

УДК 534.23

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ОКЕАНА

© 2001 г. О. П. Галкин, Р. Ю. Попов, Ю. В. Семёнов, Е. В. Симакина

Акустический институт им. Н.Н.Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 26.12.2000 г.

Исследовалась зависимость от длины трассы пространственной корреляции взрывных сигналов, принимаемых гидрофонами, лежащими на дне шельфовой зоны. Выявлено квазипериодическое изменение величины коэффициента корреляции с изменением расстояния до взрывных источников звука. Показано, что величина коэффициента корреляции заметно увеличивается, а периодические вариации его значения практически исчезают, если измерения проводить для сигналов, приходящих по отдельным лучам или узким лучевым группам. Отмечена низкая эффективность линейной горизонтальной приемной антенны.

В последнее время при решении задач мониторинга океана прослеживается тенденция использования небольших автономных гидроакустических систем, вынесенных далеко в море. Однако, в силу их низкой живучести и небольшого радиуса действия, функционирует и проектируется определенное число зональных стационарных систем наблюдения. Выносные антенны таких систем устанавливаются в прибрежных районах, причем принимаемая информация по линиям связи поступает для обработки на вычислительные комплексы, размещенные в береговых лабораториях. По причине значительных материальных затрат, необходимых для создания таких гидроакустических систем, важен достаточно обоснованный прогноз эффективности их работы. Однако прогноз невозможен без учета особенностей формирования звуковых полей сигналов и помех в условиях

прибрежного клина. Одним из важных параметров звуковых полей является пространственный радиус корреляции поля и его изменения с дистанцией до источника звука.

Ниже описаны результаты исследования пространственной корреляции звукового поля в прибрежном клине тихоокеанского побережья Камчатки. Эксперимент проводился в летнее время года (июль). На рис. 1 и рис. 2 представлены район работ и характеристики волновода вдоль исследуемой трассы длиной ~300 км. Условия распространения звука вдоль трассы заметно изменялись: глубина залегания оси подводного звукового канала, равная 100–105 м в глубоководной части трассы, по мере вхождения в прибрежный клин уменьшалась и в районе приема составляла 60 м. Кроме того, градиенты скорости звука выше и ниже оси

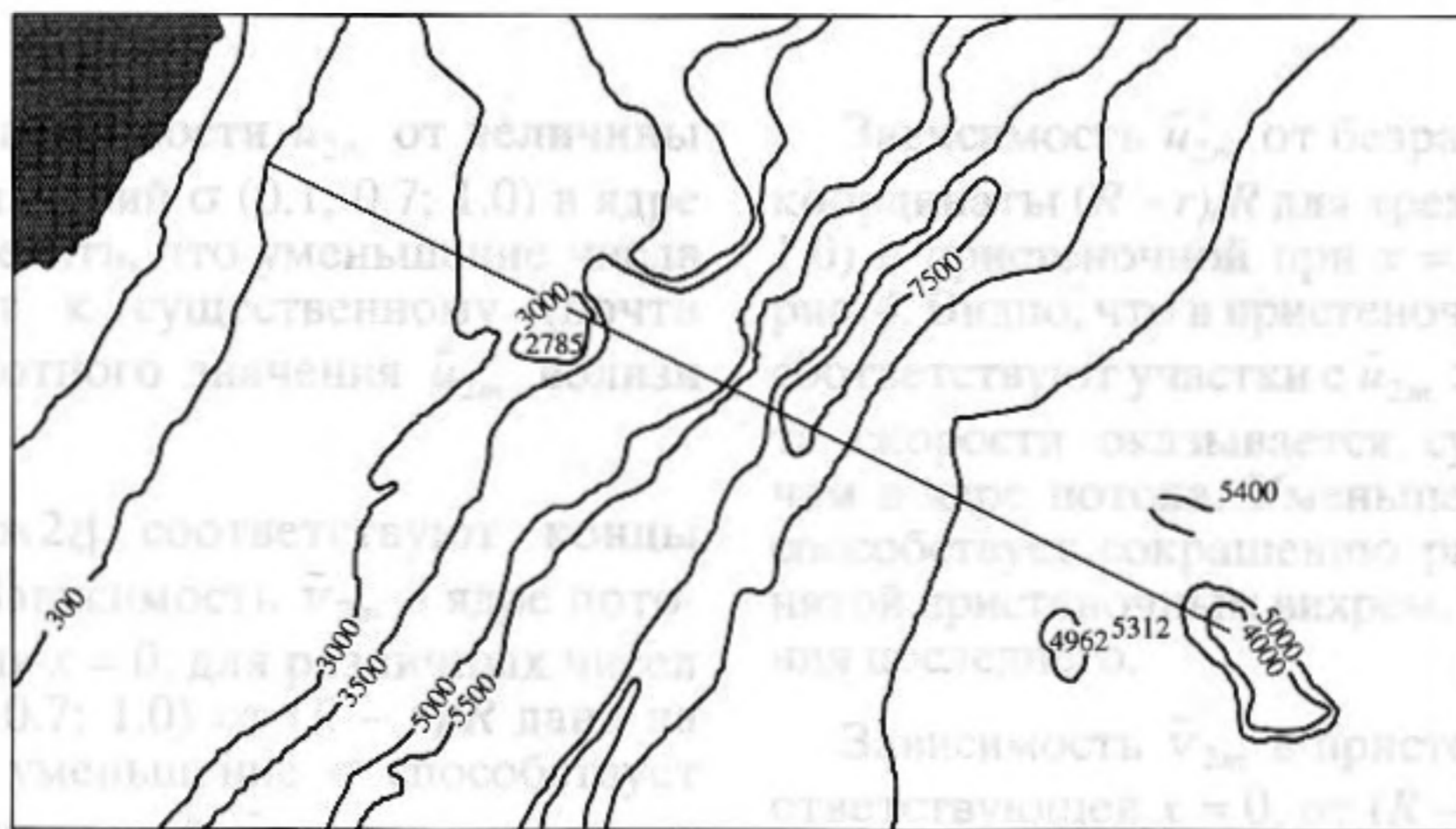


Рис. 1. Район работ и положение трассы акустических исследований.

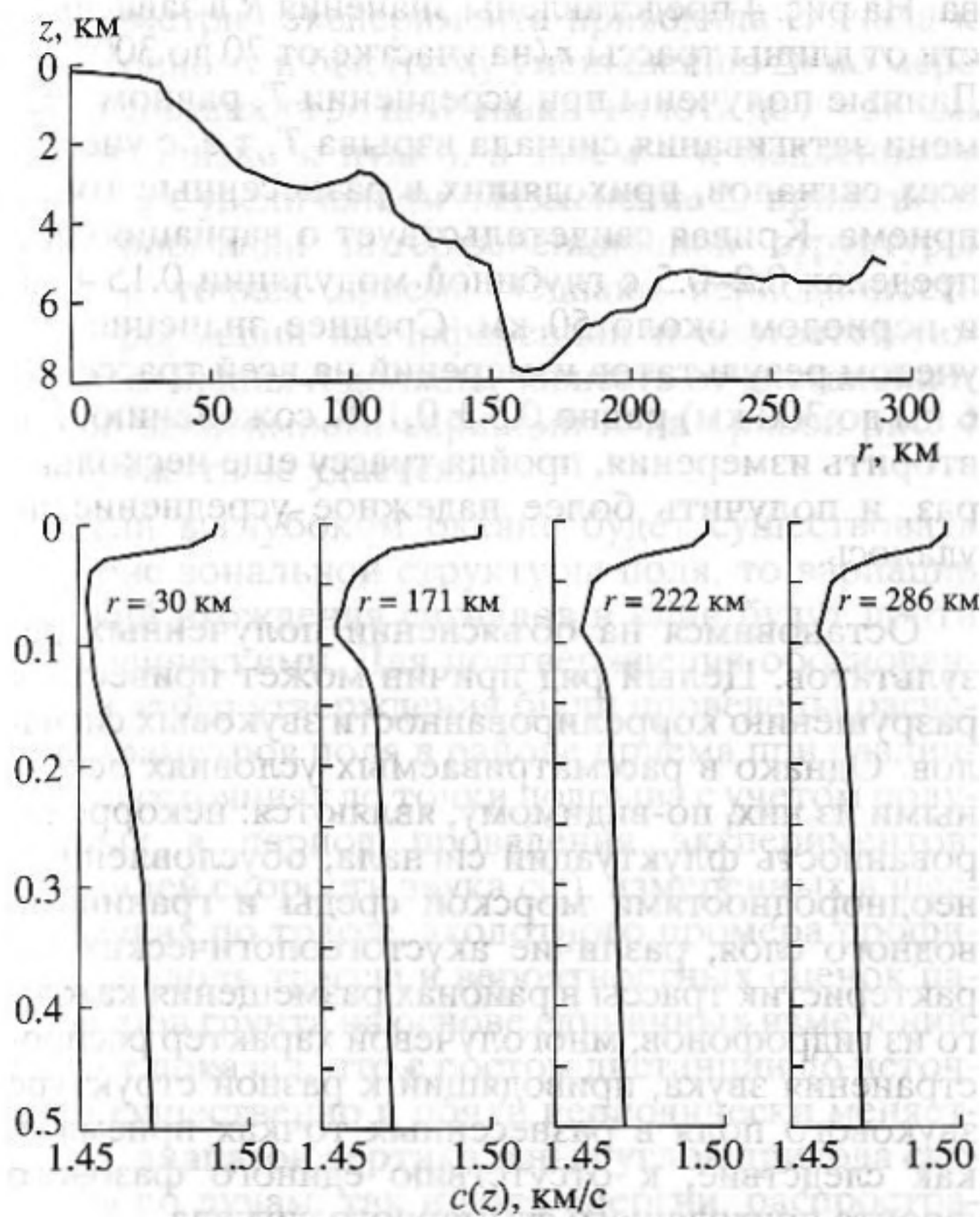


Рис. 2. Профиль дна вдоль исследуемой трассы и зависимость скорости звука c от глубины z в четырех точках трассы.

звукового канала в глубоководной и мелководной частях трассы сильно отличались друг от друга.

Трасса была ориентирована приблизительно перпендикулярно генеральной линии изобат. Ее

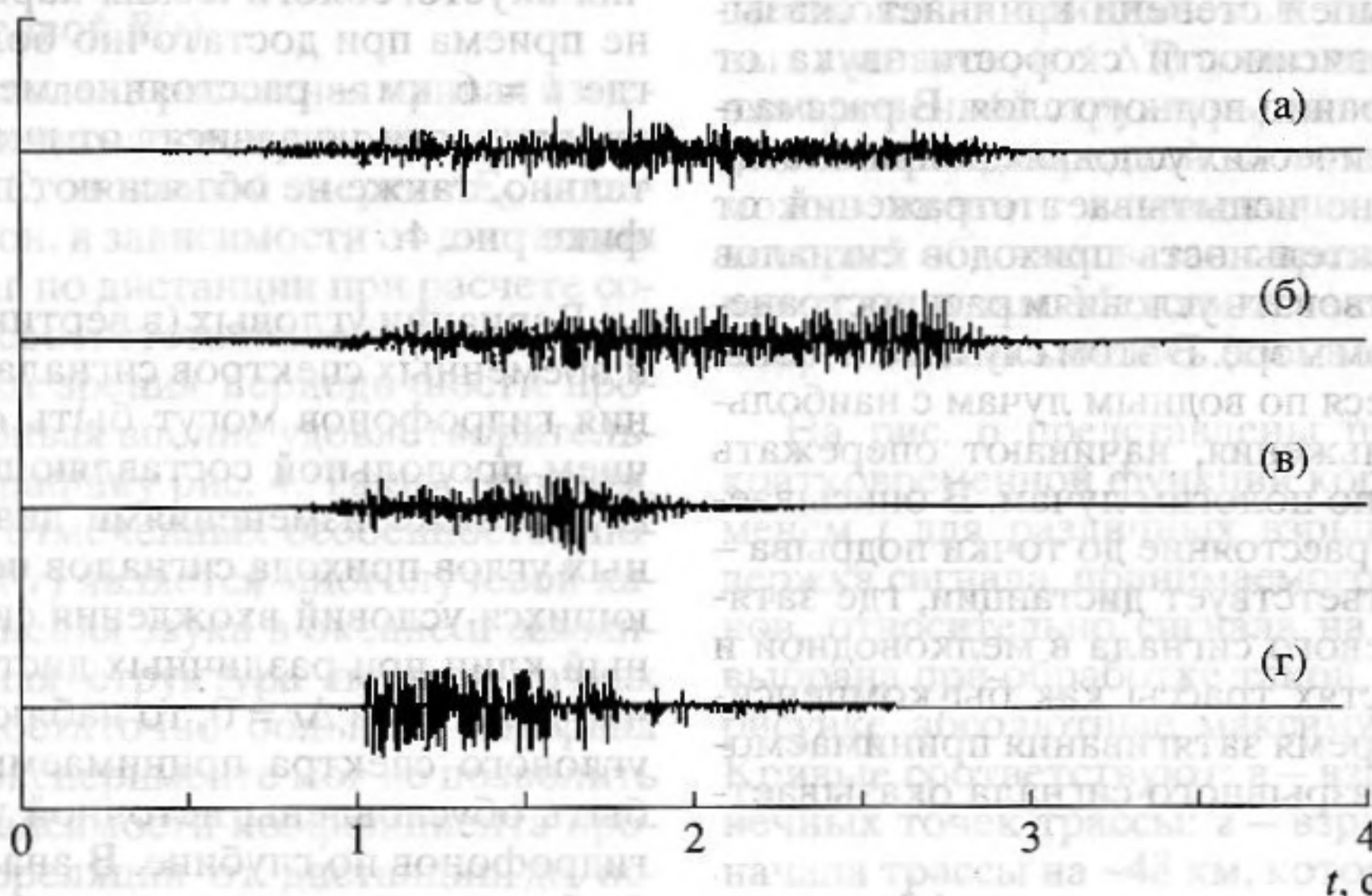


Рис. 3. Внешний вид принимаемых взрывных сигналов при различных расстояниях до точки подрыва: а – 286 км; б – 216 км; в – 48 км; г – 6 км.

отклонение от нормали к приемной базе составляло $\sim 8^\circ$, причем она пересекала линию, соединяющую гидрофоны, не в центре базы, а в стороне от нее (на расстоянии 4 км от ближайшего гидрофона). Трасса, основная часть которой проходила в глубоком океане (при глубине места более 2 км), включала в себя участки континентального склона и шельфовой зоны. Наклон дна менялся от $5^\circ-6^\circ$ в районе континентального склона до 0.5° – в районе размещения гидрофонов.

Использовались подводные взрывы зарядов весом ~ 300 г, производимые на горизонте 150 ± 3 м. Сброс зарядов осуществлялся с движущегося по трассе судна через каждые 14 км. Прием взрывных сигналов производился на два гидрофона, лежащих на дне вдоль изобаты 300 м на расстоянии ~ 6 км друг от друга. Принимаемые сигналы по радиотрактам (через радиобуи) передавались на борт научно-исследовательского судна и вводились в ЭВМ для проведения необходимого анализа и изучения особенностей структуры многолучевых сигналов, а также пространственной корреляции этих сигналов в зависимости от дистанции до источника звука. В частности, вычислялся коэффициент взаимной корреляции принимаемых гидрофонами сигналов в полосе частот от 40 до 60 Гц.

Рис. 3 иллюстрирует вид сигналов, принимаемых одним из гидрофонов (в широкой частотной полосе от ~ 20 до ~ 500 Гц) при различном удалении излучающего судна. Из рисунка видно, что длительность сигнала на больших (более 100 км) и на малых дистанциях (до 30 км) превышает длительность на участке трассы от 30 до 60 км. Это связано с тем, что механизм изменения временной структуры многолучевого сигнала с дистан-

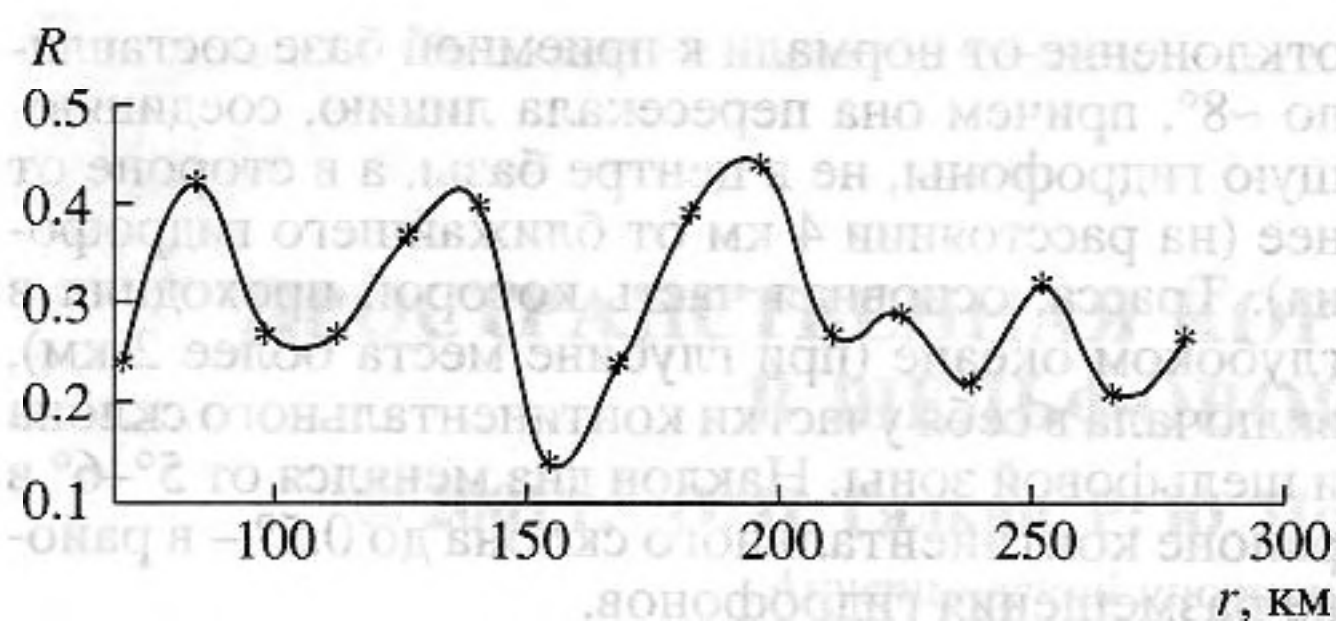


Рис. 4. Зависимость коэффициента взаимной корреляции R взрывных сигналов, принимаемых на два донных гидрофона от дистанции до точки подрыва. Время усреднения T совпадает со временем затягивания сигнала ΔT .

цией в глубоководной и мелководной частях трассы принципиально различен.

При взрывах, производимых вблизи гидрофонов, т.е. на мелководном участке трассы, большинство сигналов, прежде чем попасть в гидрофоны, испытывают донно-поверхностные отражения. Чем круче лучи, по которым распространяется звук от взрыва, тем большее число отражений испытывает соответствующий сигнал и тем больше он отстает по времени от прихода сигналов по более пологим лучам. По мере удаления точек подрыва от гидрофонов и увеличения толщины водного слоя число сигналов, испытывающих отражение от границ водного слоя, и число самих отражений сокращаются, и уменьшается отставание прихода таких сигналов от момента прихода сигналов по наиболее пологим лучам.

При перемещении точек подрыва в глубоководную часть трассы на формирование временной структуры принимаемых многолучевых сигналов во все большей степени начинает сказываться влияние зависимости скорости звука от глубины, а не от границ водного слоя. В рассматриваемых гидрологических условиях большинство сигналов вообще не испытывает отражений от границ и последовательность приходов сигналов начинает соответствовать условиям распространения звука в глубоком море. В этом случае сигналы, распространяющиеся по водным лучам с наибольшими углами скольжения, начинают опережать приходы сигналов по пологим лучам. В описываемом эксперименте расстояние до точки подрыва — около 50 км — соответствует дистанции, где затягивание многолучевого сигнала в мелководной и глубоководной частях трассы как бы компенсирует друг друга и время затягивания принимаемого многолучевого взрывного сигнала оказывается минимальным.

Проанализируем изменение коэффициента взаимной корреляции R сигналов, принимаемых донными гидрофонами с удалением точки подрыва.

На рис. 4 представлены значения R в зависимости от длины трассы r (на участке от 70 до 300 км). Данные получены при усреднении T , равном времени затягивания сигнала взрыва T , т.е. с учетом всех сигналов, приходящих в разнесенные точки приема. Кривая свидетельствует о вариациях R в пределах 0.2–0.5 с глубиной модуляции 0.15–0.20 и периодом около 50 км. Среднее значение R с учетом результатов измерений на всей трассе (от 6 км до 300 км) равно 0.3 ± 0.1 . К сожалению, повторить измерения, пройдя трассу еще несколько раз, и получить более надежное усреднение не удалось.

Остановимся на объяснении полученных результатов. Целый ряд причин может привести к разрушению коррелированности звуковых сигналов. Однако в рассматриваемых условиях основными из них, по-видимому, являются: некоррелированность флуктуаций сигнала, обусловленных неоднородностями морской среды и границами водного слоя; различие акустогеологических характеристик трассы в районах размещения каждого из гидрофонов; многолучевой характер распространения звука, приводящий к разной структуре звукового поля в разнесенных точках приема и, как следствие, к отсутствию единого фазового фронта приходящего суммарного сигнала.

Объяснить квазипериодические вариации R по мере изменения длины трассы флуктуациями фазы, обусловленными случайными неоднородностями среды, затруднительно, поскольку среднеквадратичное значение флуктуаций времени распространения отдельных сигналов растет с дистанцией монотонно [1]. Однако определенный вклад в снижение “сглаженного” значения R с увеличением дистанции этот процесс, безусловно, дает. Различия акустогеологических характеристик в районе приема при достаточно больших r (при $r \gg l$, где $l = 6$ км — расстояние между гидрофонами) практически не зависят от дистанции и, следовательно, также не объясняют поведение R на графике рис. 4.

Вариации угловых (в вертикальной плоскости) и временных спектров сигнала в местах размещения гидрофонов могут быть обусловлены наличием продольной составляющей приемной базы Δr , а также изменениями диапазона вертикальных углов прихода сигналов по лучам из-за меняющихся условий вхождения сигналов в прибрежный клин при различных дистанциях r . Заметим, что даже если $\Delta r = 0$, то наблюдаемые изменения углового спектра принимаемых сигналов могут быть обусловлены неточной установкой донных гидрофонов по глубине. В анализируемом случае Δr было не только отлично от нуля, но и изменялось с дистанцией r , так как трасса размещалась сбоку от базы гидрофонов.

Геометрия эксперимента приводила сначала к монотонному и быстрому уменьшению Δr по мере роста дистанции до источника (вплоть до $r \approx 58$ км, где Δr близко к нулю), а затем – к медленному росту Δr с увеличением r . Изменение Δr приводит к трансформации интерференционной структуры поля в точках приема. Однако периодичность трансформации интерференции и соответствующие изменения R должны зависеть от дистанции r . Такой зависимости вариаций R на кривой рис. 4 обнаружить не удается.

Если в глубоком океане будет существовать подобие зональной структуры поля, то вариации условий вхождения сигналов в клин будут почти периодическими. Для подтверждения обоснованности этого утверждения были проведены расчеты параметров поля в районе приема при различных расстояниях до точки подрыва с учетом полученных в период проведения экспериментов: профилей скорости звука $c(z)$, измеренных в шести точках по трассе, эхолотного промера профиля дна вдоль трассы и вероятностных оценок параметров грунта на основе единичных измерений. Расчет показал, что с ростом дистанции до источника существенно и почти периодически меняется как диапазон вертикальных углов прихода сигналов по лучам, так и доля энергии, распространяющаяся по чисто водным лучам (при этом учитывались сигналы с факторами фокусировки не менее единицы). Что касается сигналов, испытывающих донно-поверхностные отражения, то поскольку время их прихода в гидрофоны в значительной степени случайно (оно зависит, в частности, от параметров неровностей дна), постольку эту долю звуковой энергии следует отнести к “сигнальной” помехе. Можно построить приближенную кривую зависимости изменения отношения сигнал/“сигнальная” помеха от дистанции r и сопоставить ее с кривой $R(r)$.

На рис. 5 представлена расчетная кривая изменения доли энергии сигналов, приходящих по чисто водным лучам E , от полной энергии E_0 , попадающей на гидрофон, в зависимости от дистанции до источника r . Шаг по дистанции при расчете составлял 14 км, что соответствовало условиям эксперимента. С точки зрения периодичности процесса, расчетная кривая вполне удовлетворительно соответствует графику рис. 4. Таким образом, главной причиной отмеченных особенностей поведения функции $R(r)$ является многолучевой характер распространения звука в океане и связанная с этим сложная структура поля в точках приема. Однако достаточно большой интервал измерений поля в эксперименте мог не позволить выявить детали зависимости коэффициента пространственной корреляции от дистанции до источника звука. С целью проверки этого предположения был проведен расчет поля с меньшим шагом по дистанции (5 км). Анализ результатов

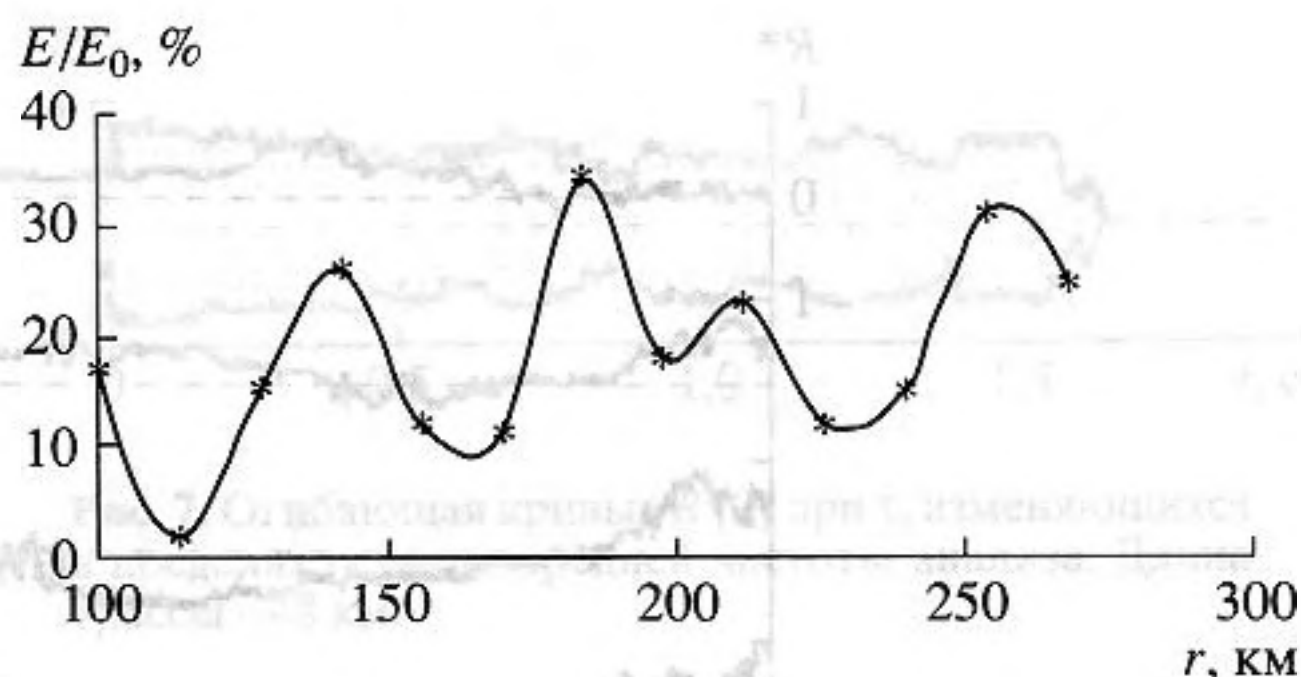


Рис. 5. Расчетная кривая изменения доли акустической энергии (%), приходящей по чисто водным лучам E , от полной энергии, попадающей в гидрофон E_0 , с расстоянием до источника звука r .

этого расчета показал, что периодичность изменчивости условий вхождения многолучевого сигнала в прибрежный клин с дистанцией (при r от 100 до 300 км) около 25–30 км и не обнаруживается на экспериментальной кривой (рис. 4) только в силу слишком большого расстояния между соседними точками подрыва зарядов.

Представленные результаты относились к случаю, когда время усреднения сигналов T соответствовало длине всей реализации принятого взрывного сигнала, т.е. равнялось времени затягивания ΔT . Существует возможность более подробного анализа изменений временной структуры принимаемых сигналов с дистанцией до источника. Дело в том, что импульсный характер излучаемого сигнала делает возможным разрешение во времени значительной части приходов сигнала по отдельным лучам или узким лучевым группам. Тогда измерение кратковременной функции корреляции $R^*(t)$ при t , изменяющемся в пределах существования принимаемых гидрофонами взрывных сигналов, ($t \leq \Delta T$) позволяет выявить изменения временной структуры сигнала с точностью до долей периода средней частоты анализа. Отчасти можно оценить и изменения углового спектра, который обычно связан с временами прихода сигналов по лучам. Методика таких измерений неоднократно описывалась (см., например, [2, 3]).

На рис. 6 представлены примеры изменения кратковременной функции корреляции R^* со временем t для различных взрывов. Временная задержка сигнала, принимаемого одним из гидрофонов, относительно сигнала на другом гидрофоне выбрана при обработке такой, чтобы получить на рисунке абсолютные максимумы функции $R^*(t)$. Кривые соответствуют: а – взрыву в одной из конечных точек трассы; б – взрыву на удалении от начала трассы на ~48 км, которое близко к значению, отвечающему минимальной величине Δr ; в – взрыву, произведенному вблизи изобаты 300 м; кривые “б” и “в” отвечают промежуточным дли-

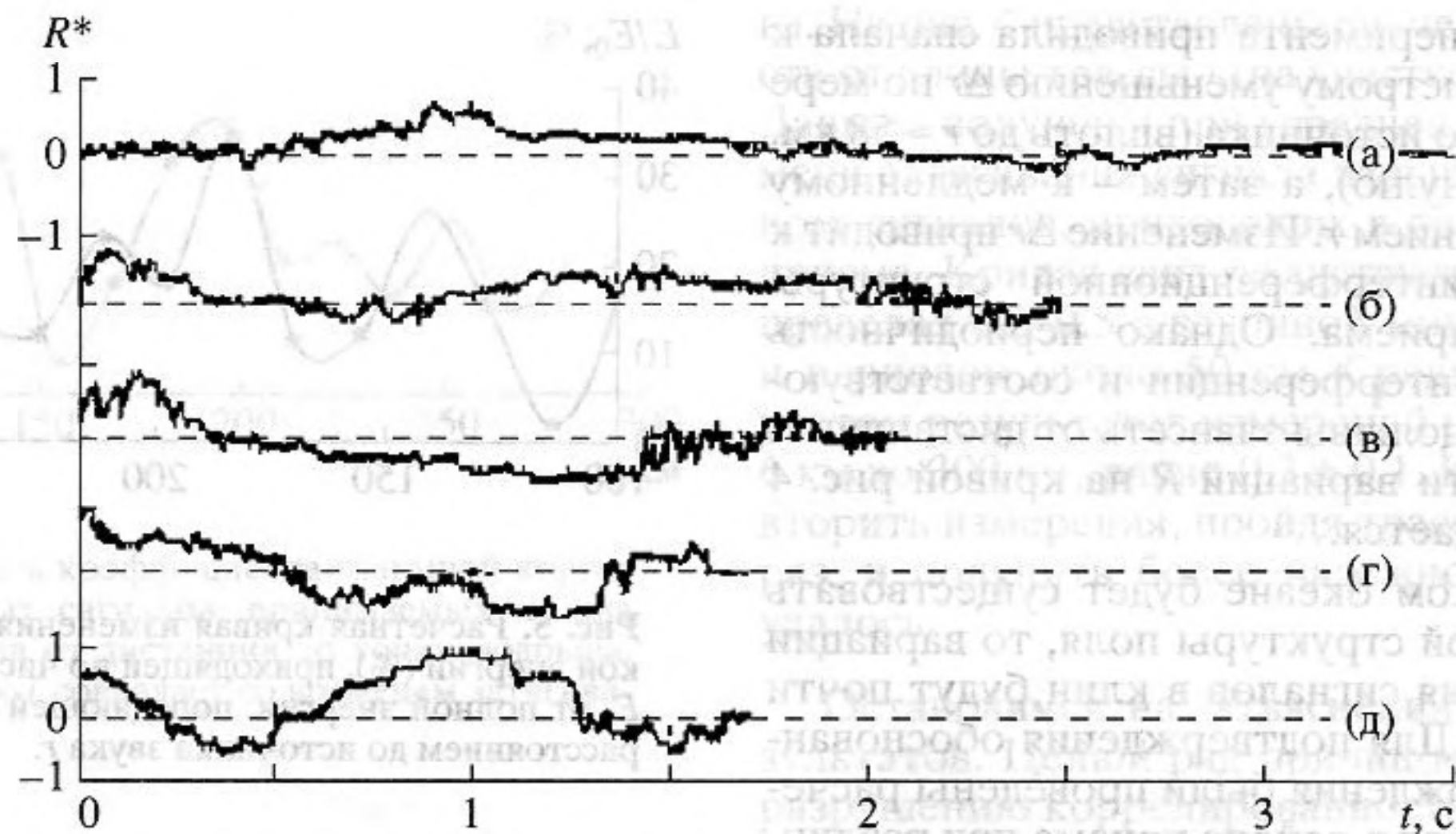


Рис. 6. Изменения со временем t кратковременной функции корреляции R^* для взрывов, произведенных на различном удалении от приемников.
а – 286 км; б – 216 км; в – 160 км; г – 48 км; д – 34 км.

нам трассы. Время усреднения T выбиралось равным четверти времени затягивания ΔT . Такой выбор T обеспечивал возможность анализа на любых дистанциях в близких диапазонах углов прихода сигнала по отдельным лучам. Однако точность оценок $R^*(t)$, которая, как известно, пропорциональна \sqrt{T} , при этом была различна для разных участков трассы: верхняя граница возможной ошибки измерений менялась от 0.10–0.15 для самых дальних взрывов ($T = 1$ с) до ~ 0.6 – для дистанций, где время затягивания сигнала минимально ($T = 0.37$ с).

Характерная особенность кривых заключается в изменении знака $R^*(t)$ на протяжении каждого из анализируемых взрывов. В глубоком море такой переверт может быть вызван либо вертикальным разнесением гидрофонов Δh , либо их разнесением вдоль трассы Δr . В прибрежном клине дополнительная причина заключается в пространственной изменчивости параметров дна в районе приема. В описываемых измерениях изменение знака корреляции обуславливается комбинацией всех трех причин. Неточность установки донных гидрофонов приводит к определенному разбросу глубин места и к наличию вертикальной составляющей приемной базы Δh [4].

Поскольку приемная база практически никогда не совпадала с фазовыми фронтами приходящего сигнала, постольку существовала продольная составляющая этой базы Δr . При взрывах в дальних точках трассы Δr слабо зависит от r . В начальных точках трассы, т.е. в прибрежном клине, изменчивость R^* с t усиливается (см. кривую “e” на рис. 6), причем наблюдалось заметное изменение поведения функции $R^*(t)$ даже для соседних точек подрыва. Последнее, по-видимому, связано с быст-

рым изменением Δr с r на этом участке трассы и пространственной изменчивостью параметров дна в районе приема. То же относится и к изменчивости диапазона угловых спектров приходящих сигналов. Так, если для взрыва, произведенного на удалении ~ 28 км от гидрофонов, диапазон вертикальных углов прихода составляет 13° (по расчету с учетом только тех лучей, чей фактор фокусировки не менее 0.5), то для соседнего взрыва ($r = 14$ км) он равен 32° .

На графиках рис. 6 видно, что пиковое значение $R^*(t)$ практически на всех дистанциях достигает значения 0.8–0.9. Поэтому следует ожидать, что коэффициент пространственной корреляции сигналов, приходящих по узкой группе лучей в любом участке диапазона вертикальных углов прихода, будет достаточно большим при соответствующих значениях задержки сигнала, принимаемого одним из гидрофонов относительно сигнала на другом гидрофоне. Для подтверждения этого используем сигналы от взрывного источника, удаленного на 48 км, и получим целый ряд кривых $R^*(t)$ при различных задержках τ , лежащих в пределах периода средней частоты анализа $\Delta\tau$ (на рис. 6д представлена одна из таких кривых при задержке τ_0 , отвечающей абсолютному максимуму функции $R^*(t)$). В анализируемом случае $f_{cp} = 50$ Гц и, следовательно, $\Delta\tau = 1/f_{cp} = 20$ мс $\{(\tau_0 - 10 \text{ мс}) \leq \tau \leq (\tau_0 + 10 \text{ мс})\}$. Огибающая этих кривых приведена на рис. 7. Легко заметить, что максимальные значения $R^*(t)$ для приходов по узкой группе лучей (здесь $T = 0.37$ с) под любыми возможными вертикальными углами – не менее 0.8 и, следовательно, значение пространственного коэффициента корреляции, получаемое при отсутствии разрешения приходов сигнала по отдельным лучам (в нашем случае – в 10 раз меньше), не отражает потенциальную когерент-

ность звукового поля. Действительно, как видно на рис. 6, значительная часть сигнала на всех дистанциях оказывается отрицательно коррелированной. По этой причине значение коэффициента корреляции может быть существенно меньшим в тех случаях, когда время усреднения совпадает со временем затягивания. Так, например, на расстоянии $r = 48$ км значение R при $T = \Delta T$ составляло всего 0.08. В большинстве практически важных случаев, когда используются непрерывные сигналы, а не сигналы от импульсного источника, длина анализируемой реализации и соответствующее время усреднения T могут значительно превышать время затягивания в океаническом волноводе. Поэтому временного разрешения сигналов, пришедших по различным лучам, без специальной обработки не происходит. В этом случае величина коэффициента пространственной корреляции многолучевого сигнала, принимаемого на ненаправленные гидрофоны, оказывается значительно меньше значений, которые соответствуют сигналам, пришедшим по узким группам лучей [5].

В результате проведенных исследований можно сделать ряд выводов.

Коэффициент взаимной корреляции взрывных сигналов, принимаемых ненаправленными гидрофонами, разнесенными на 6 км по дну шельфовой зоны при усреднении, равном или большем времени затягивания многолучевых сигналов, с изменением дистанции до точки подрыва (до 300 км) испытывал в полосе частот 40–60 Гц вариации амплитуды в пределах 0.08–0.45 с периодом около 50 км.

Расчеты звуковых полей, отвечающие условиям эксперимента, показали, что основная причина вариации амплитуды коэффициента пространственной корреляции состоит в почти периодическом изменении с ростом дистанции до источника звука диапазона вертикальных углов прихода сигнала по лучам. При этом меняются условия вхождения сигналов в береговой клин и доля акустической энергии, приходящей по чисто водным лучам. Период таких изменений составляет 20–25 км. Отличие расчетных данных от экспериментальных объясняется слишком большим пространственным интервалом между соседними точками подрыва, использовавшимся при натурных измерениях (14 км).

Кратковременный коэффициент корреляции принимаемых взрывных сигналов (когда сигналы по отдельным лучам или узким лучевым группам разрешены во времени) практически не испытывает вариаций амплитуды, и его значение при времени усреднения, равном четверти времени затягивания сигнала в полосе частот 40–60 Гц, составляет 0.8–0.9. Временные задержки, при которых наблюдаются указанные значения корреляции, для разных групп лучей различны.

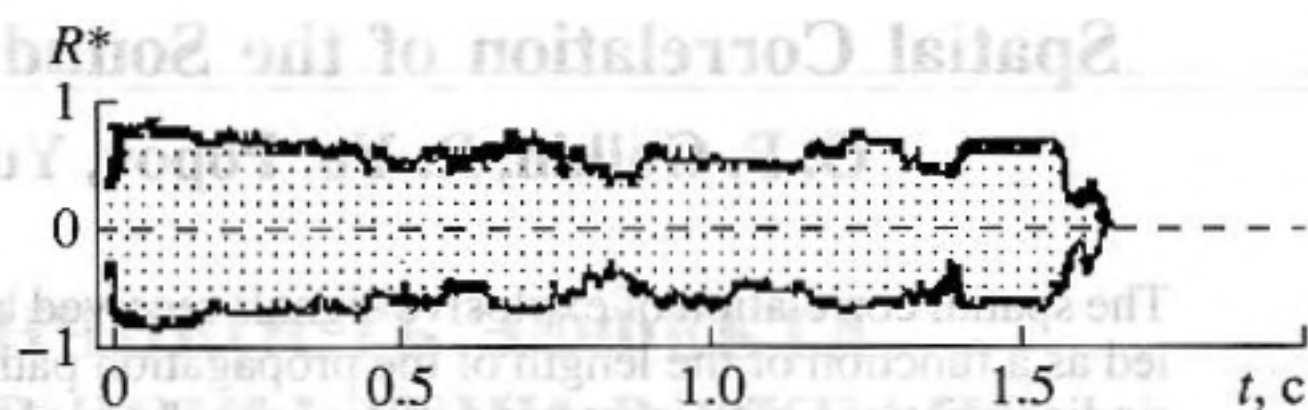


Рис. 7. Огибающая кривых $R^*(t)$ при τ , изменяющихся в пределах периода средней частоты анализа. Длина трассы ~ 48 км.

Применение протяженной горизонтальной кабельной антенны для целей мониторинга акваторий, возможно, будет недостаточно эффективным, поскольку пространственная корреляция звукового поля на апертуре антенны может оказаться заниженной. Кроме того, значение коэффициента корреляции будет испытывать вариации по мере изменения длины трассы, причем период вариаций будет изменяться с азимутальным углом на источник звука по-разному для различных участков кабельной антенны. Одним из возможных путей повышения эффективности приемной антенны является развитие ее по вертикали, т.е. использование планарной антенны. С ее помощью можно сформировать вертикальный веер узких лепестков диаграмм направленности. При этом значение пространственной корреляции звукового поля для каждого лепестка может быть высоким и, следовательно, уменьшатся его вариации с изменением дистанции до источника звука.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-17694).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов Л.А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. М.: Изд-во АН СССР, 1975. 171 с.
2. Галкин О.П., Попов Р.Ю., Симакина Е.В. Способы измерения пространственно-временной структуры звуковых полей в глубоком океане / В сб. "Акустические измерения. Методы и средства". IV сессия Российского акустического общества. М., 1995.
3. Галкин О.П., Микрюков А.В., Попов О.Е., Попов Р.Ю. Азимутальная изменчивость пространственной корреляции взрывных сигналов, принимаемых в прибрежном клине // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 5. С. 616–621.
4. Wang Q, Zhang R. Sound spatial correlation in Shallow Water // J. Acoust. Soc. Amer., 1992. V. 92(2). Pt. 1. P. 932–939.
5. Worcester P.F., Comuelle B.D., Dzieciuch M.A., Munk W.H., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C., Colosi J.A., Metzger K., Birdsall T.G., Baggeroer A.B. A test of basin-scale acoustic thermometry using a large-aperture vertical array at 3250-km range in the eastern North Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer., 1999. V. 105. № 6. P. 3185–3201.

Spatial Correlation of the Sound Field in a Shelf Zone of the Ocean

O. P. Galkin, R. Yu. Popov, Yu. V. Semenov, and E. V. Simakina

The spatial correlation of explosive signals received by hydrophones lying on the bottom of a shelf zone is studied as a function of the length of the propagation path. The correlation coefficient is found to exhibit quasi-periodic variations with increasing distance to the explosive source of sound. It is shown that the value of the correlation coefficient noticeably increases and its periodic variations practically disappear when the measurements are performed for the signals arriving by individual rays or narrow ray bundles. The low efficiency of a linear horizontal receiving array is pointed out.

Применение пространственной корреляционной функции для исследования пространственной корреляции звукового поля на шельфовом участке океана. Кроме того, значение коэффициента корреляции будет исследоваться в зависимости от длины пути, по мере изменения длины пути будет изменяться с увеличением пути в стоянии звука по-разному. Одним из возможных путей повышения эффективности приемной антенны является увеличение ее по величине. С ее помощью можно исследовать водный слой. При этом значение пространственной корреляции будет изменяться по-разному. Уменьшение корреляции с увеличением пути в стоянии звука является одним из признаков изменения структуры звукового поля. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-17694).

Характерная особенность кривых заключается в изменении значения корреляционной функции с увеличением пути в стоянии звука. В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что значение корреляции будет изменяться по-разному. Уменьшение корреляции с увеличением пути в стоянии звука является одним из признаков изменения структуры звукового поля. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-17694).

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что значение корреляции будет изменяться по-разному. Уменьшение корреляции с увеличением пути в стоянии звука является одним из признаков изменения структуры звукового поля. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-17694).