

УДК 534.23

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ ОТ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

© 2004 г. О. П. Галкин, Р. Ю. Попов, Е. В. Симакина

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 25.12. 02 г.

Представлены результаты экспериментальных измерений пространственной корреляции сигналов от подводных взрывов при вертикальном и поперечном (относительно исследуемой трассы) разнесении точек приема. Измерения проведены на двух трассах в Баренцевом море протяженностью ~200 и ~110 км на частотах ниже 500 Гц. Отмечается, что вертикальный радиус корреляции растет с увеличением дистанции до источника, что в первую очередь обусловлено уменьшением углового сектора прихода энергонесущих сигналов. Поперечный радиус для частот менее 300 Гц слабо зависит от длины трассы, а для более высоких частот он уменьшается, начиная с ~40 км, что может быть связано с влиянием короткопериодных внутренних волн.

Баренцево море относится к числу мелководных районов океана, характерной особенностью которых является то, что распространение звука во многих случаях сопровождается многократными отражениями от границ водного слоя и, как следствие, значительным ослаблением сигнала. Таким образом, традиционная проблема гидроакустического мониторинга акваторий – обнаружение слабых сигналов на фоне сильных помех – приобретает особую остроту. Для преодоления этой трудности целесообразно использовать приемные антенны с большими апертурами. Однако, эффективность их применения обусловлена степенью когерентности звуковых сигналов по меньшей мере в пределах площади антенн и возможной ее зависимостью от расстояния до источника звука.

Отметим, что исследованиям в этой области посвящены многие работы (см., например, [1–5]). Выделим из них работу Урика и Лунда [2], которые изучали вертикальную когерентность реверберации в мелком море с применением взрывных источников звука. Авторы установили, что с течением времени диапазон углов прихода реверберационных сигналов сужается. Лучи, по которым распространяются сигналы, становятся более пологими. В результате вертикальный радиус корреляции звукового поля увеличивается со временем. Упомянем также работу [6], относящуюся к измерению параметров вертикальной корреляции реверберационного поля в условиях прибрежного клина. Обнаружена существенная анизотропия поля в азимутальной плоскости. В работах [7, 8] исследовалась вертикальная и

горизонтальная поперечная (относительно трассы распространения звука) корреляция звуковых полей в прибрежном клине тихоокеанского побережья Камчатки. Показано, что параметры корреляции меняются в широких пределах в зависимости от места размещения гидрофонов, рельефа и строения дна клина, азимутального угла на источник и расстояния до него, гидрологических условий.

Ниже описаны результаты экспериментальных исследований пространственной корреляции звуковых полей от подводных взрывов при вертикальном и поперечном разнесении гидрофонов и изменяющемся расстоянии до точек подрыва. Измерения проводились в Баренцевом море в гидрологических условиях летне-осеннего времени года. На рис. 1 представлен район работ и две трассы, на которых изучались вертикальная (трасса I) и поперечная (трасса II) корреляция.

Длина трассы I равнялась ~200 км. Приемное судно лежало в дрейфе в точке *a*. С его борта была спущена вертикальная цепочка, содержащая 6 гидрофонов. Длина цепочки равнялась 19 м. Гидрофоны были расположены на различных расстояниях друг от друга. Если отсчет вести от нижнего приемника вверх, то удаления гидрофонов от соседнего составляли: 5 м, 1 м, 2 м, 7 м и 4 м. Центр цепочки размещался на горизонте ~100 м. Отклонение центра от этого горизонта контролировалось с помощью глубиномера и не превышало ± 1 м. Судно, производящее подрывы толовых зарядов весом 2.5 кг на глубине 100 ± 3 м, удалялось в выбранном направлении со скоростью 12 узлов. Сброс зарядов проводился с заданным

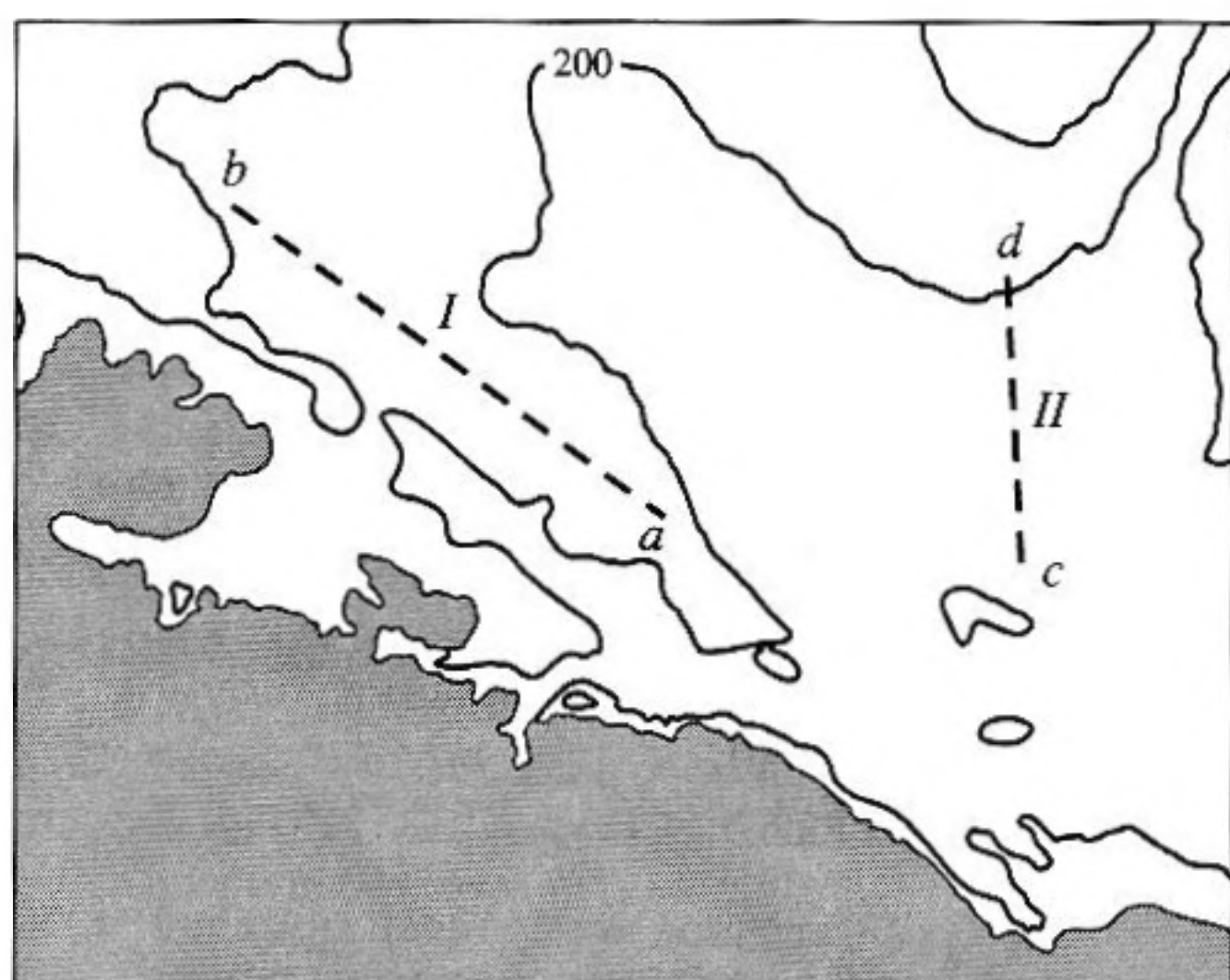


Рис. 1. Район работ и две трассы по изучению распространения звука.

временным интервалом на ходу. Расстояние между судами определялось приблизительно по разности моментов времени взрыва, передаваемого по радиотракту, и прихода этого сигнала на гидрофоны.

На рис. 2а представлены зависимости скорости звука от глубины для восьми точек трассы (примерно через каждые 30 км). Профиль дна вдоль трассы показан на рис. 2б. Дно имеет полого-холмистый рельеф, причем уклоны не велики и не превышают 15'. Глубина на трассе колеблется от 230 до 330 м. Дно составляли грубозернистые песчаные и гравийно-галечные осадки.

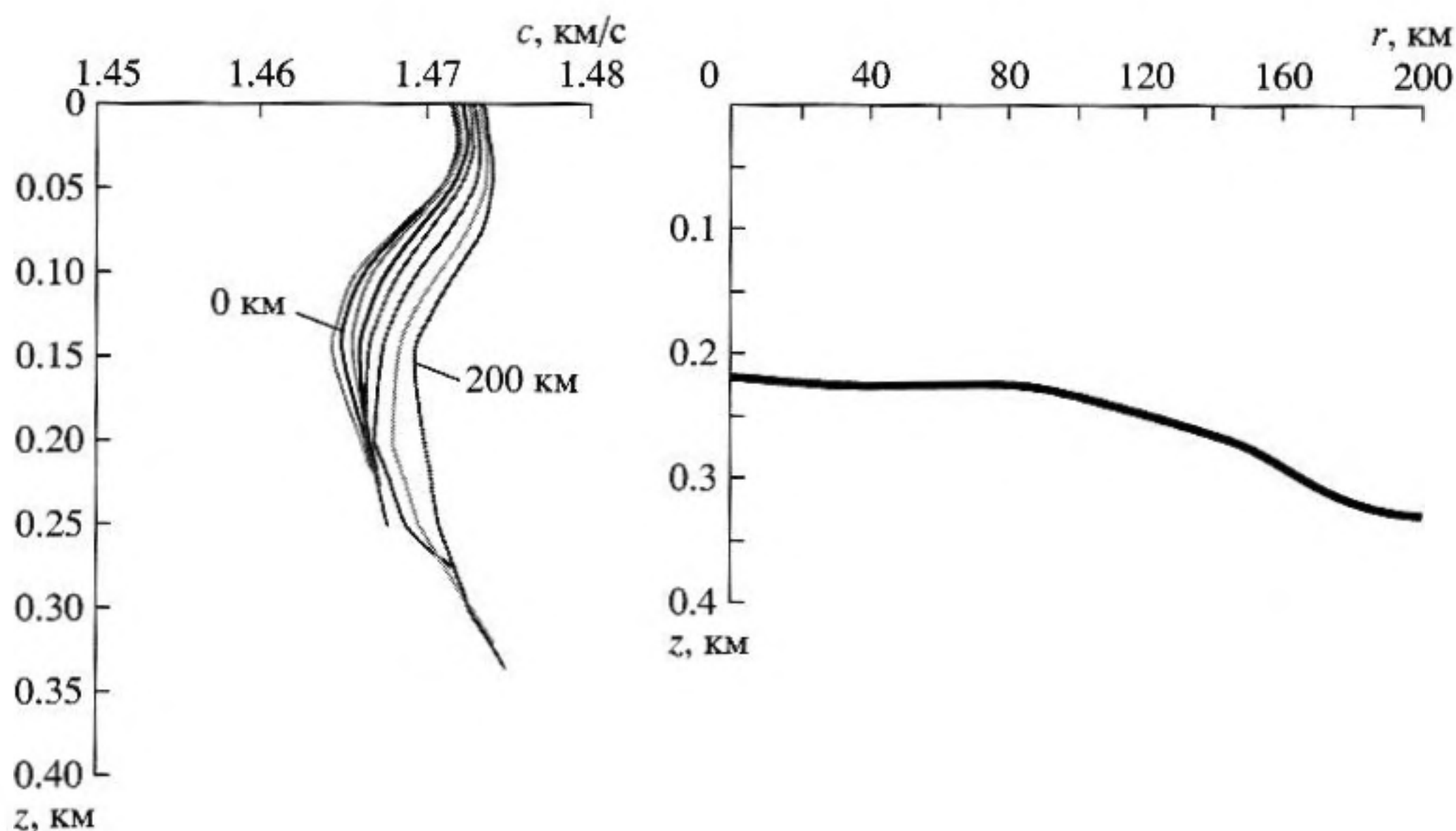


Рис. 2. Зависимости скорости звука от глубины и профиль дна вдоль трассы I.

Сила ветра и волнение поверхности моря в период проведения измерений равнялись 3 и II балла соответственно.

Анализ сигналов, приходящих на гидрофоны, позволил исследовать особенности вертикальной когерентности звукового поля в мелком море и их зависимости от дистанции до источника.

Обычно в качестве меры пространственной когерентности звукового поля широкополосного сигнала (в том числе при вертикальном и горизонтальном разнесении приемников) используется функция корреляции (или после нормировки коэффициент корреляции). Однако в реальных измерениях фигурирует величина

$$\Phi(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} x(t)y(t-\tau)dt, \quad (1)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – сигналы, принимаемые в двух пространственно разнесенных точках, T – время усреднения, обычно совпадающее с длительностью реализации сигнала, а τ – временной сдвиг. Функция $\Phi(\tau)$ будет совпадать с функцией корреляции только тогда, когда на интервале усреднения сигналы представляют стационарный эргодический процесс. Насколько такое предположение в рассматриваемом случае оправдано не совсем ясно. По этой причине можно говорить лишь об оценке когерентности сигналов.

При описываемых измерениях использовалось понятие кратковременной функции корреляции (соответствующий коэффициент корреляции обозначается $R_{кр}$). В этом случае время усреднения меньше времени существования многолучевого импульсного сигнала (так называемого “вре-

мени затягивания" T_3), но больше периода средней частоты анализа T_{cp} , что требуется для достаточно точных измерений $R_{кр}$ [2]). Другими словами T должно удовлетворять условию

$$T_{cp} < T < T_3. \quad (2)$$

На рис. 3 представлены графики, полученные по результатам измерений вертикальной корреляции. Они иллюстрируют изменение $R_{кр}$ со временем в течение времени затягивания T_3 , т.е. в период между моментами приходов первого сигнала (в мелком море обычно по наиболее пологому лучу) и последнего, приходящего по наиболее крутому лучу. Параметром кривых служит величина Δz – разнесение гидрофонов по вертикали.

Заметим, что для строгого анализа картины изменения $R_{кр}$ от Δz необходимо использовать один опорный (эталонный сигнал). Здесь этому условию удовлетворяют только кривые, отвечающие следующим значениям Δz : 1, 3, 5, 10 и 14 м, причем в качестве эталонного использовался сигнал, принимаемый вторым гидрофоном от нижнего конца цепочки. Кривые, отвечающие другим значениям Δz , были получены при использовании других опорных сигналов. Однако, поскольку вся цепочка находилась в области небольшого и слабо меняющегося градиента скорости звука, изменением структуры поля на длине цепочки 19 м можно пренебречь и такая (смешанная) картина изменения $R_{кр}$ с Δz , по-видимому, достаточно правильно отражает действительность.

Анализ велся в полосе частот 240–340 Гц при $T = 0.1$ с. На рис. 3 представлены три семейства кривых для дистанций до источника звука, равных ~20; ~100 и ~196.0 км.

Для интерпретации полученных данных, прежде всего, отметим, что из простых геометрических соображений следует равенство (в пренебрежении кривизной волнового фронта)

$$\frac{\Delta t_i}{\Delta z} = \pm \frac{\sin \chi_i}{c},$$

где Δt_i – разность времен распространения сигнала по i -му лучу на интервале глубин Δz , χ_i – угол прихода сигнала по лучу в точки приема (знак зависит от направления прихода сигнала в вертикальной плоскости), c – скорость звука в этих точках. Отсюда ясно, что наиболее устойчивой к изменению вертикальной координаты будет временная структура участка принимаемого многолучевого сигнала, отвечающая приходам по наиболее пологим лучам. В мелководных районах океана – это область сигнала, прилегающая к переднему фронту (как уже отмечалось выше). Кривые на рис. 3 подтверждают вышесказанное. Увеличение Δz прежде всего сказывается на ко-

нечных участках приходящих сигналов. По мере роста Δz корреляция на этих участках сначала уменьшается, а затем меняет знак. Эта область отрицательной корреляции начинает (при дальнейшем увеличении Δz) сдвигаться к переднему фронту сигнала; в конечном же участке возникает второй положительный максимум корреляции и т.д.

Если сравнить кривые $R_{кр}(t)$ для трех дистанций r до источника при одинаковых Δz , то можно заметить, что изменение $R_{кр}$ со временем при увеличении r становится более "ленивым", т.е. коэффициент корреляции начинает менять знак при заметно большей разнице в глубинах приема Δz . Аналогичный результат следует также из расчетов характеристик звуковых полей на трассе. Внешний вид принимаемых взрывных сигналов свидетельствует о том, что время затягивания слабо зависит от длины трассы r и составляет ~2 с (точное определение этого времени затруднено из-за отсутствия видимого заднего фронта приходящего сигнала, превышающего уровень помех). Расчеты показывают, что с увеличением дистанции происходит сужение диапазона вертикальных углов прихода энергонесущих сигналов, которые принимаются в первую секунду существования многолучевого сигнала. Выше отмечалось, что корреляция сигналов, принимаемых по пологим лучам более устойчива к разнесению точек приема по сравнению с сигналами, распространяющимися по крутым лучам. Именно поэтому наблюдается такая картина, которая представлена на экспериментальных графиках рис. 3. Таким образом, вертикальный радиус корреляции растет с увеличением дистанции до источника звука.

Этот вывод становится еще более очевидным, если рассмотреть случай, часто встречающийся на практике, когда протяженность излучаемого импульса δ заметно превышает время затягивания T_3 . Тогда разрешения по времени отдельных приходов в многолучевом сигнале не происходит и пространственная корреляция звукового поля в месте приема определяется приходами сигналов сразу по всем лучам. Если в качестве источника звука используется подводный взрыв, то имитировать выше указанный случай можно, выбирая время усреднения в (1) несколько превышающим (на длительность короткого звукового импульса от взрыва) время затягивания приходящего сигнала. Полученные таким способом значения R при $\Delta z = 7$ м и $\Delta f = 240 - 340$ Гц представлены на рис. 4 в зависимости от дистанции до источника звука r (заметим, что в значениях R учтена поправка на отношение сигнал/помеха, разная для различных r). Из графика следует, что радиус вертикальной корреляции звукового поля в мелком море растет с увеличением расстояния r (хотя отношение сигнал/помеха уменьшается). Отме-

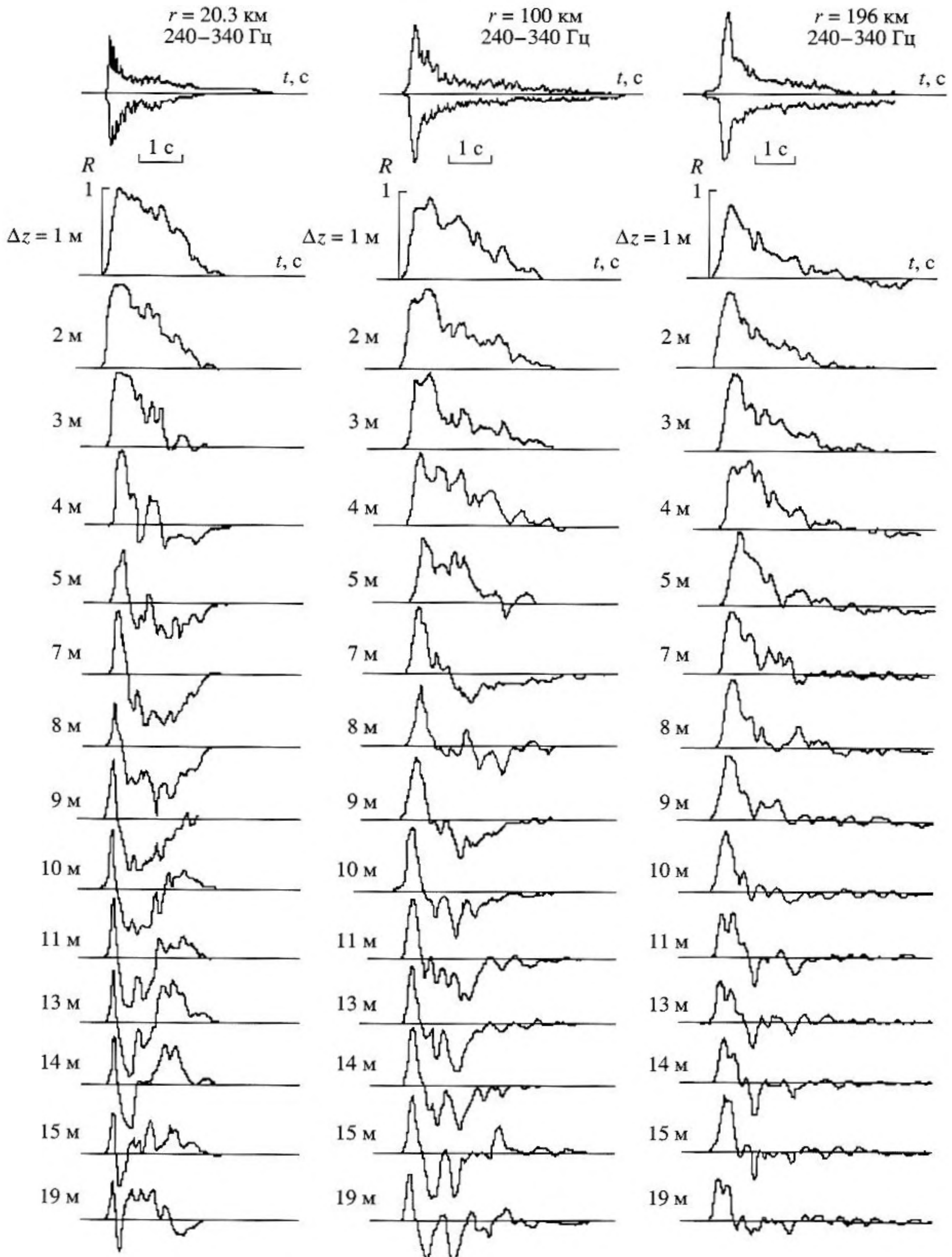


Рис. 3. Изменение кратковременной функции корреляции со временем в течение времени затягивания принимаемого сигнала для трех дистанций от источника.

тим, что наклон прямой, проведенной по экспериментальным точкам на рис. 4, при учете степени поверхностного волнения моря и измеренного

профиля скорости звука, характеризует усредненные по трассе акусто-геологические параметры дна.

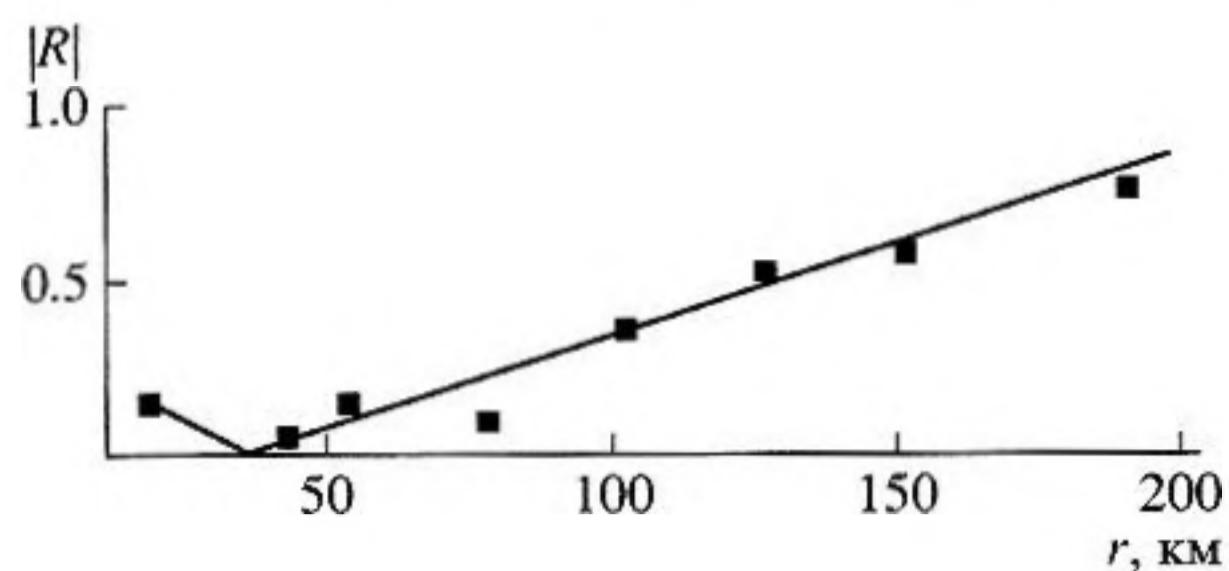


Рис. 4. Зависимость коэффициента вертикальной корреляции от дистанции до источника в полосе частот анализа 240–340 Гц.

Представленные экспериментальные результаты можно адекватно интерпретировать, основываясь на двух, подтвержденных расчетах, моментах. Во-первых, параметры вертикальной корреляции звуковых полей в мелком море определяются главным образом характеристиками многолучевого распространения звука с многочисленными отражениями сигналов от границ волновода. Во-вторых, с ростом дистанции вклад в суммарное поле сигналов, многократно отраженных от границ волновода, непрерывно уменьшается; поэтому уровень сигнала в районе заднего фронта, который должен превышать уровень помех, определяют сигналы, приходящие по все более пологим лучам.

Обратимся теперь к результатам исследования поперечной корреляции звуковых полей от подводных взрывов, проведенных на трассе II. Длина трассы несколько превышала 100 км. На рис. 5а и 5б представлены зависимости скорости звука от глубины в семи точках трассы, а также профиль дна вдоль нее. Во время эксперимента, который проводился в течение ~48 часов, волнение по-

верхности моря было III–IV балла (сила ветра 4–6 баллов). Прием звуковых сигналов проводился в южном конце трассы на два гидрофона, лежащих на дне моря на глубине ~110 м и разнесенных друг от друга в широтном направлении (поперек трассы) на ~2 км. Принимаемые сигналы передавались по радиотрактам на судно, стоящее на якоре на удалении ~9 км от гидрофонов. В качестве взрывных источников звука использовались толовые заряды весом 0.27 кг, подрываемые на горизонте 90 ± 3 м. Сброс зарядов производился со второго судна, которое удалялось со скоростью 12.5 узлов в северном направлении от центра приемной базы. Сброс производился с 1-минутным интервалом, так что расстояние между соседними точками сброса составляло ~375 м. Принимаемые сигналы вводились в ЭВМ, где производилось вычисление коэффициента взаимной корреляции. Время усреднения всегда соответствовало времени затягивания сигнала.

На рис. 6 представлены значения коэффициента корреляции R взрывных сигналов, принятых двумя донными гидрофонами в различных частотных полосах. Видно, что на частотах звука до ~300 Гц значение R при увеличении дистанции до источника сигнала от 10 до ~110 км изменяется незначительно. Однако с ростом частоты наблюдается заметное снижение R . (Отметим, что причины разброса значений R в интервале дистанций 50–70 км пока не вполне ясны.)

В большинстве случаев разрушение пространственной корреляции звуковых полей в океанических волноводах обусловлено главным образом изменениями временной структуры сигнала (связанными с многолучевым характером распространения звука), сопровождающимися изменениями местоположения точек приема или излучения.

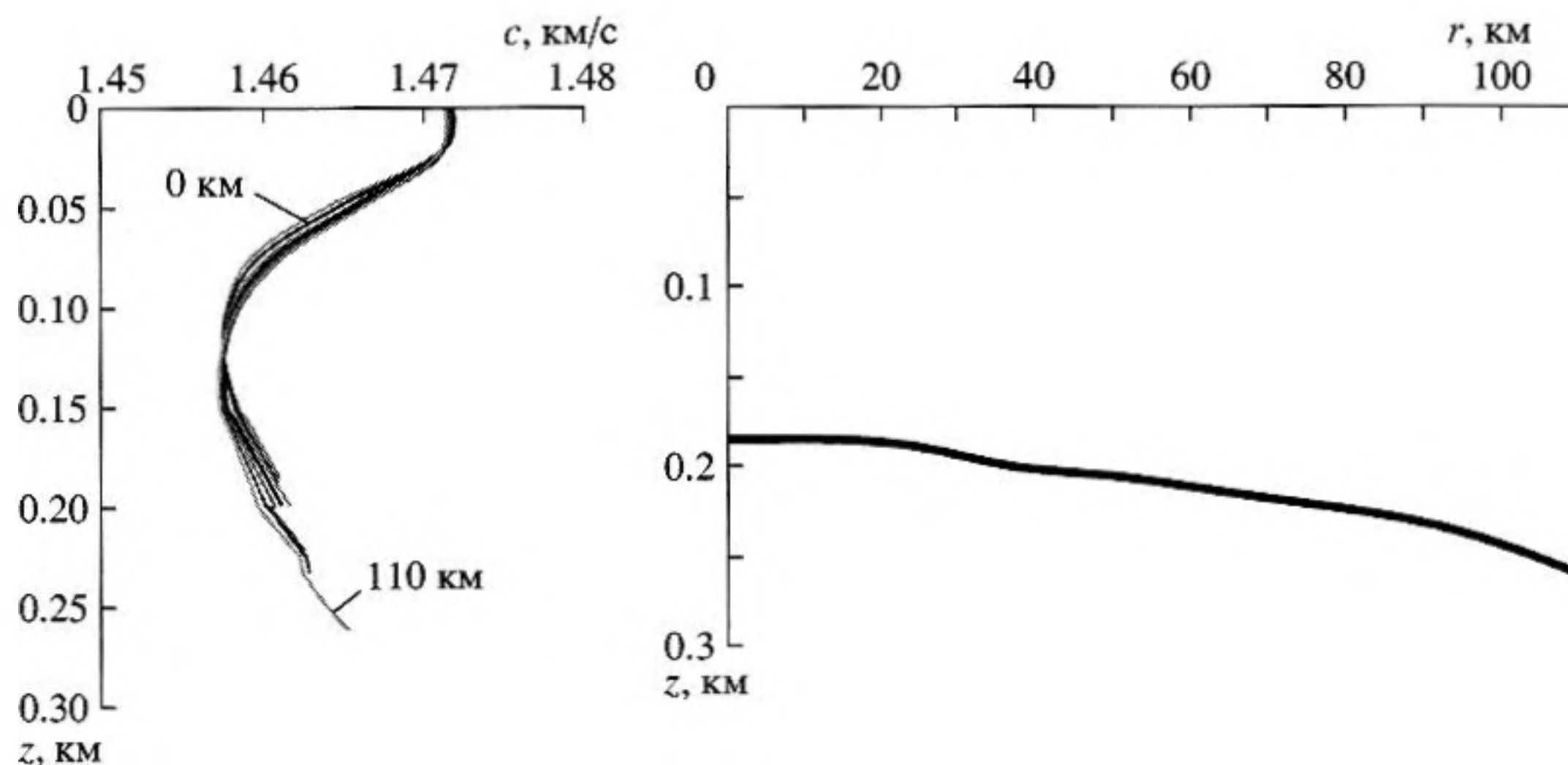


Рис. 5. Зависимости скорости звука от глубины и профиль дна вдоль трассы II.

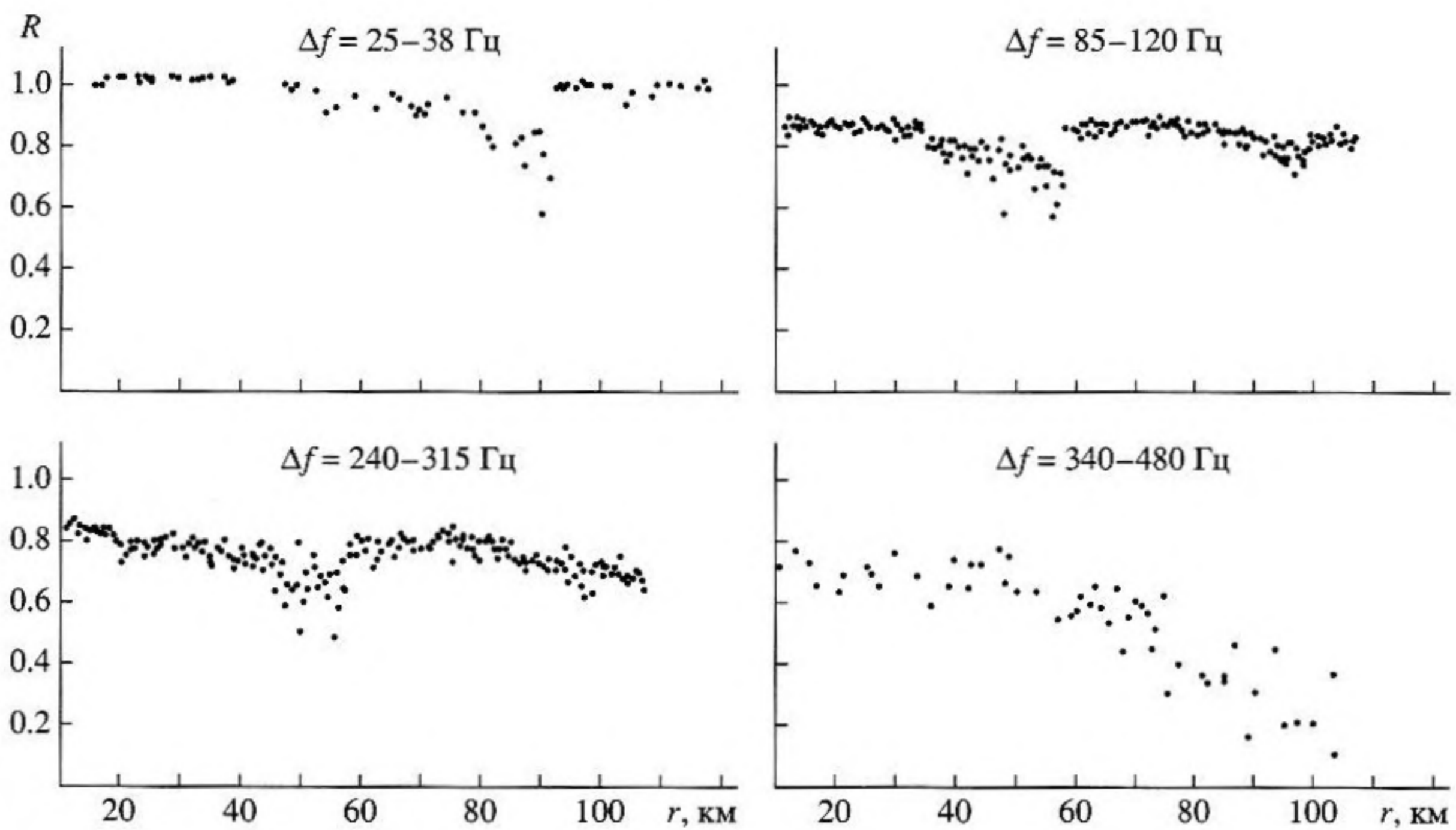


Рис. 6. Зависимости коэффициента поперечной корреляции взрывных сигналов в различных частотных полосах анализа.

Именно так обстояло дело при описанном выше исследовании вертикальной корреляции звукового поля. Однако, при разнесении точек приема поперек трассы распространения звука, когда она ориентирована по нормали к центру приемной базы, значительный вклад в разрушение коррелированности сигналов в мелком море могут давать статистические процессы в водной среде и пространственная изменчивость акусто-геологических характеристик морского дна. Сделанные приближенные оценки свидетельствуют о том, что вклад в разрушение пространственной корреляции звукового поля мелкомасштабных неоднородностей морской среды пренебрежимо мал. Действительно, флуктуации времени распространения сигнала для указанных неоднородностей могут быть

оценены по формуле [10]: $\tau = \left(\frac{\sqrt{\pi} \langle \mu^2 \rangle}{2} \frac{ar}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}$. Здесь

$\langle \mu^2 \rangle$ – средний квадрат флуктуаций показателя преломления среды; c – скорость звука; a – средний размер случайных неоднородностей среды; r – расстояние. Для дистанций $r \sim 100$ км флуктуации времени τ не превышают 0.01 мс ($a = 1.5\text{--}1.9$ м, $\langle \mu^2 \rangle = (16\text{--}22) \times 10^{-10}$ [11]). С другой стороны, даже приближенный учет влияния короткопериодных внутренних волн говорит о том, что их вкладом в формирование звуковых полей не следует пренебрегать. Согласно работе [12] (необходимо, правда, отметить, что условия, проанализированные в ней, отличаются от условий описываемого эксперимента) для оценки интервала поперечной кор-

реляции звукового поля в присутствии короткопериодных внутренних волн можно приблизительно (с точностью не более 30%) использовать

соотношение $d_r \approx \frac{\sqrt{6l}}{\Phi}$, где Φ – параметр, характеризующий неоднородности среды, равный 15–17

для частот, близких к 400 Гц, и дистанций около 400–450 км, а $l \approx 3.7$ км – параметр, полученный экспериментально. При такой грубой ($\pm 30\%$) и упрощенной оценке радиус пространственной корреляции, определяемый по спаданию коэффициента корреляции в e раз, на дистанции 100 км оказывается меньше использованного в экспериментах разнесения гидрофонов, равного 2 км. При сокращении протяженности трассы (на той же частоте звука) этот интервал увеличивается и при $r \approx 10\text{--}15$ км он уже превышает расстояние между гидрофонами. Представленные теоретические оценки с учетом их приближенного характера не противоречат экспериментальным данным, приведенным на рис. 6. Таким образом, изменения пространственного радиуса корреляции с дистанцией в различных частотных полосах могут быть связаны с влиянием внутренних волн, характеристики которых целесообразно измерять во время проведения экспериментов.

На основе представленных выше результатов и проведенного анализа полученных данных можно сделать несколько обобщающих выводов.

Вертикальный радиус корреляции звуковых полей в Баренцевом море на частотах ниже

500 Гц растет с увеличением дистанции до источника звука и, по-видимому, может достигать десятка метров; такое "поведение" вертикального радиуса корреляции при увеличении дистанции связано в первую очередь с сужением углового спектра входящих сигналов, вносящих наибольший вклад в суммарную интенсивность звукового поля; эта особенность структуры поля, характерная для мелкого моря, обусловлена донно-поверхностными отражениями.

Поперечный (в горизонтальной плоскости) радиус корреляции звуковых полей в исследованном районе Баренцева моря при размещении источника на траверзе приемной базы для частот ниже 300 Гц составляет не менее 2 км и слабо зависит от дистанции до источника звука; на более высоких частотах (350–500 Гц) он при увеличении дистанции, начиная с ~40 км, постепенно уменьшается; одной из существенных причин таких изменений пространственной корреляции может быть влияние короткопериодных внутренних волн.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность Богунцу С.В., Ежову Л.И., Тюрину П.Г. за помощь при проведении измерений, а также Ленецу А.Е. и Семенову Ю.В. за проведение необходимых расчетов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 00-02-17694 и № 02-02-17325).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Urlick R.* Measurements of the Vertical Coherence of the Sand from a Near-Surface Source in the Sea and the Effect on the Gain of Vertical Array // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1973. V. 54. № 1. С. 115–120.
2. *Urlick R., Lund G.* Vertical Coherence of Shallow-Water Reverberation // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1970. V. 47. № 1. С. 343–349.
3. *Панкова С.Д., Тужилкин Ю.И.* Вертикальная корреляция шумовых сигналов в мелководных районах моря // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 3. С. 388–396.
4. *Wang Q., Zhang R.* Sound Spatial Correlations in Shallow Water // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1992. V. 92(2). Pt. 1. P. 932–938.
5. *Spiesberger G.L.* Identifying Cross-correlation Peaks due to Multipaths with application to optimal passive localisation of transient signals and tomographic mapping of the Environment // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1996. V. 100(2). Pt. 1. P. 910–917.
6. *Попов Р.Ю., Симакина Е.В.* Пространственная корреляция реверберационных сигналов в шельфовой зоне океана // *Акуст. журн.* 1994. Т. 40. № 4. С. 655–660.
7. *Галкин О.П., Кулаков А.В., Попов Р.Ю.* Вертикальная изменчивость звуковых полей в прибрежном клине // *Акуст. журн.* 2002. Т. 48. № 5. С. 614–620.
8. *Галкин О.П., Попов Р.Ю., Семенов Ю.В., Симакина Е.В.* Пространственная корреляция звукового поля в шельфовой зоне океана // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. № 5. С. 616–622.
9. *Бендат Дж., Пирсол А.* Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. С. 312.
10. *Кузнецова Н.Г., Чернов Л.А.* Флуктуации угла прихода луча и времени распространения сигнала по лучу в слоисто-неоднородной среде // *Вопросы судостроения, сер. Акустика*, 1982. Вып. 15. С. 5–12.
11. *Чупров С.Д., Швачко Р.Ф.* Звуковое поле в океане с учетом случайных неоднородностей // В кн.: *Акустика океана*. Под ред. Л.М. Бреховских, М.: Наука, 1974. С. 573–581.
12. *Распространение звука во флуктуирующем океане* // Под ред. Флатте С., пер. с англ., М.: Мир, 1982. С. 147, 171.

Spatial Correlation of Sound Fields from Underwater Explosions in the Barents Sea

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

Results of an experimental study of the spatial correlation of signals from underwater explosions are presented for vertically and horizontally (across the path) separated reception points. The measurements were carried out on two propagation paths about 200 and 110 km long in the Barents Sea for frequencies below 500 Hz. The vertical correlation radius is found to increase with the distance to the source, which is primarily caused by the decrease in the sector of arrival angles of energy carrying signals. The transverse correlation radius weakly depends on the path length for frequencies below 300 Hz, while for higher frequencies, it decreases beginning from a distance of about 40 km, which can be attributed to the effect of short-period internal waves.