. На расстоянии 80–120 км от источника при приеме взрывных сигналов на двух разных глубинах наблюдалась предреверберация – опережение части бистатической поверхностной реверберации зондирующего сигнала. Обсуждаются условия возникновения предреверберации на разных расстояниях от источника. По результатам обработки экспериментальных материалов оценивается скорость нарастания предреверберационного сигнала, его уровень относительно зондирующего сигнала и его частотная зависимость.

Ключевые слова: бистатическая реверберация, предреверберация, подводный звуковой канал, дальнее распространение, взрывные сигналы, рассеяние сигнала на взволнованной поверхности, скорость нарастания предреверберации, уровень предреверберации.

В опытах по дальнему распространению взрывных сигналов при исследовании временной структуры звукового поля на достаточном удалении от источника нередко наблюдалось зашумление принятого многолучевого сигнала, обусловленное рассеянием звука на взволнованной поверхности океана – бистатической поверхностной реверберацией (источник и приемник разнесены по горизонтали). Реверберационный фон появлялся, несколько опережая зондирующий сигнал, монотонно возрастая и достигая максимальных значений непосредственно перед его приходом. При проведении таких опытов экспериментаторам иногда на слух по нарастающему “гулу” удавалось предугадывать момент прихода взрывного сигнала к приемной системе. Предваряя приход к приемнику первого элементарного сигнала (из регистрируемых на данном расстоянии от источника), возникающий реверберационный фон являлся предвестником зондирующего сигнала в опытах по дальнему распространению звука в подводном звуковом канале (ПЗК).

Впервые на реверберационный фон, предваряющий сигнал, распространяющийся в приповерхностном (при положительном градиенте скорости звука от поверхности до дна) канале, обратил внимание Н.В. Студеничник [1]. Эта часть реверберационного фона в отличие от привычного, следующего за сигналом, получила название

“предреверберация”. На примере упрощенной идеализированной модели (приповерхностный канал с постоянным по глубине градиентом скорости звука, источник и приемник расположены у поверхности) было дано физическое объяснение наблюдаемому явлению [2]. В рамках такой же упрощенной модели в лучевом приближении (в приближении касательных плоскостей) для ветрового волнения при скорости ветра ~10 м/с (спектр волнения – по Пирсону–Нейману) был проведен расчет крутизны нарастания интенсивности высокочастотного предреверберационного сигнала [3], формируемого на расстоянии 100 км от источника. В начале 2000-х гг. была разработана методика расчета временной структуры предреверберации для реальных условий проведения эксперимента [4]. Были проведены расчеты временной структуры предреверберации в зимнем приповерхностном канале, а также в условиях сформированного ПЗК при скорости звука у дна, превышающем ее значение у поверхности [5].

В данной работе представлены некоторые результаты анализа экспериментальных материалов опыта по дальнему распространению взрывных сигналов, проведенного осенью 1986 года в северной части Тихого океана. Трасса распространения сигналов была сориентирована в меридиональном направлении.

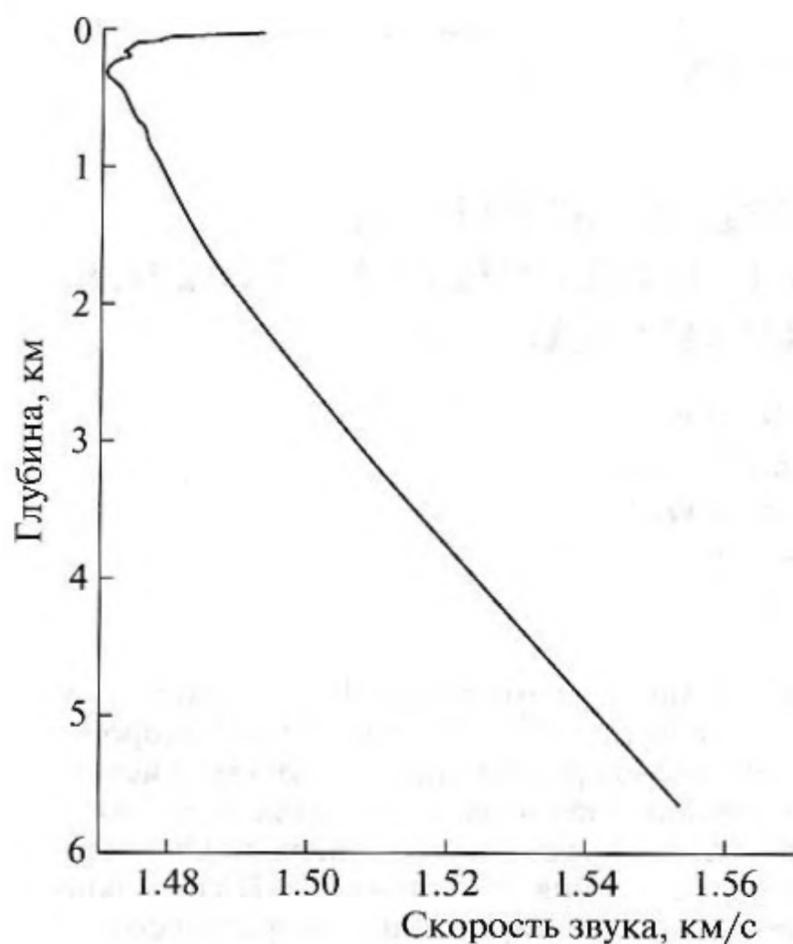


Рис. 1. Профиль изменения скорости звука с глубиной, зарегистрированный на расстоянии 60 км от приемного судна.

Опыт проводился в условиях сформированного ПЗК при значении скорости звука у дна, превышающем его значение у поверхности на 50–55 м/с. Ось ПЗК находилась на глубине около 300 м. Толщина перемешанного приповерхностного слоя составила 35–45 м. Глубина океана в районе работ изменялась в пределах 5200–5600 м. Во время опыта скорость ветра достигала 10–11 м/с (направление 290–310°), ветровое волнение – 4–6 баллов. Профиль изменения скорости звука с глубиной, зарегистрированный на расстоянии 60 км от приемного судна, представлен на рис. 1.

При проведении эксперимента малые заряды ВВ (детонаторы гидростатического действия) сбрасывались с излучающего судна через каждые 2–3 км, что позволило получить достаточно полную информацию о временной структуре звукового поля, формирующейся на исследуемой трассе. Подрыв зарядов производился на глубине 200 м, прием взрывных сигналов осуществлялся на ненаправленные системы, расположенные на двух глубинах: 250 м и 600 м. Принятые взрывные сигналы регистрировались на магнитную пленку с последующим преобразованием в цифровую форму. При этом использовался 12-разрядный преобразователь “аналог-код”, частота квантования составляла 10 кГц.

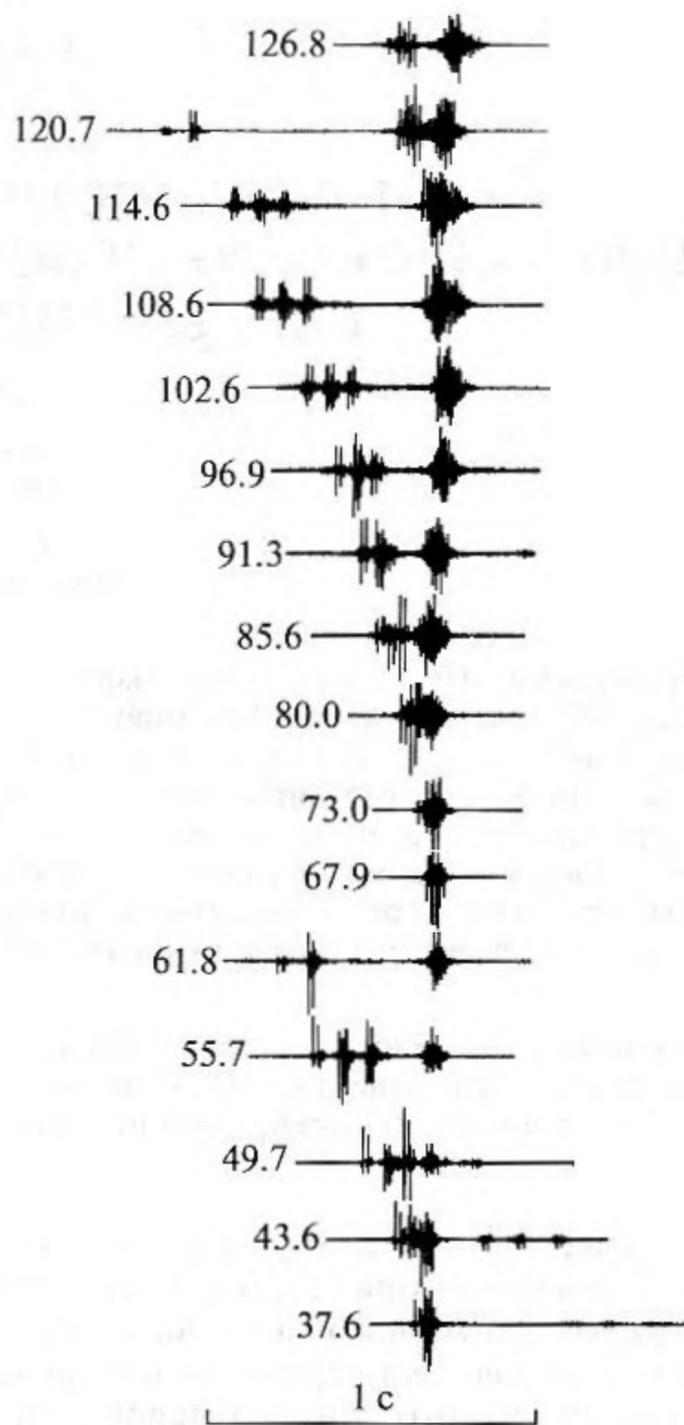


Рис. 2. Временная структура взрывных сигналов на расстоянии 37–137 км от источника. Глубина источника 200 м, глубина приемника 250 м.

ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

На рис. 2 представлена временная структура взрывных сигналов, зарегистрированных на 120-километровом начальном участке трассы. Сигналы представлены выборочно с шагом ~ 6 км по дистанции. Временная структура звукового поля близка к классической [6]. Зарегистрированный многолучевой взрывной сигнал распадается на три группы элементарных сигналов.

Первая – наиболее мощная основная группа практически не разделяющихся во времени элементарных (однолучевых) сигналов, распространяющихся вблизи от оси ПЗК.

Вторая – группа элементарных сигналов, чисто водных, а также испытавших отражение от поверхности, которые приходят к приемнику с некоторым опережением относительно основной группы. Из-за явной асимметрии ПЗК элемен-

тарные сигналы этой группы формируются в виде разделяющихся между собой классических четверок. При удалении от источника опережение четверки относительно основной группы увеличивается, из четверок формируются отдельные "ветви", различающиеся количеством полных циклов N , описываемых средними сигналами четверки относительно оси ПЗК. На некотором расстоянии от источника сигнал касается дна и соответствующая ему "ветвь" обрывается. Представленные на рис. 2 четверки этой группы образуют первую (на расстоянии 40–60 км от источника) и вторую (на расстоянии 80–120 км) ветви. Средние сигналы первой ветви ($N = 1$) описывают один полный цикл относительно оси ПЗК, средние сигналы второй ветви ($N = 2$) описывают два цикла. Различие времен распространения второго и третьего сигналов в четверках незначительное, так как источник и приемник расположены на достаточно близких глубинах (200 и 250 м). В результате предварительного анализа временной структуры звукового поля было установлено, что зарождающиеся четверки чисто водных слабо разделяющихся между собой сигналов при незначительном последующем увеличении расстояния от источника преобразуются в четверки сигналов, касающихся поверхности океана.

Третья – группа элементарных сигналов, испытавших отражение от дна и поверхности, и приходящих в точку приема с некоторым запаздыванием относительно основной (первой) группы. Эта группа сигналов в опыте выражена слабо, так как при удалении от источника на 50 км и более сигналы этой группы, вследствие многократного отражения от дна, практически полностью исчезают.

ХАРАКТЕР НАБЛЮДАЕМОЙ ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИИ

На рис. 3 представлена структура взрывного сигнала, зарегистрированного на расстоянии 102.6 км от источника, которая является предметом обсуждения. Наблюдается полный многолучевой сигнал (а) длительностью ~ 0.6 с, из которого выделена классическая четверка элементарных сигналов (б), а также первый сигнал четверки (в), испытавший одно отражение от поверхности океана. Этот сигнал отразился от участка поверхности, удаленного как от источника, так и от приемника на расстояние ~ 50–55 км. Сигналу предшествует реверберационный фон, обусловленный рассеянием звука на взволнованной поверхности океана.

Следует отметить, 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 (дли-

тельностью < 1мс) импульса, равных по величине, одного и того же знака (ударная волна и первая пульсация газового пузыря).

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БИСТАТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Для того чтобы возникла поверхностная реверберация, предшествующая первому сигналу четверки, представленной на рис. 3, необходима засветка некоторого участка поверхности океана. Для того чтобы реверберационный сигнал сопутствовал сигналу, зеркально отраженному от поверхности, требуется засветка поверхности океана прямыми сигналами, аналогичными (по конфигурации траектории распространения) основному сигналу. На схеме, представленной на рис. 4а, это лучевые траектории, выходящие из источника S в сторону дна. Дальняя граница зоны засветки поверхности определяется расстоянием R_1 (по горизонтали) от источника S , на котором к поверхности придет сигнал, развернувшийся на глубине, равной глубине океана (распространяющийся вдоль луча 1). При расположении приемника на той же глубине, что и источник, к нему придет сигнал, рассеянный на поверхности океана, и удаленной от приемника на расстояние, не превышающее R_1 . В условиях сформированного ПЗК, когда скорость звука у дна превышает значение у поверхности, существует и ближняя граница зоны засветки, определяемая расстоянием R_2 . Она определяется условием, при котором к поверхности вдоль лучевой траектории 2 придет сигнал с нижней точкой заворота на глубине, где скорость звука принимает значение, равное максимальному ее значению в приповерхностном слое океана. При расположении приемника на той же глубине, что и источник, к нему придет сигнал, рассеянный на поверхности океана, удаленной от приемника на расстояние, превышающее R_2 .

Таким образом, на приемнике реверберационный сигнал, являющийся предвестником зондирующего сигнала, будет наблюдаться лишь на расстоянии от источника R_0 , удовлетворяющем условию:

$$2R_2 < R_0 < 2R_1.$$

Для иллюстрации на рис. 4б схематично представлены три варианта образования зон формирования поверхностной предреверберации:

1) протяженность зоны формирования предреверберации зависит только от дальней границы засветки поверхности, определяемой расстоянием R_2 ;

2) протяженность зоны формирования предреверберации зависит только от ближней грани-

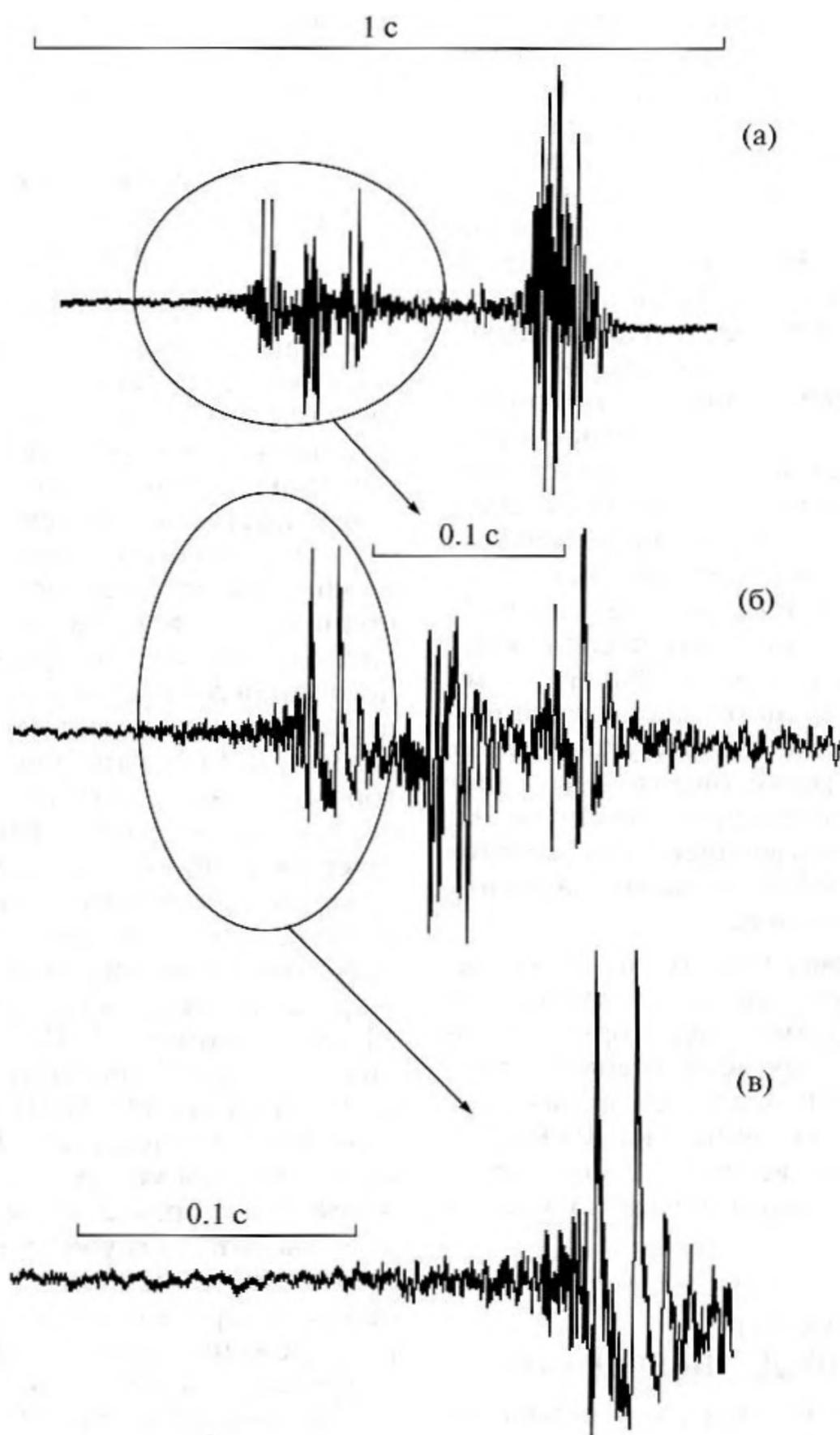


Рис. 3. Структура взрывного сигнала на расстоянии 102.6 км от источника: а) полный многолучевой сигнал; б) классическая четверка элементарных сигналов; в) первый сигнал четверки, испытавший одно отражение от поверхности океана.

цы засветки поверхности, определяемой расстоянием R_1 ;

3) максимальная протяженность зоны формирования предреверберации зависит как от ближней, так и от дальней границы засветки поверхности.

В случае расположения источника и приемника на разных глубинах данное условие будет иметь вид:

$$R_{2S} + R_{2Q} < R_0 < R_{1S} + R_{1Q},$$

где нижние индексы "S" и "Q" относятся к расстояниям от излучателя и от приемника, соответственно.

При глубине моря 5400 м, профиле скорости звука, представленном на рис. 1, и расположении источника и приемника на глубине 200–250 м: $R_1 \approx 60$ км, $R_2 \approx 42$ км. Предреверберация будет наблюдаться на расстоянии от источника от 84 до 120 км. Результаты расчетов, выполненных для реальных условий проведения опыта [5], подтвердили этот вывод.

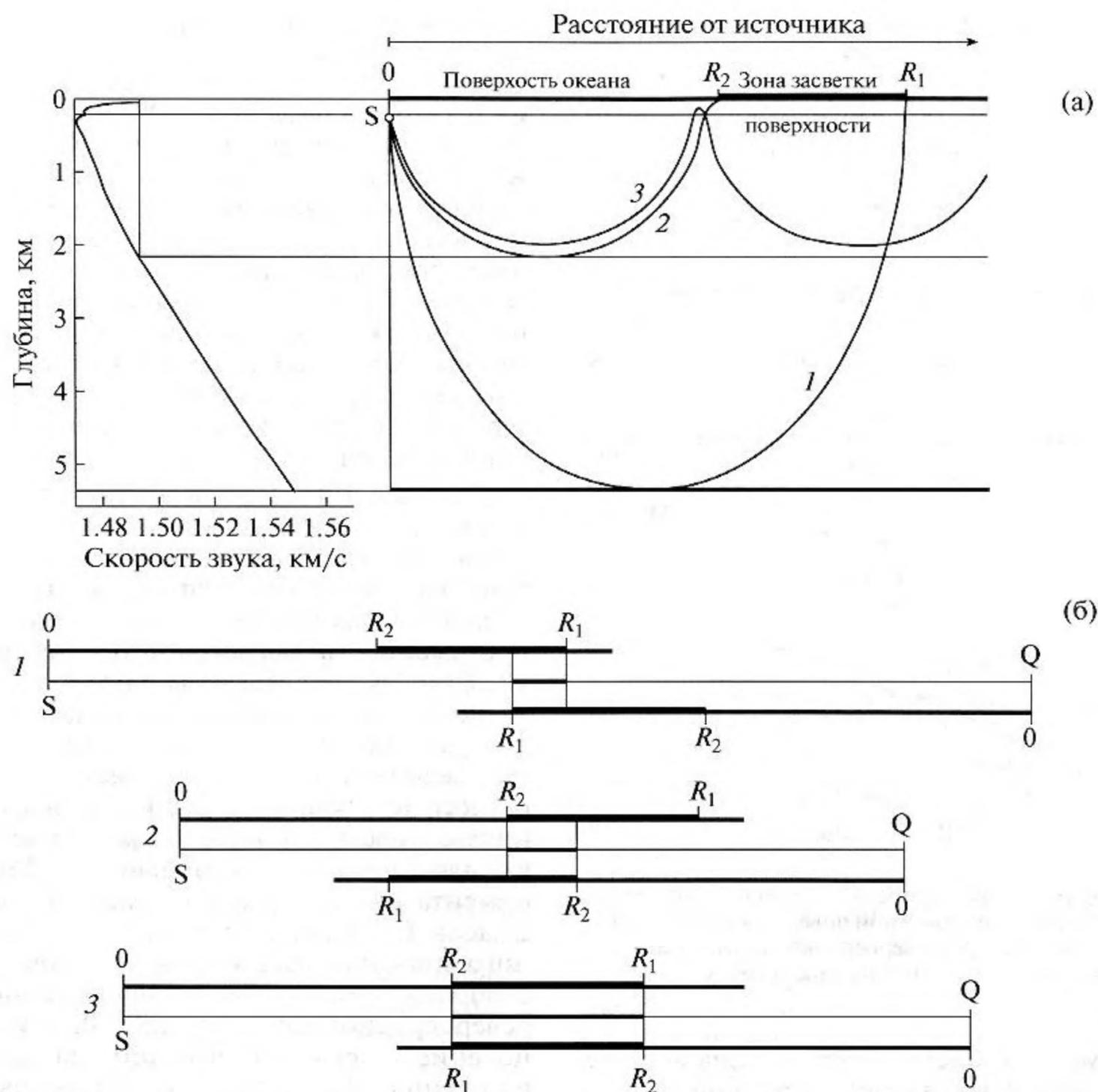


Рис. 4. Зоны поверхности океана, участвующей в формировании предреверберации. Профиль изменения скорости звука с глубиной и лучевая картина, определяющая зону засветки поверхности: 1 – луч, коснувшийся дна, 2 – луч, развернувшийся на глубине, при которой скорость звука принимает значение, равное максимальному значению в приповерхностном слое океана, 3 – один из лучей, не касающихся ни дна, ни поверхности (а). Протяженность зон формирования предреверберационного сигнала, наблюдаемого на различных расстояниях от источника (б).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРЕДРЕВЕРБЕРАЦИИ

При расчетах, помимо зеркального отражения от поверхности океана, рассматривались также сигналы, рассеянные под углами, отличными от зеркального. Для описания угловой зависимости коэффициента рассеяния звука взволнованной поверхностью океана использовалась индикатриса рассеяния $D_p(\Delta\theta)$, где $\Delta\theta$ – отклонение рассеянного сигнала от зеркального направления в вертикальной плоскости.

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 источни-

ка от 42 до 60 км с шагом ΔR . Расчет проводился дважды. Сначала источник располагается на горизонте подрыва зарядов ВВ, затем – на глубине приемной системы. На первом этапе проводился 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 рассматривались попарно для расстояний от источника, составляющих в сумме R_0 (расстояние от источника до приемника). 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

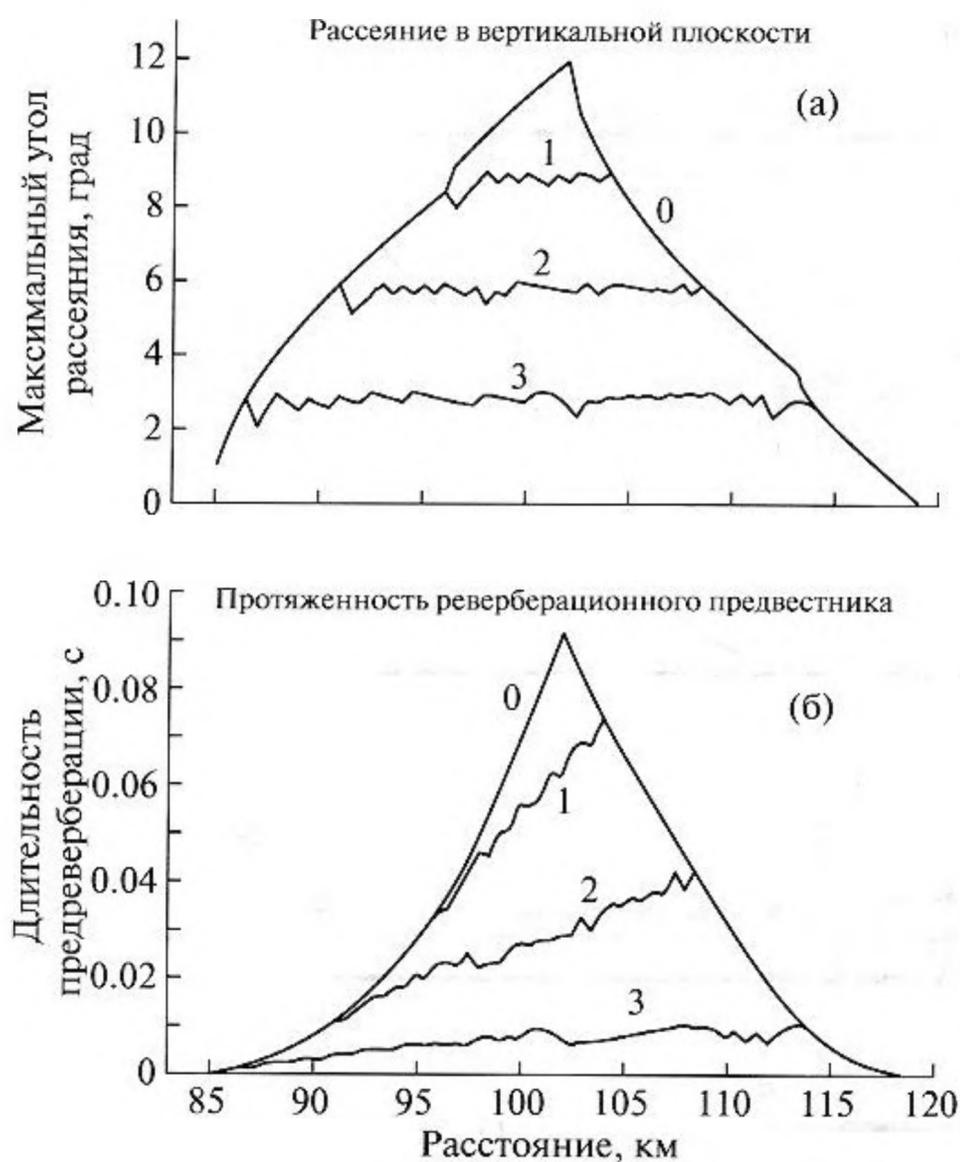


Рис. 5. Расчетная зависимость максимального угла рассеяния звука взволнованной поверхностью океана (а) и длительность предреверберации (б) от расстояния до источника. Глубины приемника 250 м.

характеризует отклонение составляющей рассеянного сигнала от зеркального отражения.

Таким образом, для фиксированного расстояния R_0 и всего диапазона углов $\Delta\theta(R_0)$ определялось время распространения соответствующей составляющей рассеянного поверхностью сигнала, а затем и время опережения прямого, зеркально отраженного от поверхности сигнала. Для каждого взаимного расположения источника и приемника в пределах дистанций 84–120 км определялись максимальные значения разницы времен распространения рассеянного и прямого сигналов, а также отклонения рассеянного сигнала от зеркального направления, определяемые углами $\Delta\theta$. Расчеты элементов звукового поля проводились в лучевом приближении в предположении горизонтальной слоистости океана по программе В.П. Тебякина [8].

ВРЕМЕННАЯ ПРОТЯЖЕННОСТЬ РЕВЕРБАЦИОННОГО ПРЕДВЕСТНИКА

На рис. 5 для горизонта приема 250 м приведены результаты расчета зависимости протяженности реверберационного предвестника от расстояния до источника. На рисунке: 0 — пре-

дельная длительность предреверберации, зависящая только от гидрологических условий; 1, 2, 3 — длительность предреверберации при ширине индикатрисы рассеяния $\pm 9^\circ$, $\pm 6^\circ$ и $\pm 3^\circ$, соответственно. Расчет выполнялся для сигнала, дважды развернувшегося на большой глубине. При ограничении ширины индикатрисы рассеяния меняется не только среднее значение протяженности предреверберации, но и расстояние от источника, на котором наблюдается ее максимальная протяженность. На рис. 5 также приведен график максимальных отклонений рассеянного сигнала, формирующего предреверберацию, от зеркально отраженного, в зависимости от расстояния до источника.

Для расстояний от источника 85–120 км результаты эксперимента (глубина приемника 250 м) достаточно хорошо согласуются с расчетом, выполненным для предельной длительности предреверберационного сигнала. Максимальная протяженность регистрируется на расстоянии 102.6 км. Экспериментально наблюдаемая протяженность предреверберации падает до нуля как при увеличении расстояния до 120 км, так и при его уменьшении до 84 км. Отметим, что во время регистрации взрывных сигналов на этих расстояниях скорость ветра (10–11 м/с) и волнение (4–6 баллов) практически не менялись. Время эксперимента на этом участке трассы не превышало 2 часов. Согласие экспериментального и расчетного значений расстояния от источника до местоположения максимума протяженности предреверберационного сигнала (102.6 км) дает основание утверждать, что ширина индикатрисы рассеяния $\geq 12^\circ$, а протяженность предреверберации определяется только гидрологическими условиями.

Разнесение источника и приемника по глубине приводит к изменениям зависимости длительности предреверберации от расстояния до источника. На рис. 6 приведены результаты расчета предельной длительности для условий опыта при расположении приемной системы на глубине 600 м. Заглубление приемника вызывает расщепление максимума кривой изменения предельной длительности от расстояния. Разнесение двух проявившихся максимумов составило ~ 1.5 км. В эксперименте шаг по расстоянию между соседними подрывами составлял 2–3 км, что не дает возможности подтвердить экспериментально такое расщепление кривой.

СКОРОСТЬ НАРАСТАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРЕДРЕВЕРБАЦИИ ВО ВРЕМЕНИ

Для предварительного анализа изменений уровня предреверберации во времени был выбран реверберационный сигнал, предшествующий

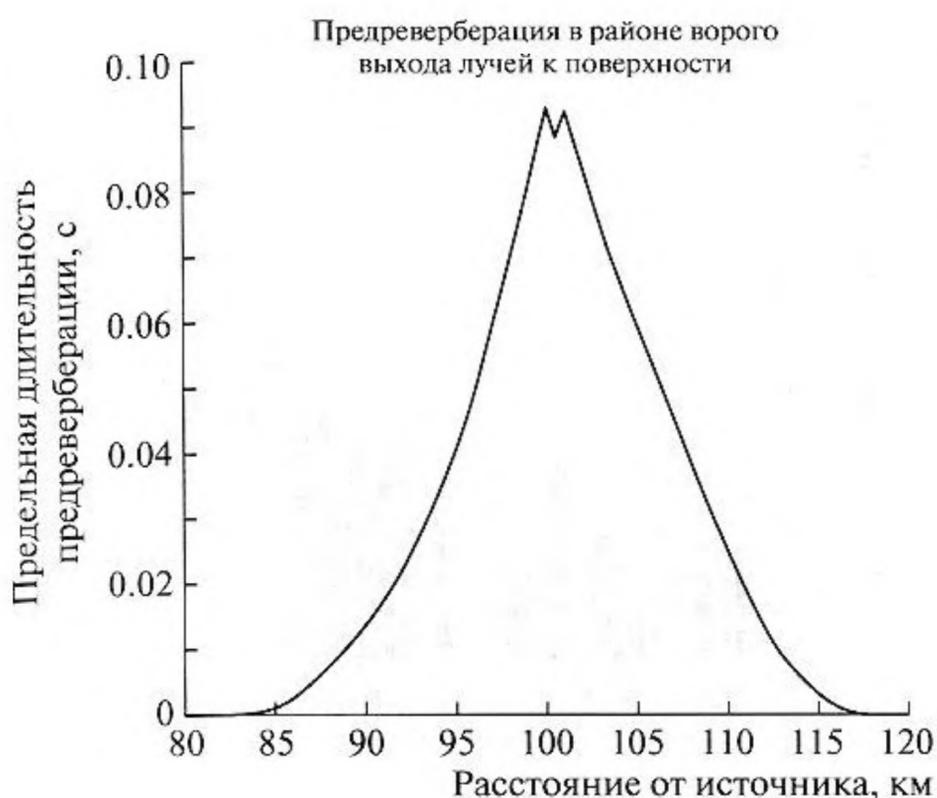


Рис. 6. Расчетная зависимость предельной длительности предреверберации от расстояния. Глубина приемника 600 м.

первому сигналу четверки, приведенной на рисунке 3. Он выгодно отличается от остальных сигналов тем, что имеет всего лишь одно отражение от поверхности. Предреверберация для него не подвержена влиянию реверберационной помехи, формируемой остальными сигналами, и на выбранном расстоянии наблюдалась максимальная ее длительность. Для отображения временной структуры квадрата амплитуды предреверберационного сигнала был выбран линейно-логарифмический масштаб (рис. 7). Явное нарастание реверберационного фона наблюдается за 80–100 мс до

вступления ударной волны. Прямая, нанесенная на рисунок, имеет наклон $\beta \approx 200$ дБ/с. Скорость нарастания интенсивности реверберационного сигнала определялась по изменению уровня предреверберации на участке от -100 до -2 мс методом наименьших квадратов. Пересечение этой прямой с ударной волной произошло на уровне $V \approx -25$ дБ относительно ее максимума.

Сравним с результатами работы [3], представленными на рис. 8 в том же линейно-логарифмическом масштабе. Изменение логарифма расчетного уровня предреверберации во времени близко к линейному, скорость нарастания $\beta \approx 225$ дБ/с. На момент прихода зондирующего сигнала уровень предреверберации $V \approx 0$ дБ относительно его пикового значения. На результаты аналогичных оценок выполняемых по экспериментальным данным, не может не сказываться шумовая помеха. Для снижения ее влияния квадрат амплитуды предреверберационного сигнала уменьшался на среднее значение квадрата амплитуды помехи, определенное на интервале времен опережения, превышающих 150–200 мс. Для сглаживания кривой нарастания сигнала было проведено скользящее усреднение предреверберационного сигнала по интервалу 1 мс. После такой коррекции сигнала скорость нарастания предреверберации β , определенная на интервале $-100 \dots -2$ мс, составила 260 дБ/с. Пересечение аппроксимирующей прямой с ударной волной соответствует уровню -18.3 дБ (см. рис. 9). На предреверберационном сигнале в области изменений времени опережения с 50 до 40 мс проявилась “ступенька” — уровень предреверберации практически не изменялся. Наиболее вероятное объяснение этому факту состоит в существовании



Рис. 7. Резерберационный сигнал, предшествующий первому сигналу четверки, принятому на расстоянии 102.6 км от источника.

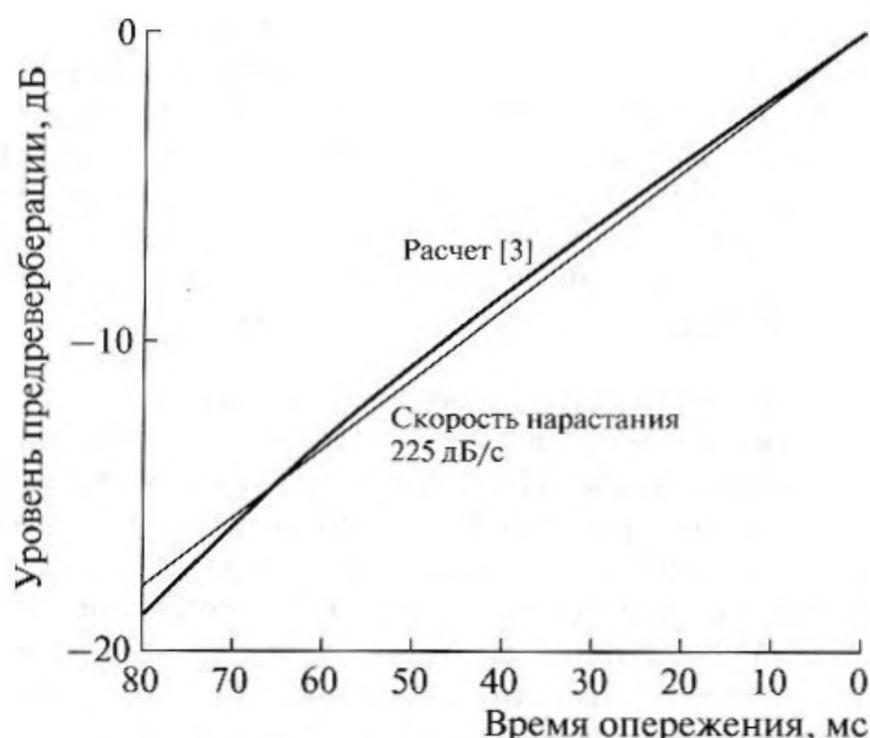


Рис. 8. Расчетная зависимость скорости нарастания уровня предреверберации, выполненная в лучевом приближении для идеализированного приповерхностного канала [3].

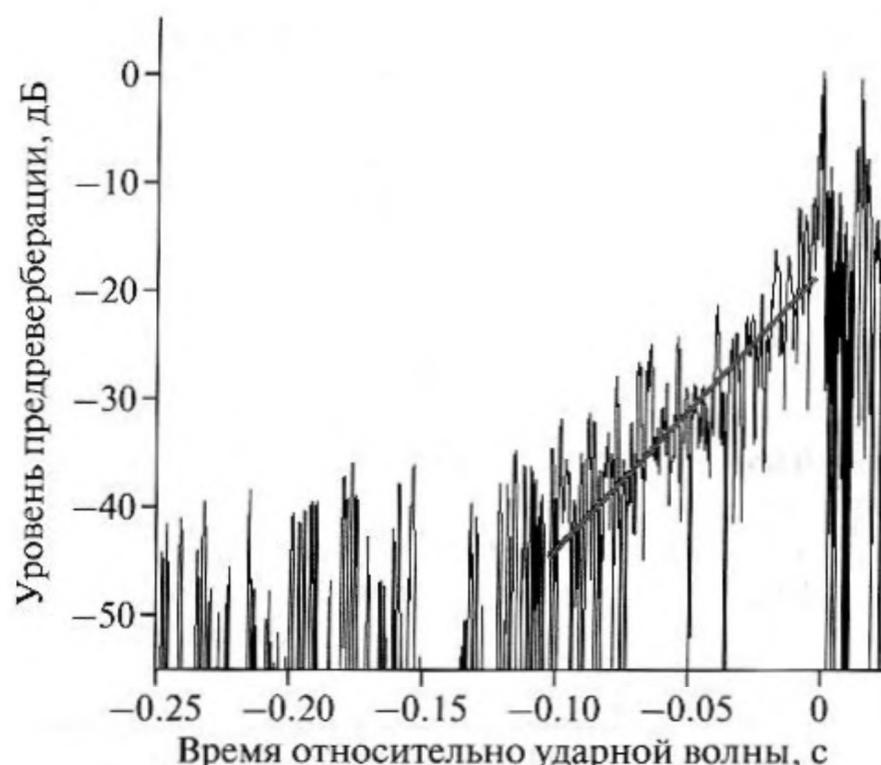


Рис. 9. Реверберационный сигнал, предшествующий первому сигналу четверки (после вычитания шумовой помехи и скользящего усреднения в интервале 2 мс). Приемник расположен на глубине 250 м и удален на расстояние 102.6 км от источника.

минимума индикатрисы рассеяния звука от взволнованной поверхности океана.

Были проведены оценки крутизны нарастания предреверберации перед первыми сигналами четверок, зарегистрированных (глубина приемной системы 250 м) на расстояниях от источника в интервале 90–115 км. Крутизна нарастания оценивалась на участке изменений времени опережения: –100...–2 мс для сигналов, принятых на расстоянии 102.6 и 104.7 км от источника; –70...–2 мс для расстояний 98.9 и 108.6 км; –50...–2 мс для расстояний 91.3 и 114.6 км. Выявилась интересная закономерность [7]. При удалении от источника с 102.6 км до 114.6 км крутизна нарастания предреверберационного сигнала увеличивалась с 260 дБ/с до 762 дБ/с (~ в 3 раза), однако при приближении к источнику с 102.6 км до 91.3 км крутизна нарастания также увеличивалась, но несколько слабее, с 260 дБ/с до 530 дБ/с (~ в 2 раза). При этом на момент прихода зондирующего сигнала уровень предреверберации относительно его пикового значения изменялся в пределах ± 4 дБ (–15...–23 дБ). Эти изменения не носили регулярного характера.

При обработке данных эксперимента выбор диапазона времен опережения предреверберационного сигнала по отношению к ударной волне (ΔT) проводился весьма произвольно (“на глазок”). Это могло приводить к неучтенным ошибкам в оценке параметров β и B крутизны нарастания предреверберации. В то же время, как было показано выше, длительность регистрируемой предреверберации на различных расстояниях от источника полностью определяется условиями

распространения. Для окончательного заключения о характере закономерностей изменения параметров β и B были использованы расчетные значения временной протяженности предреверберации как для 250-метрового, так и для 600-метрового заглубления приемной системы (см. рис. 5 и 6). В табл. 1 приведены результаты окончательной обработки материалов эксперимента. Помимо параметров β и B , во втором и пятом столбцах таблицы приводятся для каждой дистанции значения горизонта расположения приемной системы и расчетные значения протяженности предреверберации ΔT в мс. Обработке и анализу подвергались предреверберационные сигналы, расчетная протяженность которых ΔT превышала 15 мс.

Результаты такой обработки – основные выводы, сделанные на основании предварительного анализа экспериментальных данных подтвердились. Вне зависимости от горизонта приема минимальное значение β наблюдается на расстоянии (обозначим его R_m), соответствующем максимальной протяженности предреверберационного сигнала. При увеличении или уменьшении (относительно R_m) расстояния до источника значение параметра β монотонно растет, увеличиваясь в 2–3 и более раза. При этом проявляется тенденция к незначительному (на 5–8 дБ) уменьшению параметра B .

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДРЕВЕРБАЦИИ ОТ ЧАСТОТЫ

При анализе экспериментальных материалов частотная зависимость параметров β и B исследо-

Таблица 1. Зависимость скорости нарастания предреверберационного сигнала и его уровня от расстояния до источника

R, км	Глубина приемника 250 м			Глубина приемника 600 м		
	ΔT , мс	β , дБ/с	V, дБ	ΔT , мс	β , дБ/с	V, дБ
111.6	22.5	650	-15.4	16.4	612	-16.2
108.6	42.0	538.4	-16.6	35.0	540.4	-16.0
104.7	70.0	301.6	-17.5	63.0	273.5	-21.9
102.6	91.7	262.5	-19.0	78.0	254.1	-21.4
99.8	66.0	385.5	-14.8	92.0	253.4	-25.5
96.9	37.0	407.9	-22	58.5	332.0	-20.9
94.1	25.0	845.0	-15.65	34.0	817.7	-16.3
91.3	12.0	-	-	18.0	1341.0	-9.6

Таблица 2. Частотная зависимость скорости нарастания предреверберационного сигнала и его уровня

Глубина, м	R, км	β , дБ/с (V, дБ)							
		200 Гц	250 Гц	315 Гц	400 Гц	500 Гц	630 Гц	800 Гц	1000 Гц
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)
250	99.8	408 (-17)	362 (-20)	374 (-17)	236 (-19)	349 (-12)	300 (-13)	262 (-12)	240 (-13)
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)

валась для сигнала, принятого на расстоянии, соответствующему максимальному значению протяженности предреверберации (102.6 км при приеме на глубине 250 м). Сигнал фильтровался в октавных полосах с центральными частотами, отстоящими друг от друга на 1/3 октавы. В результате предварительного анализа [7] для диапазона частот 150–1000 Гц отмечались лишь незначительные изменения параметров β (в пределах ± 10 дБ/с) и V (в пределах ± 2 дБ). Явной частотной зависимости этих параметров не наблюдалось.

Результаты анализа, проведенного с учетом расчетной протяженности предреверберации для горизонтов расположения приемных систем 250 и 600 м, представлены в табл. 2. Анализировались сигналы, принятые на расстояниях от источника, соответствующих протяженности предреверберации, превышающей 65 мс. Приведены значения параметров β и V для октавных частотных фильтров с центральными частотами f_0 , изменяющимися с шагом в 1/3 октавы. Явной частотной зависимости этих параметров не просматривается, хотя разброс их значений несколько увеличился, наметилась тенденция к некоторому уменьшению параметра β с увеличением частоты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенного анализа экспериментальных данных по поверхностной предреверберации показали следующее.

1. Предреверберация формируется за счет рассеяния зондирующего сигнала взволнованной поверхностью океана примерно на 20 километровом участке трассы распространения, равноудаленном как от источника, так и от приемника, и наблюдается на расстоянии от источника 84–120 км.

2. При расположении приемника на глубине 250 м временная протяженность предреверберации при широкой индикатрисе рассеяния зондирующего сигнала взволнованной поверхностью океана достигает максимального значения (90 мс) на расстоянии от источника 102–103 км. Увеличение расстояния (до 120 км) или его уменьшение (до 82–84 км) приводит к монотонному снижению протяженности предреверберации до нулевой. При уменьшении раствора индикатрисы рассеяния максимальное значение протяженности предреверберации снижается, расстояние его местоположения от источника увеличивается. Получено согласие экспериментального и расчетного значений расстояний от источника до ме-

стоположения максимума протяженности предреверберационного сигнала (102.6 км). Это дает основание констатировать, что в эксперименте ширина индикатрисы рассеяния звука взволнованной поверхностью океана $\geq 12^\circ$, протяженность предреверберации полностью определяется гидрологическими условиями.

3. При приеме на глубине 600 м максимальная длительность предреверберации наблюдалась на расстоянии 99.8–102.6 км, что также хорошо согласуется с результатами расчета (100–101.5 км). Согласно проведенным расчетам, при разнесении горизонтов расположения источника и приемника по глубине происходит расщепление максимума зависимости длительности предреверберации от расстояния до источника: расстояние между ними составило ~ 1.5 км. В эксперименте шаг по расстоянию между соседними подрывами составлял 2–3 км, что не позволило расщепление этого максимума подтвердить экспериментально.

4. Анализ экспоненциального нарастания предреверберационного сигнала во времени показал, что крутизна его нарастания зависит от расстояния до источника и минимальна на расстоянии, соответствующем максимуму протяженности предреверберации. Как при удалении от источника, так и при приближении к нему крутизна нарастания уровня предреверберации монотонно увеличивалась. При этом наблюдалась тенденция к повышению уровня предреверберации, регистрируемого в момент прихода зондирующего сигнала;

5. Явной частотной зависимостью крутизны нарастания уровня предреверберационного сигнала относительно зондирующего сигнала для диапа-

зона 200–1000 Гц не наблюдалось. Отмечалась лишь тенденция к некоторому уменьшению скорости нарастания с увеличением частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Студеничник Н.В. Явление предреверберации в подводном звуковом канале // Сб. докл. IX Акустической конференции. М.: АН СССР, 1977. Секция Д. С. 45–48.
2. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П., Студеничник Н.В. К теории предреверберации звука в океане // ДАН СССР. 1978. Т. 239. С. 211–213.
3. Лысанов Ю.П., Фролов В.М. Временная зависимость интенсивности высокочастотной поверхностной предреверберации звука в океане // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 6. С. 841–843.
4. Вадов Р.А. Временная структура бистатической реверберации при дальнем распространении взрывных сигналов // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 2. С. 207–215.
5. Вадов Р.А. Бистатическая реверберация и зашумление классических четверок // Сб. докл. XVIII сессии РАО. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 199–203.
6. Ewing W.M., Worzel J.L. Long-range sound transmission // Geol. Soc. Amer. Mem. 1948. V. 27. Pt. 3. P. 1–32.
7. Вадов Р.А. Частотно-энергетические характеристики предреверберации звука в океане // Сб. докл. XII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XXI сессией РАО. М.: ГЕОС, 2009. С. 31–34.
8. Тебякин В.П. и др. Raymod52 – базовый комплекс программ для вычисления звуковых полей в слоисто-неоднородном океане лучевым методом // Отчет АКИН. М.: АКИН, 1990.