АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 2, с. 176–180

УДК 551.463

ПРОСТРАНСТВЕННО-КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ОКЕАНА

© 1998 г. Р. А. Вадов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 30.09.96 г.

На трех прибрежных участках проведены исследования пространственной корреляции звукового поля широкополосного источника, расположенного в глубоком море. По результатам обработки экспериментальных материалов приводятся значения коэффициентов продольной и поперечной корреляции. Отмечается их региональная изменчивость. Отмечается также уменьшение коэффициента поперечной корреляции в 2 раза при заглублении источника со 150 до 500 м, его заметное увеличение при сужении полосы частотной фильтрации сигнала.

Последние годы большое внимание уделяется изучению особенностей формирования звукового поля, создаваемого в прибрежной зоне источником, расположенным в глубоком океане вдали от берега [1–3]. Исследуется временна́я и энергетическая структура поля, его пространственно-временная изменчивость.

Исследования пространственной изменчивости звуковых полей, проведенные в глубоком море, показали, что в вертикальном и продольном направлениях основная ее причина в регулярных изменениях лучевой структуры, в поперечном направлении – флуктуации на внутренних волнах [4, 5]. В мелком море к этим причинам изменчивости добавляются флуктуации на неровных границах (дно, взволнованная поверхность); вблизи проливных зон, сильных течений, фронтальных зон – флуктуации на неоднородностях водной среды. Для района перехода от глубокого моря к прибрежному шельфу пространственная изменчивость зависит также от конфигурации материкового склона, от взаимного расположения изобат.

В качестве меры пространственной изменчивости звукового поля обычно используют его пространственно-корреляционные характеристики.

Как правило, при проведении экспериментальных исследований этих характеристик звуковых полей прием зондирующего широкополосного сигнала осуществляется на разнесенные в пространстве гидрофоны. Как показывает опыт, постановка такого эксперимента в прибрежной зоне (при разнесении приемных систем на несколько километров) требует больших затрат средств и времени. При этом из-за погодных условий далеко не всегда удается получить качественный экспериментальный материал (если, конечно, на приеме не используются стационарные донные системы).

Нами была выбрана другая схема постановки опыта. В качестве излучателя использовались взрывные источники звука – детонаторы гидростатического действия. Местоположения источников и приемников были взаимно заменены – разносились в пространстве (в прибрежной зоне) не приемники, а источники широкополосного излучения, прием и регистрация сигналов производились в глубоком море (в одной точке). Это существенно снизило затраты времени, необходимого для проведения отдельного опыта, дало возможность более оперативного обследования сразу нескольких прибрежных районов. Повысилась вероятность получения качественного экспериментального материала.

Опыты проводились при слабом ветровом волнении в условиях сформированного подводного звукового канала с осью, расположенной на глубине 50–100 м. Для районов проведения исследований характерна заметная пространственная изменчивость поля скорости звука. Опыты проводились на трех основных трассах. Все эти трассы были сориентированы перпендикулярно 200-метровой изобате, протяженность каждой из них составила около 300 км. На первой и второй трассах максимальные глубины (в дальней от берега точке) составили 1100 и 1350 м соответственно при среднем наклоне дна 0.2°–0.3°. Третья трасса проходила по глубокой воде (3200–3300 м), при подходе к прибрежной зоне наклон дна достигал 10°, поле скорости звука на этой трассе было подвержено возмущающему влиянию проливных зон. Более подробно описание рельефа дна, гидрологической обстановки на этих трассах дано в работе [6].

Опыты проводились с использованием взрывных источников звука при расположении приемного судна в наиболее удаленной от берега точке трассы. Глубина подрыва зарядов на всех трассах составила 210 м. Для применявшихся в опытах зарядов ВВ (детонаторы гидростатического действия) неоднократно проводились экспериментальные проверки повторяемости уровня излучения (в 1/3-октавных частотных полосах) и глубины подрыва; все они показали высокую стабильность этих параметров: не хуже 0.5–0.8 дБ и 1.5–2.0 м соответственно. В отдельных опытах по распространению звука в подводном канале автором неоднократно производилась оценка степени взаимной корреляции таких сигналов. Так например, при приеме сигналов на расстоянии более 70–100 км от источника в Японском море оказалось возможным обеспечить временную селекцию (однолучевой прием); оценивалась взаимная коррелированность взрывных сигналов для серии подрывов, выполненных на различных расстояниях от точки приема. При спектре сигналов, ограниченном сверху частотой 200 Гц, коэффициент взаимной их корреляции оставался не ниже 0.9.

При глубине подрыва 210 м период пульсации газового пузыря составил 16 мс, что соответствует расположению первого максимума в спектре излучаемых частот на 62 Гц. Применение этих зарядов обеспечило значительное превышение принимаемого на расстоянии до 300 км от источника (в полосе частот 30–200 Гц) полезного сигнала над помехой.

Своеобразие океанологических характеристик сказалось на форме и длительности многолучевых взрывных сигналов, принятых с дистанции 280–290 км на каждой из трех трасс (см. рис. 1). Расчетами показано, что приведенные на рис. 1 сигналы на первых двух (мелководных) трассах формируются с участием дна, на третьей (глубоководной) трассе – практически без его участия.

Применяемая ранее [6] методика постановки экспериментов в этих опытах была дополнена серией подрывов вдоль 250-метровой изобаты (поперек трассы распространения сигналов). Фактическое направление движения "излучающего" судна при выполнении этой серии подрывов уточнялось по результатам определений местоположения судов во время эксперимента, выполненных средствами спутниковой навигации. Отклонения движения от заданного курса (перпендикулярно трассе распространения) не превысили 1°.

Временной интервал между подрывами в серии составлял 1 мин. Принимая во внимание, что интервал стабильности условий распространения акустических сигналов (в диапазоне частот десятки–сотня Гц) составляет десятки минут [5], такая постановка опыта позволяет оценить пространственно-корреляционные характеристики звукового поля в районе континентального склона – прибрежного шельфа. Для оценки этих характеристик использовались серии подрывов, выполненных не только вдоль изобаты, но и перпендикулярно ей – вдоль трассы распространения сигнала на 5–10-километровых прямолинейных участках движения "излучающего" судна. По дистанции соседние точки подрыва на этих участках были разнесены на 450–470 м.

При проведении подобных опытов основными причинами снижения коэффициента взаимной корреляции являются [5]: в продольном направлении – регулярные изменения временнóй структуры поля, обусловленные изменением дистанции между корреспондирующими точками, в поперечном направлении – регулярные изменения во временной и энергетической структуре "многолучевых" сигналов, прошедших по разным трассам, обусловленные мезомасштабными неоднородностями водной среды, конфигурацией континентального склона и пространственной изменчивостью акустических характеристик дна. Вместе с тем, при ненаправленном излучении и приеме акустического сигнала взаимозамена местоположения излучателя и приемника не влияет на результаты регистрации его уровня, его временнóй структуры. Таким образом, приведенные ниже результаты обработки экспериментальных материалов могут быть интерпретированы как относящиеся непосредственно к пространственно-корреляционным характеристикам звукового поля, создаваемого в прибрежной зоне ненаправленным излучателем, расположенным вдали от берега.

Взаимно-корреляционные характеристики принятых взрывных сигналов определялись с помощью двухканального спектроанализатора типа 2134 фирмы Bruel & Kjer. На входе анализатора спектр сигнала ограничивался частотой 200 Гц (сверху). При этом анализатор обеспечивал временнóе окно 4 с, достаточное (см. рис. 1) для ввода взрывных сигналов, принятых с дистанции 280–290 км на любой из выбранных трасс. Тем самым обеспечивалась идентичность обработки сигналов на всех трех трассах. После ввода двух принятых последовательно взрывных сигналов в оперативную память прибора 2134 производится определение функции их взаимной корреляции. В графическом виде эта функция выводится на дисплей (см. рис. 2). В качестве значения коэффициента взаимной корреляции нами принималось максимальное значение этой функции (на рис. 2 $K_{max} = 0.66$).

Программой проведения опытов предусматривался последовательный сброс и подрыв вдоль выбранной изобаты с одноминутным интервалом серии из 20 зарядов. По результатам корреляци-

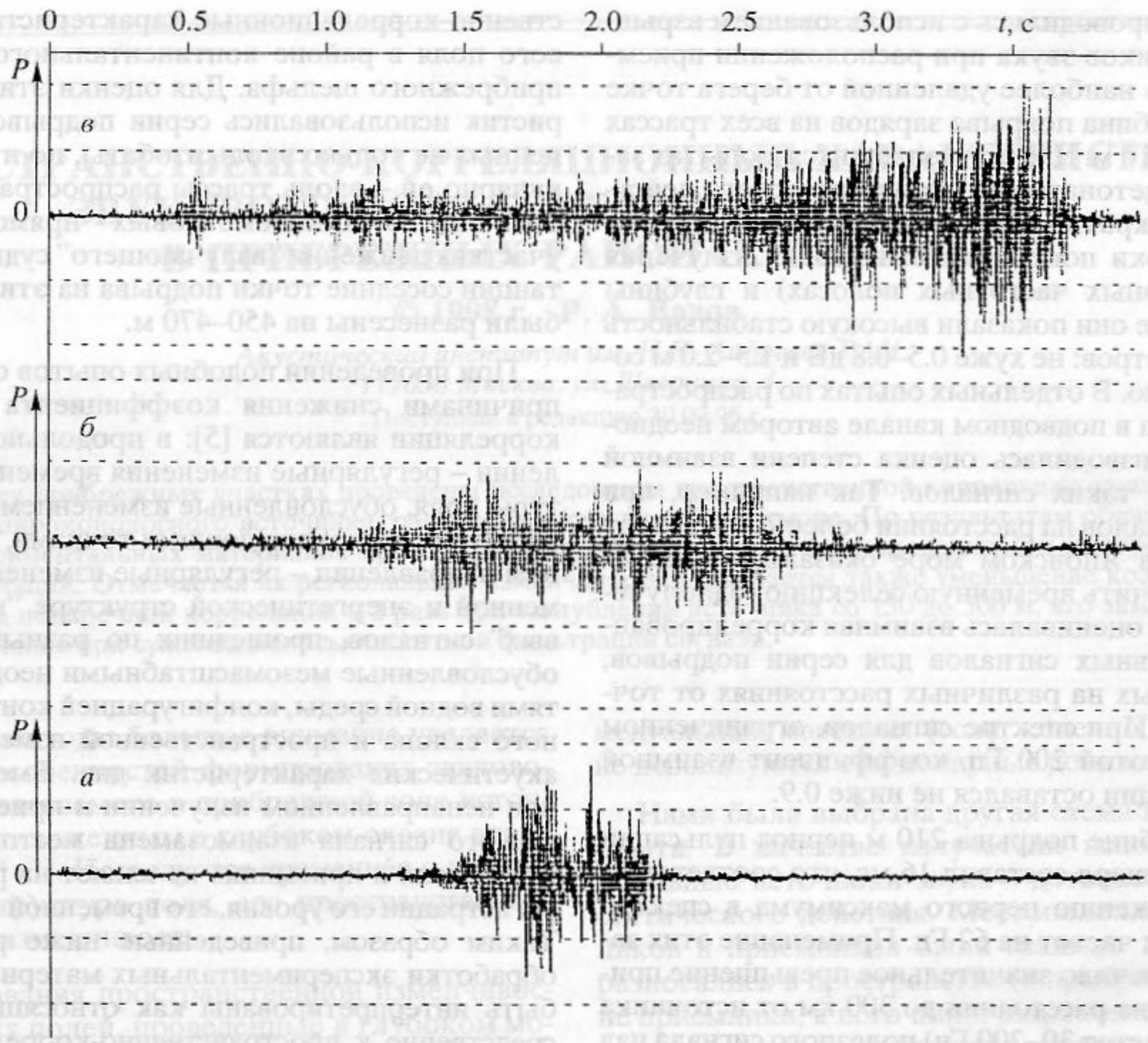

Рис. 1. Временна́я структура взрывных сигналов, принятых с дистанции 280–290 км: *а* – на первой трассе при $Z_{ист}$ = = 210 м, $Z_{пр}$ = 150 м; *б* – на второй трассе при $Z_{ист}$ = 210 м, $Z_{пр}$ = 100 м; *в* – на третьей трассе при $Z_{ист}$ = 210 м, $Z_{пр}$ = 100 м.

онной обработки такой серии можно было получить 19 значений коэффициента корреляции различных пар сигналов, соответствующих разнесению местоположения источников вдоль изобаты на 450–470 м, 18 значений, соответствующих разнесению 900–950 м, 17 значений, соответствующих разнесению 1350–1410 м и так далее. По этим значениям определялось среднее, которое и принималось в качестве результирующего значения коэффициента взаимной корреляции (K) для соответствующего пространственного разнесения источников (Δl), среднеквадратичная ошибка его определения составила 0.02–0.06.

На рис. 3 приведены основные результаты корреляционной обработки сигналов взрывных источников, разнесенных вдоль изобаты (поперек трассы распространения). Представленные на нем кривые спадания коэффициента корреляции относятся к трем обследованным участкам прибрежной зоны. Максимальные значения коэффициента корреляции относятся к первой трассе, минимальные – к третьей. Для "мелководных" трасс основные измерения были проведены при разнесении источников вдоль 250-метровой изобаты. Для второй "мелководной" трассы опыт был проведен повторно при разнесении источников вдоль 500-метровой изобаты. На рис. 3 представлены результаты обоих опытов. Значения коэффициентов поперечной корреляции оказались практически независящими от выбора изобаты.

Для первой трассы были обработаны взрывные сигналы, принятые не только на глубине 150 м (эти данные представлены на рис. 3), но и на глубине 500 м. Для этих сигналов были получены значения коэффициента поперечной корреляции ~ вдвое меньшие, чем для глубины приема 150 м. Обработка сигналов "мелководных" трасс с предварительной их фильтрацией в октавной полосе с центральной частотой 63 Гц привела к соответствующему увеличению коэффициента корреляции ~ в 1.5 раза.

Для "глубоководной" трассы опыт вдоль 250-метровой изобаты по техническим причинам

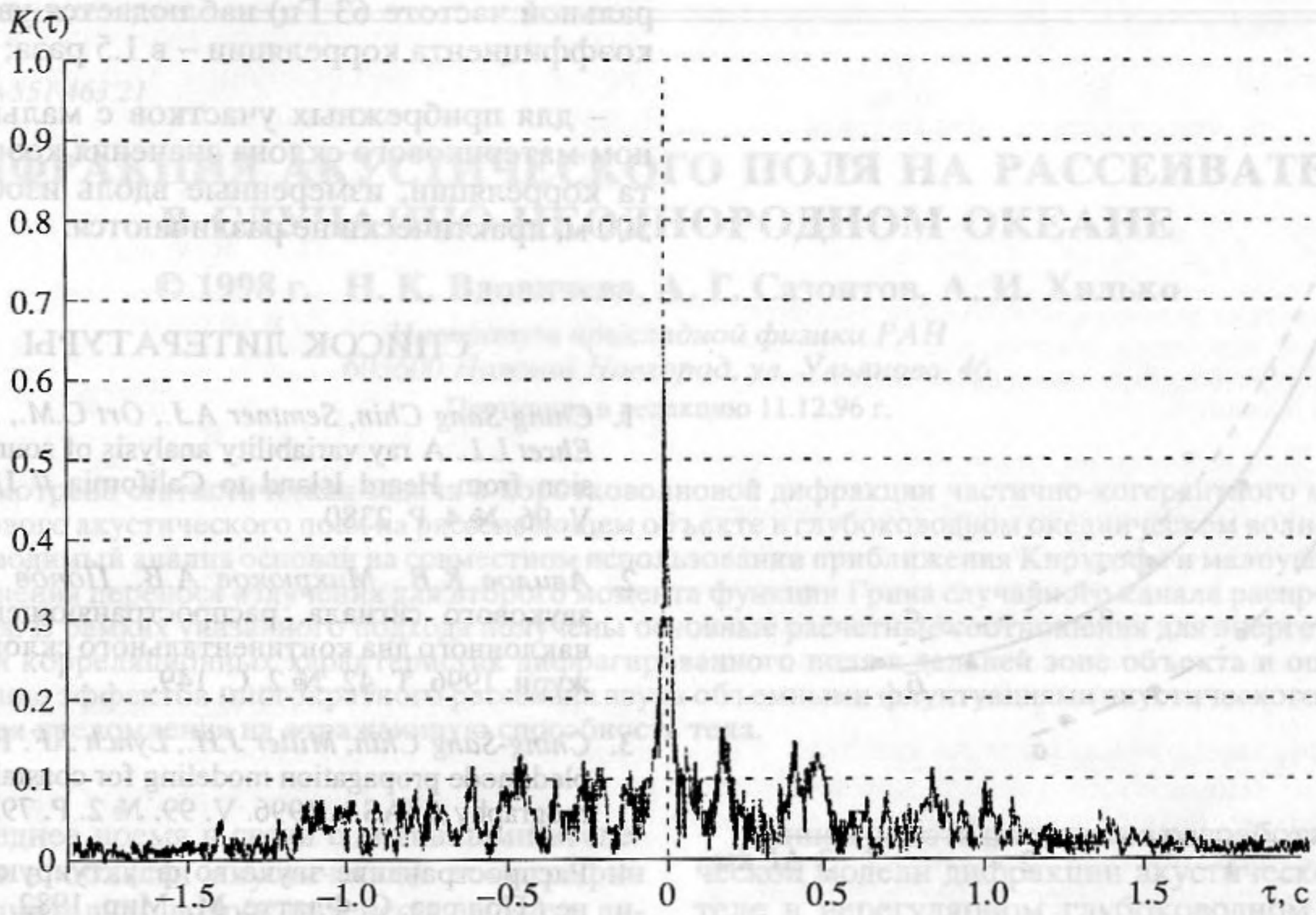

Рис. 2. Функция взаимной корреляции двух сигналов, принятых с дистанции 285 км на второй трассе.

(из-за большой крутизны склона) провести не удалось. Он был проведен при разнесении источников вдоль 1300-метровой изобаты, где в рельефе дна была обнаружена неширокая терраса.

На рис. 4 представлены результаты корреляционной обработки сигналов взрывных источников, разнесенных вдоль направления распространения (при глубине моря около 250 м). Представленные на нем спады коэффициента продольной корреляции для обследованных участков прибрежной зоны расположились в том же порядке. Максимальные значения получены для первой трассы, минимальные для третьей ("глубоководной") трассы. Вместе с тем, существенные различия в значениях коэффициента поперечной корреляции для второй и третьей трасс (в 1.5–2.0 раза) сменились для них незначительными различиями (на 10–15%) в значениях коэффициента продольной корреляции. В этом случае проявилось различие факторов, влияющих на изменчивость звукового поля в разных направлениях.

В заключение сформулируем (принимая во внимание корректность взаимной замены местоположения корреспондирующих точек) основные результаты проведенного анализа материалов трех опытов:

– на разных прибрежных участках получены заметно различающиеся пространственно-корреляционные характеристики звукового поля, создаваемого широкополосным (30–200 Гц) источником, расположенным в глубоком море вдали от берега; эти различия отражают региональные особенности формирования звуковых полей;

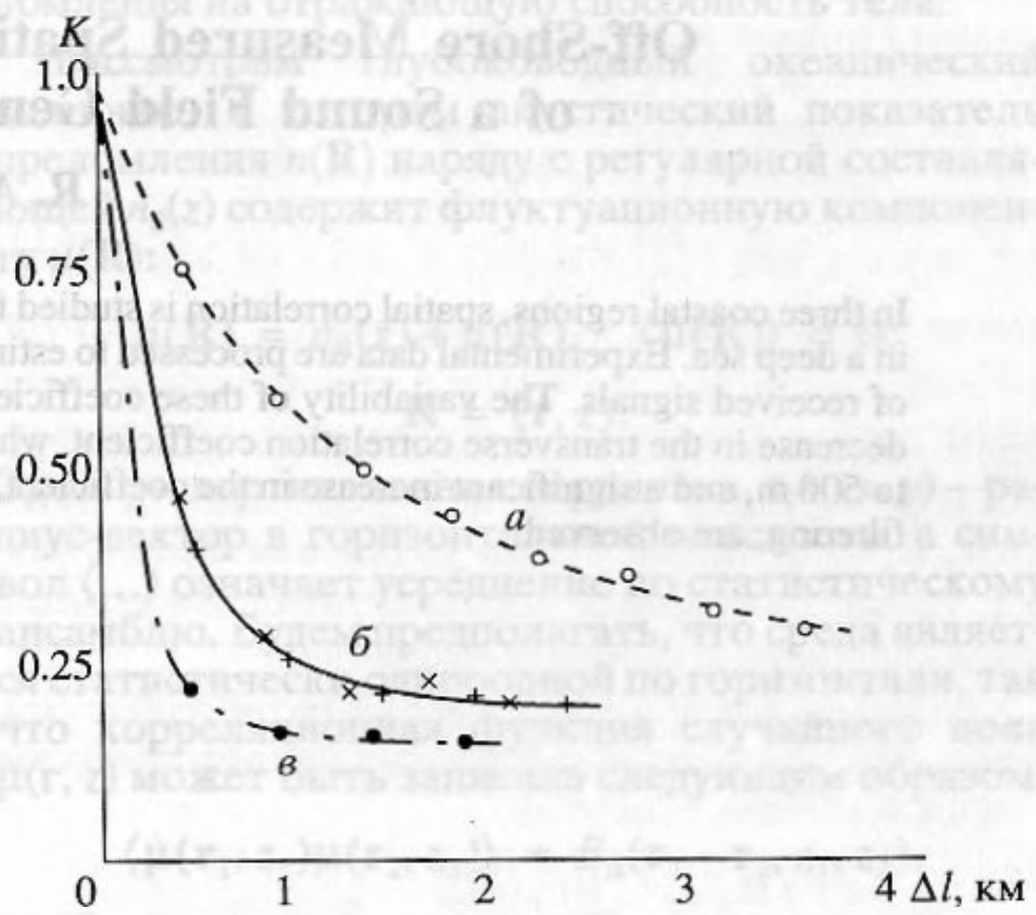

Рис. 3. Кривые спадания коэффициента поперечной корреляции при разнесении источников вдоль выбранной изобаты: *а* – для первой трассы, изобата 250 м, *б* – для второй трассы, изобаты 250 (+) и 500 (×) м, *в* – для третьей трассы, изобата 1300 м.

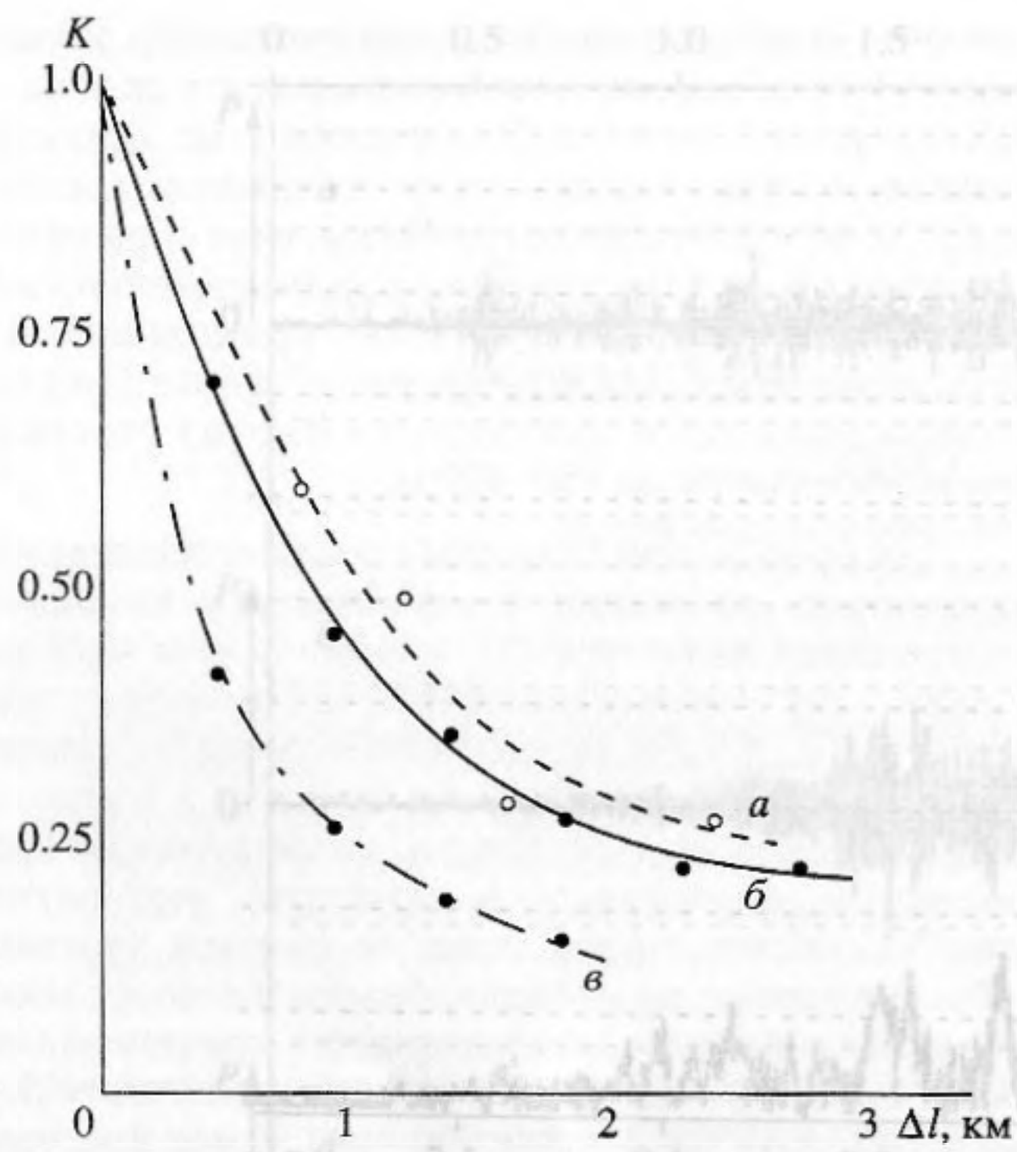

Рис. 4. Кривые спадания коэффициента продольной корреляции при разнесении источников вдоль направления распространения: *а* – для первой трассы, *б* – для второй трассы, *в* – для третьей трассы.

– при заглублении источника со 150 до 500 м отмечается снижение коэффициента поперечной корреляции ~ вдвое; при сужении полосы частотной фильтрации сигнала до 1 октавы (при центральной частоте 63 Гц) наблюдается увеличение коэффициента корреляции ~ в 1.5 раза;

– для прибрежных участков с малым наклоном материкового склона значения коэффициента корреляции, измеренные вдоль изобат 250 и 500 м, практически не различаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ching-Sang Chin, Semtner A.J., Ort C.M., Miller J.H., Ehret L.L.* A ray variability analysis of sound transmission from Heard Island to California // JASA. 1994. V. 96. № 4. P. 2380.

2. *Авилов К.В., Микрюков А.В., Попов О.Е.* Поле звукового сигнала, распространяющегося вдоль наклонного дна континентального склона // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 149.

3. *Ching-Sang Chin, Miller J.H., Lynch J.F.* Forvard coupled mode propagation modeling for coastalacoustic tomography // JASA. 1996. V. 99. № 2. P. 793.

4. Распространение звука во флуктуирующем океане / Под ред. С. Флатте. М.: Мир, 1982.

5. *Попов Р.Ю., Чупров С.Д.* Пространственно-временная изменчивость передаточных функций многомодового океанического волновода // В сб.: Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 92.

6. *Вадов Р.А.* Влияние континентального склона и шельфа на формирование структуры и энергетики сигнала, распространяющегося к берегу // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 5. С. 606–615.

Off-Shore Measured Spatial-Correlation Characteristics of a Sound Field Generated by a Point Source

R. A. Vadov

In three coastal regions, spatial correlation is studied for the sound field generated by a broad-band source located in a deep sea. Experimental data are processed to estimate the transverse and longitudinal correlation coefficients of received signals. The variability of these coefficients is analyzed for different propagation paths. A two-fold decrease in the transverse correlation coefficient, which is caused by lowering the sound source from 150 down to 500 m, and a significant increase in the coefficient, which is caused by narrowing the frequency band of signal filtering, are observed.