АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 44–51

УДК 534.23

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ГЛУБОКОМ ОКЕАНЕ ПРИ ПРИПОВЕРХНОСТНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА

**© 2002 г. О. П. Галкин, С. Д. Панкова**

*Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН*
*117036 Москва, ул. Шверника 4*
*E-mail: bvp@akin.ru*

Поступила в редакцию 28.12.2000 г.

Приведены данные экспериментов по изучению звукового поля, создаваемого в 1-й и 2-й зонах конвергенции ненаправленным источником псевдошумовых сигналов килогерцового диапазона частот, расположенным на глубине ~10 м. Измерения взаимной корреляции и временны́х спектров проводились между сигналами, принятыми с разных направлений в вертикальной плоскости как одной, так и двумя остронаправленными 40-метровыми антеннами, центры которых находились на разных горизонтах (200 и 450 м). Полученные результаты показывают, что для сигналов, приходящих по различным лучам, коэффициенты взаимной корреляции и флуктуации временны́х спектров практически одинаковы как при приеме на одном, так и на разных горизонтах.

Теоретические прогнозы структуры звуковых полей в различных точках океанического волновода, соответствующие реальным характеристикам полей, во многих случаях затруднительны, особенно в сложных акустико-океанических условиях. В связи с этим необходимо проведение надежных экспериментальных измерений и сопоставление полученных результатов с данными расчетов. В последние годы интерес многих исследователей к экспериментам в таких условиях заметно возрос [1–3]. В частности, проводятся натурные измерения вблизи каустик и на больших дистанциях от источника звука с применением вертикальных антенн с большой апертурой. Однако обычно при этом используются импульсные сигналы с частотой заполнения в несколько десятков или сотен герц. Создание для таких частот остронаправленных систем с малым уровнем бокового поля, которые необходимы для исследования тонкой структуры звукового поля (например, углового и временно́го спектра принимаемых сигналов) не только сложно, но и весьма проблематично. Отметим, что под угловым спектром подразумевается совокупность углов прихода сигнала в вертикальной плоскости, а под временны́м спектром – совокупность разностей времен прихода одного и того же сигнала по различным лучам.

В предыдущих работах авторов [4–7] исследовались взаимнокорреляционные и спектральные характеристики широкополосных псевдошумовых сигналов килогерцового диапазона частот, принятых остронаправленными вертикальными антеннами (ширина основного лепестка диаграммы направленности на средней частоте ~2°) в различных ситуациях. Например, изучалась тонкая структура звукового поля на больших дистанциях от источника в одной точке приема (в условиях многолучевости); в точках приема, разнесенных на несколько десятков километров вдоль трассы распространения звука; в областях каустик звукового поля и их окрестностях; в условиях значительных пространственно-временны́х изменений поля скорости звука, обусловленных течением Гольфстрим, и даже при приеме сигналов в точках, расположенных в различных океанах и зарегистрированных в разные годы.

В предлагаемой работе рассматривается изменчивость корреляционных характеристик и временны́х спектров сигналов, принимаемых на относительно большой глубине (200–450 м), при приповерхностном расположении ненаправленного источника звука – на глубине, близкой к 10 метрам. В таких ситуациях, даже в условиях подводного звукового канала, особое влияние на характеристики сигналов, в отличие от глубинного расположения излучающих систем, могут оказывать находящаяся вблизи взволнованная поверхность океана и изменения глубины излучающей системы из-за качки судна. Таким образом, в рассматриваемой ситуации корреляционные и спектральные характеристики принимаемых сигналов могут зависеть не только от рассеяния звука на случайных неоднородностях водной толщи, но еще и от рассеяния на взволнованной поверхности океана.

Оценить влияние неоднородностей показателя преломления водной толщи на флуктуации времени распространения сигналов $(\sigma_\tau)_1$ по чисто

водным лучам, т.е. не претерпевшим отражений от поверхности и дна, можно по формуле [8]:

$$(\sigma_\tau)_1 = \left(\frac{\pi^{1/2}}{2c^2}\langle\mu^2\rangle\bar{a}r\right)^{1/2},$$

где $\langle\mu^2\rangle$ – средний квадрат флуктуаций показателя преломления, $\bar{a}$ – средний размер случайных неоднородностей на акустической трассе, $c$ – скорость звука, $r$ – расстояние. Отметим, что это соотношение дает оценку сверху, поскольку при его выводе предполагалось, что неоднородности среды встречаются на всем пути распространения сигнала как в верхних, так и в глубинных слоях океана. Расчет по данной формуле, даже в предположении, что весь волновод заполнен крупными неоднородностями с размерами $\bar{a} = 115$ м и с максимальным значением $\langle\mu^2\rangle = 270 \times 10^{-10}$, дает для рассматриваемых в работе дистанций ~55–70 км величину $(\sigma_\tau)_1 < 0.3$ мс. Если же учесть, что размеры неоднородностей и средний квадрат флуктуаций показателя преломления изменяются с глубиной (в верхних слоях океана $\bar{a} = 1.5$–$1.9$ м, $\langle\mu^2\rangle = (16$–$22) \times 10^{-10}$; а в нижних – $\bar{a} = 110$–$115$ м, $\langle\mu^2\rangle = (100$–$270) \times 10^{-10}$ [9]) и, следовательно, на пути распространения сигналов встречаются (из-за вертикальной рефракции) разнообразные неоднородности, то можно считать, что эквивалентный размер случайных неоднородностей, заполняющих всю трассу, $\bar{a} \cong 40$ м, $\langle\mu^2\rangle = 50 \times 10^{-10}$ [10]. В этом случае получим $(\sigma_\tau)_1 < 0.07$ мс. Таким образом, неоднородности водной толщи на рассматриваемых дистанциях не должны приводить к заметным изменениям временны́х спектров и раскорреляции сигналов, принимаемых под различными углами в вертикальной плоскости.

Поскольку источник звука в экспериментах находился на небольшой глубине (~10 м), значительно большее влияние на взаимную корреляцию сигналов и на временно́е изменение временны́х спектров, по-видимому, может оказать взволнованная поверхность океана. Поэтому оценим возможные среднеквадратичные флуктуации времени распространения сигнала при отражении его от поверхности $(\sigma_\tau)_2$ по формуле для дисперсии [11]:

$$(\sigma_\tau)_2^2 = 4N\frac{\sin^2\alpha}{c_0^2}\left\{\sigma^2 + \frac{2\gamma^4}{r_\alpha^2}\times\right.$$

$$\left.\times\left[r_{2\alpha}^2 r_{3\alpha}^2 + \frac{N^2-1}{12}D_\alpha^2\left(r_\alpha^2 - 6r_{2\alpha}r_{3\alpha} + \frac{3N^2-7}{20}D_\alpha^2\right)\right]\right\},$$

где $N$ – количество отражений от верхней границы волновода, $\alpha$ – угол скольжения луча относительно ровной поверхности, $c_0$ – скорость звука у поверхности, $\sigma^2$ и $\gamma$ – дисперсия смещений поверхности и среднеквадратичный угол ее наклона, $D$ – длина цикла луча, $r$ – расстояние по лучу от источника до приемника при отсутствии волнения, $r_2 = r_h + (N-1)D/2$, $r_3 = r_z + (N-1)D/2$, $r_h$ и $r_z$ – горизонтальные проекции луча от точки отражения до источника и до приемника соответственно, а индекс $\alpha$ означает производную по углу $\alpha$.

При скорости ветра 6–7 м/с и волнении поверхности около 3 баллов (среднеквадратичное смещение поверхности $\sigma \cong 0.19$–$0.26$ м) среднеквадратичный угол наклона неровной поверхности $\gamma$, определенный из соотношений, имеющихся, например, в работе [12], будет равен примерно 0.6–0.7°. Расчеты $(\sigma_\tau)_2$ по приведенной выше формуле показали (см. в том числе [11]), что для дистанций 50–70 км среднеквадратичные флуктуации разности времен прихода сигналов по различным лучам не превышают 1–1.5 мс, даже при углах скольжения падающей звуковой волны (относительно гладкой поверхности) ~10°.

Изменение частотного спектра при отражении от взволнованной поверхности должно приводить к раскорреляции таких сигналов, распространяющихся разными путями. Однако ряд экспериментальных исследований [4, 6, 7] дает (при небольшом числе отражений) значения коэффициентов корреляции не ниже 0.4, а флуктуации временны́х спектров – не более 1.6 мс, даже при параметрах Рэлея, близких к единице. При приповерхностном источнике звука эта раскорреляция, вероятно, должна быть больше, так как в большей степени будет сказываться изменение глубины источника из-за качки излучающего судна.

Описываемый эксперимент проводился в глубоководном районе Атлантического океана (глубина места $H = 5180$ м) в марте 1980 года на научно-исследовательских судах "Петр Лебедев" и "Сергей Вавилов"[1]. Излучающее судно удерживалось на месте за счет электродвижения, а приемное – свободно дрейфовало. Вследствие этого расстояние между судами при работе в 1-й зоне конвергенции непрерывно изменялось от 58 км до 66 км, а во 2-й – от 119 км до 126 км.

Гидрологические условия характеризовались профилем скорости звука $c(z)$, представленным на рис. 1а, погодные – скоростью ветра 5–6 м/с при небольшой зыби и волнением поверхности океана 2–3 балла (среднеквадратичная высота волн ~0.1–0.19 м). Непрерывный псевдошумовой сигнал в диапазоне частот 0.8–1.3 кГц излучался на глубине ~10 метров. Прием осуществлялся с помощью двух 40-метровых вертикальных антенн, центры которых находились на глубине 200 и 450 м. Каждая из антенн, состоящая из 296 гидрофонов, объединенных в 74 неэквидистантно

[1] Уникальный комплекс излучающих и приемных систем был разработан в ЦНИИ "Морфизприбор" под руководством А.М. Дымшица.

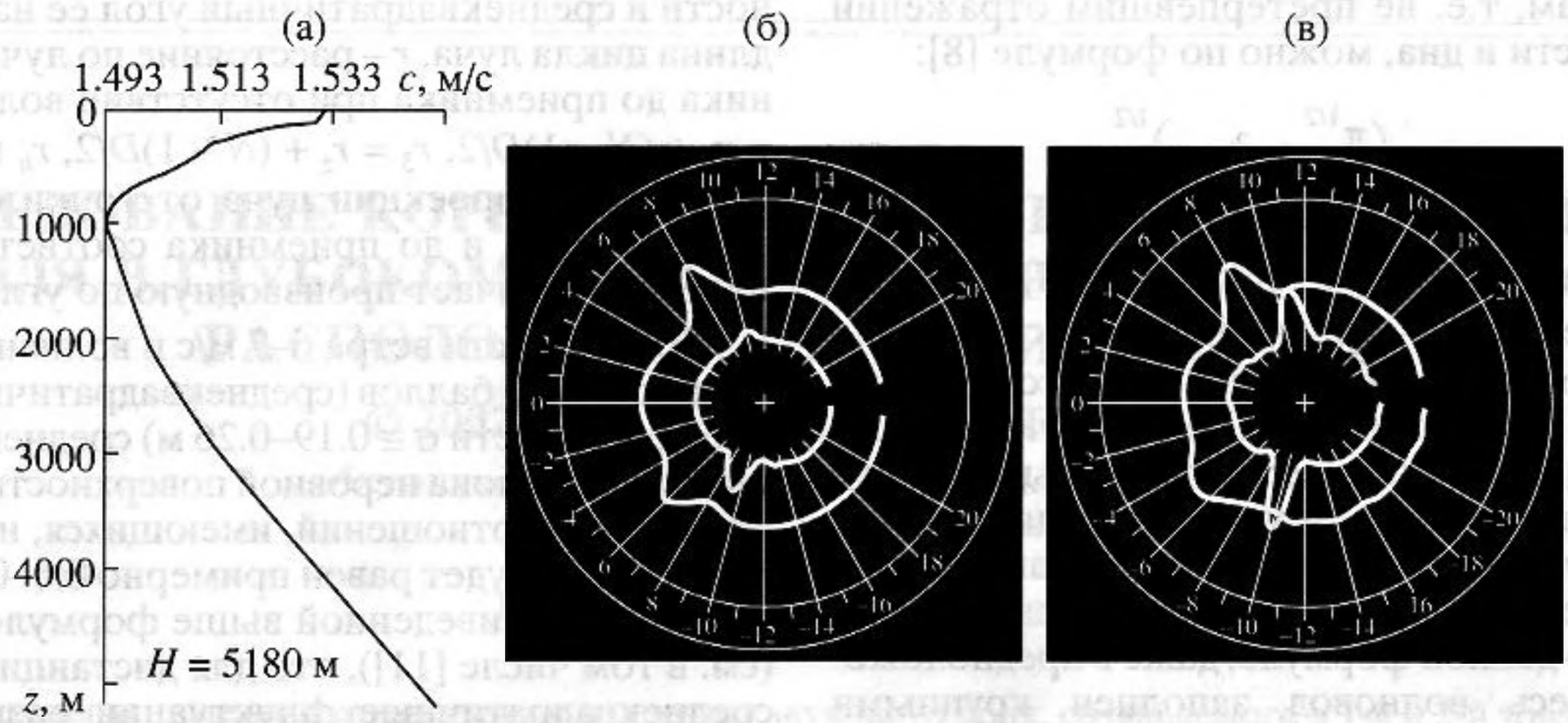


**Рис. 1.** Профиль скорости звука $c(z)$ – слева (а) и угловые спектры поля – справа (б – в середине 1-й зоны конвергенции; в – в середине 2-й зоны).

расположенных центра, имела внешний диаметр 5 см. Сигналы для взаимнокорреляционной обработки одновременно принимались двумя диаграммами направленности, сформированными либо одной, либо двумя антеннами. Крен антенн с концевым грузом ~700 кГ (отклонение от вертикали) контролировался специальными кренометрами или оценивался по разности углов прихода сигналов, один из которых отражался от дна, а другой – от дна и поверхности. Во время проведения опытов он не превышал ±1°. Разрешение сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости на средней частоте используемого диапазона составляло ~2°, разрешение по времени прихода – 2 мс.

Как известно, для приповерхностного расположения источника звука (при прочих равных условиях) характерны более узкие зоны конвергенции. Однако при работе в этих зонах на указанные выше горизонты приема сигналы могут приходить как снизу (по лучам с отрицательными углами прихода), так и сверху (по лучам с положительными углами прихода).

На рис. 1б и 1в приведены угловые спектры сигналов, принятых на разных горизонтах, в середине 1-й и 2-й зон конвергенции. Фотографии, показывающие отклик антенн на приходящие сигналы, сделаны с индикатора секторного обзора в режиме сканирования диаграммами направленности в диапазоне углов ±20°С, "растянутом" на экране примерно до 310°С. Внешняя развертка относится к глубине приема 200 м, внутренняя – к глубине 450 м. На обоих горизонтах приема наблюдаются сигналы как с положительными, так и с отрицательными углами прихода $\alpha$. В середине 1-й зоны сигналы приходили под углами $\alpha_1 = +8°$ и $\alpha_2 = -6°$ для $z = 200$ м и $\alpha_1 = +10°$ и $\alpha_2 = -9°$ для $z = 450$ м, а в середине 2-ой зоны – с $\alpha_1 = +8°$ и $\alpha_2 = -5°$ для $z = 200$ м и $\alpha_1 = +11°$ и $\alpha_2 = -10°$ для $z = 450$ м. Следует отметить, что по отклику на индикаторе, т.е. по зависимости амплитуды от угла в вертикальной плоскости, можно судить не только о направлении прихода сигналов, но по его ширине – и о количестве принимаемых сигналов с данного направления. Если ширина отклика не превышает ~2°, т.е. соответствует раствору главного лепестка диаграммы направленности, то естественно считать приходящий сигнал однолучевым. В противном случае есть основание предполагать, что с этого направления в точку приема приходят несколько сигналов по лучам с близкими углами, не разделяемыми антенной.

При обработке определялись коэффициенты взаимной корреляции $|R|$ между сигналами, одновременно принятыми диаграммами направленности одной или двух антенн, наведенными на разные углы в вертикальной плоскости. Текущие значения $|R|$ вычислялись при времени усреднения 1.024 с с интервалом 12–20 секунд. Измерения проводились для сигналов с различными парами углов прихода: $\alpha_1, \alpha_2 > 0$ (оба приходили сверху), $\alpha_1, \alpha_2 < 0$ (оба – снизу) и $\alpha_1 > 0, \alpha_2 < 0$ (один сверху, другой – снизу). По результатам измерений строились временные спектры, т.е. совокупности разностей времен прихода сигналов в течение интервала наблюдения. Для каждой 2–3 минутной записи сигналов было сделано от 6 до 14 измерений. И хотя длительность каждой отдельной записи была невелика, за это время изменялось не только расстояние между излучающим и приемным судном и глубина излучателя с периодом качки несущего судна, близким к 10 с, но и структура поля, изменения которой можно увидеть, в частности, на рис. 2. На этом рисунке для примера приведено несколько записей для сигналов, зарегистрированных при разногоризонтном приеме, т.е. с помощью двух антенн, находящихся на различных

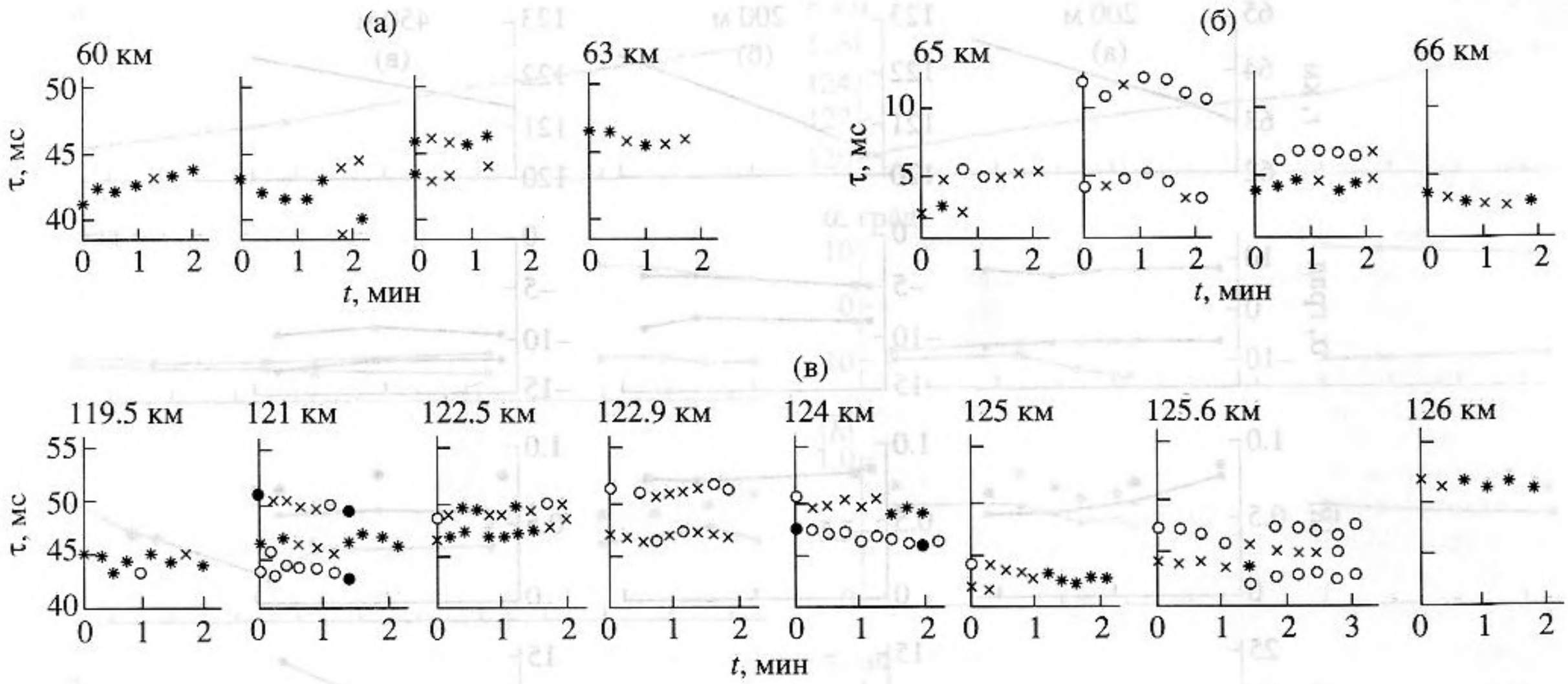


**Рис. 2.** Временны́е спектры сигналов при разногоризонтном приеме ($\alpha_1$ для $z = 200$ м и $\alpha_2$ для $z = 450$ м).
а – 1-я зона конвергенции, углы прихода $\alpha_1 \cong -6°$, $\alpha_2 \cong -10°$;
б – 1-я зона конвергенции, $\alpha_1 \cong +8°$, $\alpha_2 \cong +11°$;
в – 2-я зона конвергенции, $\alpha_1 \cong -5°$, $\alpha_2 \cong -10°$.

глубинах (200 и 450 м). По оси абсцисс отложено время наблюдения $t$, по оси ординат – разность времен прихода $\tau$ между сигналами с углами прихода $\alpha_1$ и $\alpha_2$, на которые настраивались главные лепестки диаграмм направленности антенн. Вверху графиков указаны дистанции между точками излучения и приема. На рис. 2а и 2б изображены временны́е спектры сигналов, принятых в 1-й зоне конвергенции на дистанциях от 60 до 66 км, на рис. 2в – принятых во 2-й зоне на дистанциях 119.5–126 км. Различные значки на рис. 2 указывают на величину коэффициентов взаимной корреляции принятых сигналов $|R|$ (* – $0.8 \le |R| \le 1.0$; × – $0.6 \le |R| < 0.8$; ○ – $0.4 \le |R| < 0.6$; ● – $0.2 \le |R| < 0.4$). Несмотря на весьма узкую ширину главного лепестка диаграммы направленности каждой из антенн ($\Delta\alpha_{0.7} \cong 2°$), в ряде случаев в него попадали сигналы, пришедшие по различным лучам с близкими углами скольжения. Неразрешенные по углу, но разрешенные по времени прихода сигналы дают несколько корреляционных пиков и, соответственно, несколько составляющих во временны́х спектрах.

Средние значения задержек $\tau$ в первой половине 1-й зоны конвергенции (рис. 2а) при увеличении дистанции на 3 км возросли с ~42 мс до ~46 мс, а значения коэффициентов взаимной корреляции сигналов изменились от $|\bar{R}_{\max}| = 0.81$ на дистанции $r \sim 60$ км до $|\bar{R}_{\max}| = 0.70$ при $r \sim 63$ км. Во второй половине 1-й зоны конвергенции (рис. 2б) в большинстве случаев в одну из диаграмм направленности попадал не один, а два сигнала, что приводило к появлению во временны́х спектрах двух ветвей $\tau$. Для составляющей временно́го спектра с наибольшими коэффициентами корреляции средние значения $\tau$ менялись незначительно (от ~5 до ~3 мс), а максимальный коэффициент корреляции $|\bar{R}_{\max}|$ изменялся от 0.64 ($r \sim 65$ км) до 0.76 ($r \sim 66$ км).

Во 2-й зоне конвергенции на дистанциях от 119.5 до 126 км практически в каждую из диаграмм направленности приемных систем приходило несколько сигналов. Поэтому в большинстве случаев во временны́х спектрах одновременно наблюдалось несколько значений задержек (рис. 2в). Временны́е задержки $\tau$ между сигналами, дающими максимальные величины коэффициентов взаимной корреляции $|R_{\max}|$, менялись от ~44 мс до ~52 мс. Величины максимальных коэффициентов корреляции $|R_{\max}|$ колебались от 0.59 до 0.83.

В тех случаях, когда в основной лепесток диаграммы направленности попадало более одного сигнала, при определении коэффициента взаимной корреляции принятых сигналов получалось, естественно, не одно, а несколько значений $|R|$. При этом сигналы, приходящие по различным лучам, являясь "сигнальной" помехой друг для друга, снижали коэффициент корреляции $|R|$ для каждого отдельного сигнала. Причем, если разность времен прихода сигналов превышала 2 мс, то такая "сигнальная помеха" являлась аддитивной помехой. В этом случае для учета мешающего действия разрешенных по времени сигналов, попадающих в диаграмму направленности по

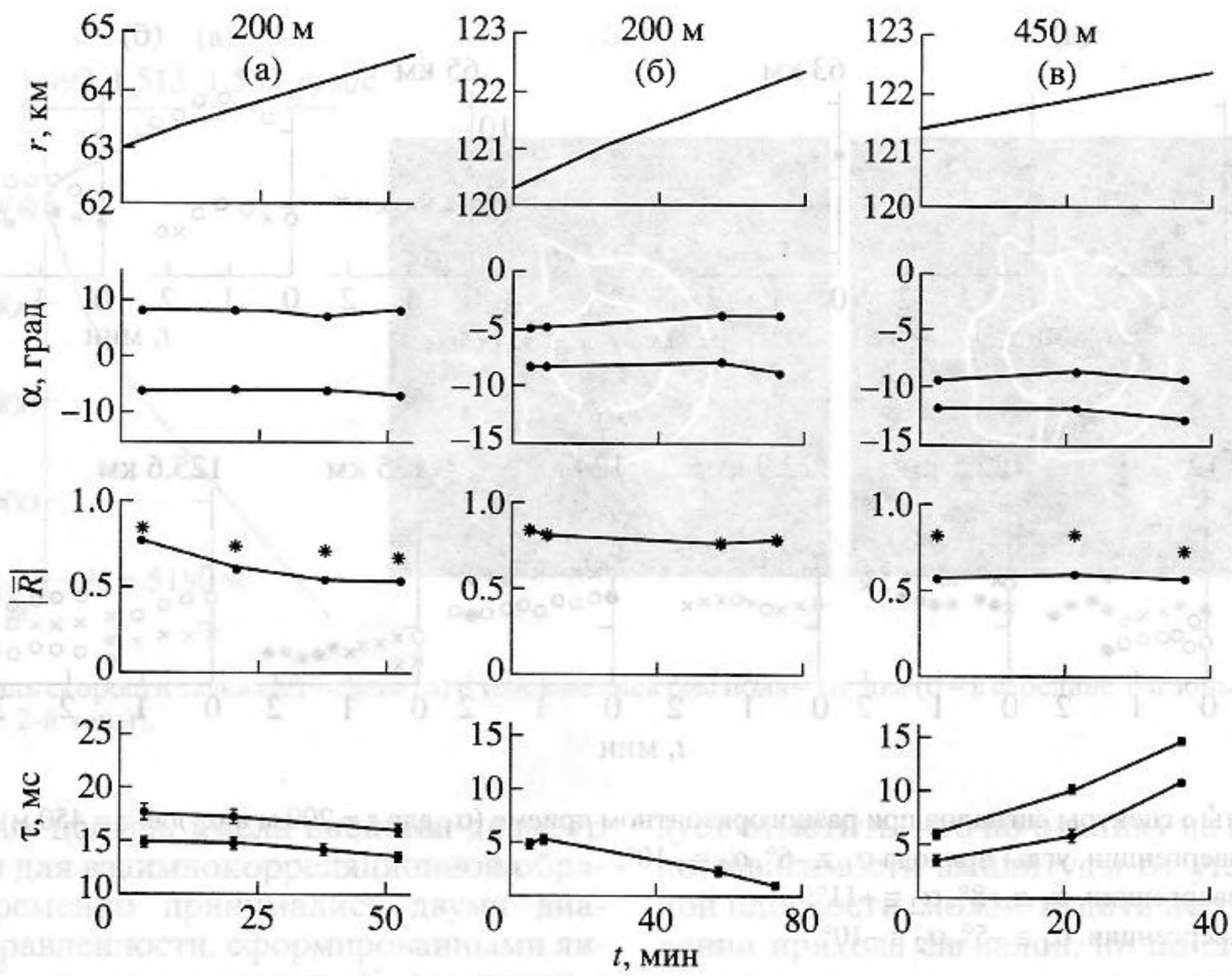


**Рис. 3.** Сверху вниз – изменения дистанции $r$, углов прихода $\alpha$, средних значений коэффициентов корреляции $|\bar{R}|$ и разностей времен прихода сигналов $\tau$ при одногоризонтном приеме.
а – 1-я зона конвергенции, глубина приема 200 м;
б – 2-я зона конвергенции, глубина приема 200 м;
в – 2-я зона конвергенции, глубина приема 450 м.

каждому ($i$-му) лучу, вычислялся скорректированный коэффициент корреляции в предположении равенства уровней приходящих сигналов по формуле: $|R_\Sigma| = \sqrt{\sum_i |R_i|^2}$. В приведенных записях его средние значения $|\bar{R}_\Sigma|$ колеблются от 0.68 до 0.88 в 1-й зоне и от 0.66 до 0.92 во 2-й зоне конвергенции.

На следующих трех рисунках (рис. 3, 4, 5) сверху вниз приведены сведения, необходимые для получения представления о положении точек приема на трассе распространения сигналов (изменение дистанции $r$ за время опыта), об углах наведения диаграмм направленности в вертикальной плоскости (углы $\alpha$, на которые наводились диаграммы направленности антенн), коэффициенты корреляции $|\bar{R}|$ для одной из составляющих временны́х спектров с максимальным значением ($|R_{max}|$), а также средние значения скорректированных коэффициентов корреляции $|\bar{R}_\Sigma|$, обозначенные звездочкой (*) и, наконец, разности времен прихода сигналов $\tau$ по всем лучам, попадающим в диаграмму направленности. По оси абсцисс отложено время наблюдения $t$ в минутах. Флуктуации разностей времен $\pm\sigma_\tau$, т.е. среднеквадратичное отклонение от среднего значения $\tau$, изображены вертикальными отрезками на графиках $\tau(t)$.

Рисунок 3 относится к одногоризонтному приему сигналов, т.е. к одновременному приему сигналов двумя диаграммами направленности одной и той же антенны. Сверху над каждым столбцом указаны глубины расположения приемной антенны. На рис. 3а приведены результаты измерений указанных выше характеристик в 1-й зоне конвергенции при глубине центра приемной антенны, равной 200 метрам. Корреляционные и временны́е характеристики измерялись между сигналами, принятыми под углами $\alpha$, равными ~+8° и ~–6°. Как видно из графика $\tau(t)$, во временно́м спектре существуют две составляющие (~15 мс и ~18 мс), что указывает на прием одной из диаграмм направленности одновременно двух сигналов, углы прихода которых близки и которые по этой причине не удалось разрешить. В начале 2-й зоны конвергенции на той же глубине 200 м (рис. 3б) в каждую из диаграмм направленности, повернутую на угол $\alpha$, близкий к –5° и –8°, приходило по одному сигналу. Поэтому во временно́м спектре $\tau(t)$ имеется только одна составляющая, а при измерении коэффициента корреляции на-

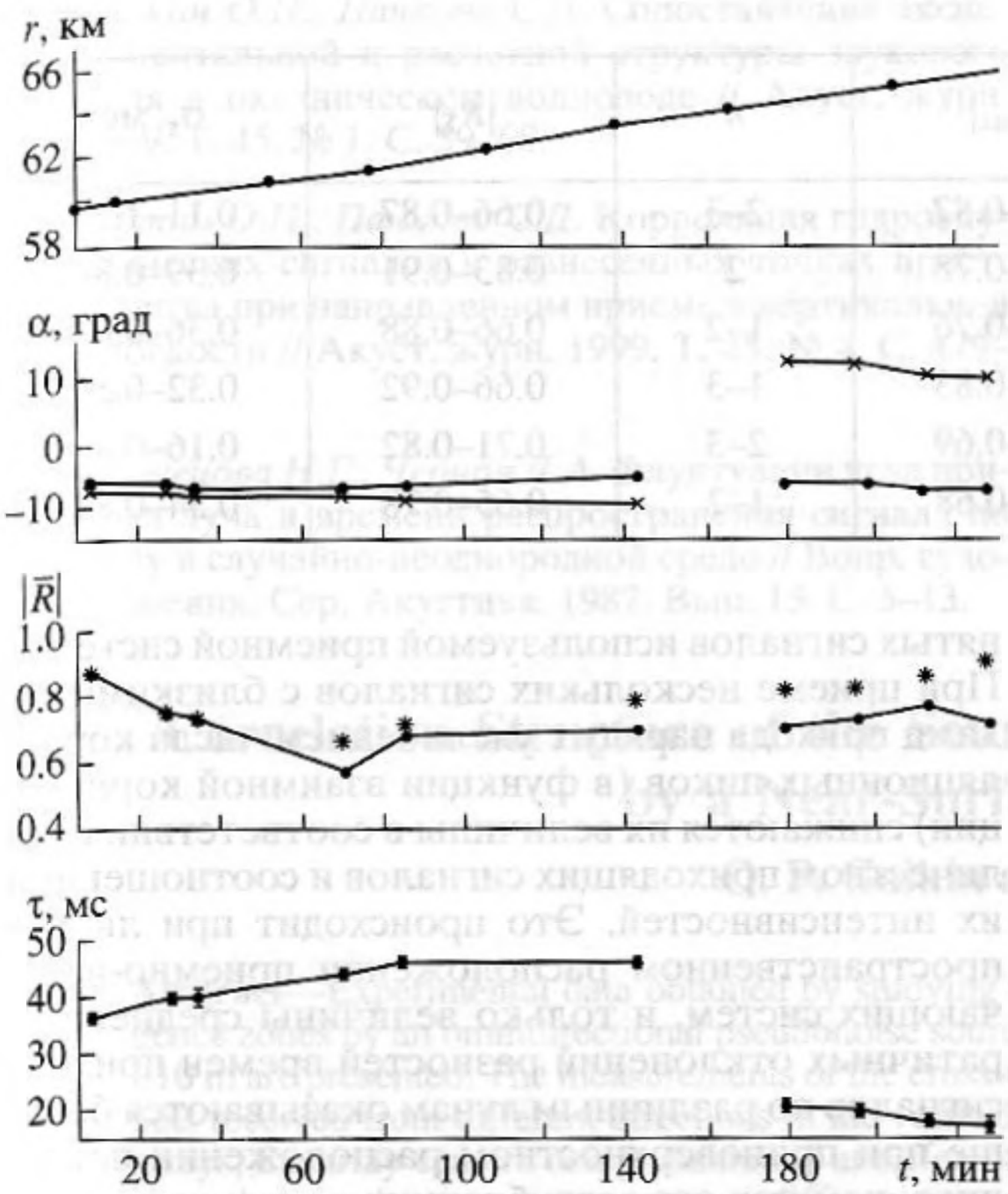


**Рис. 4.** Сверху вниз – изменения дистанции $r$, углов прихода $\alpha$, средних значений коэффициентов корреляции $|\bar{R}|$ и разностей времен прихода сигналов $\tau$ при разногоризонтном приеме в 1-й зоне конвергенции (● – глубина приема 200 м; × – глубина приема 450 м).

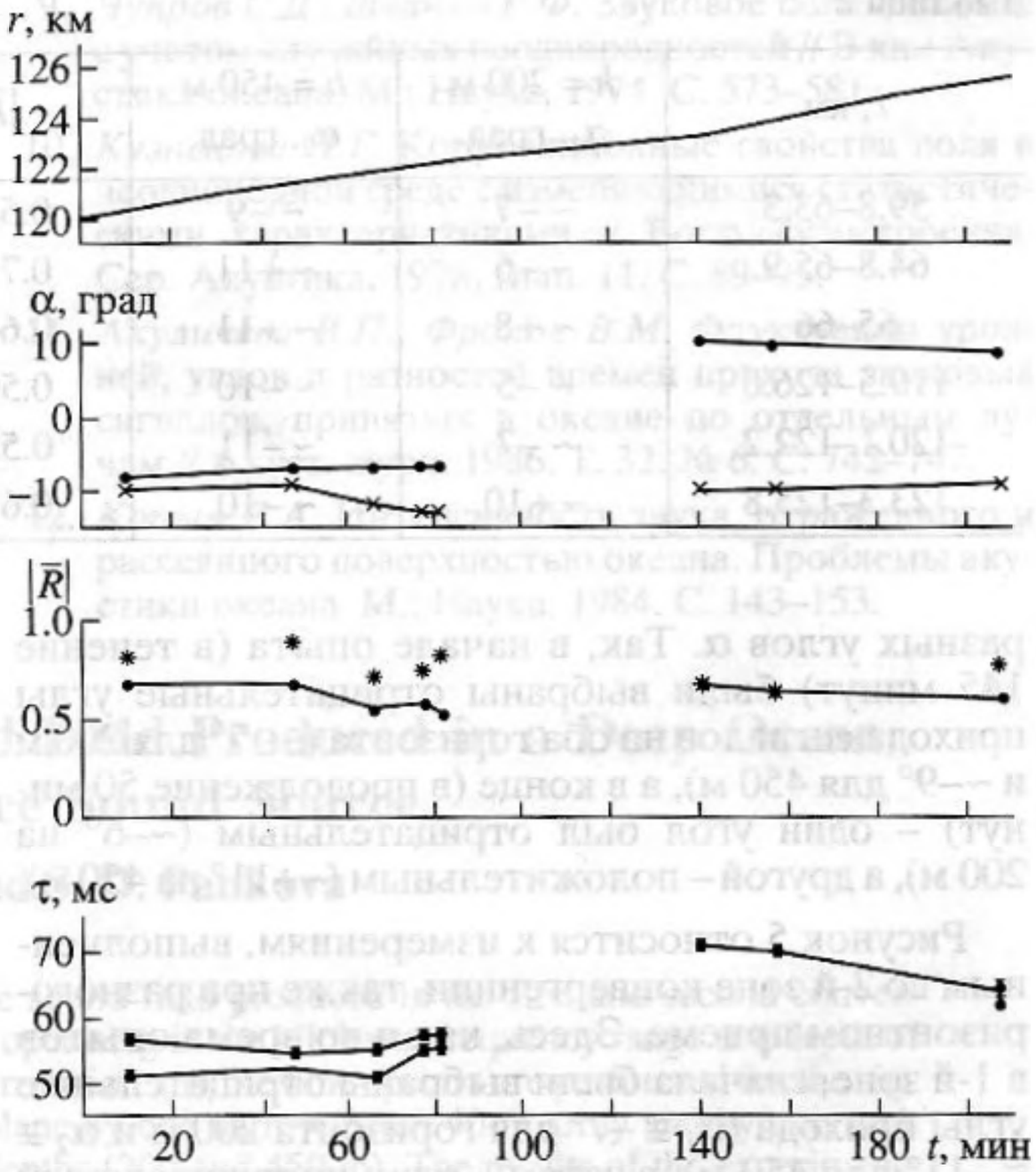


**Рис. 5.** Сверху вниз – изменения дистанции $r$, углов прихода $\alpha$, средних значений коэффициентов корреляции $|\bar{R}|$ и разностей времен прихода сигналов $\tau$ при разногоризонтном приеме во 2-й зоне конвергенции (● – глубина приема 200 м; × – глубина приема 450 м).

блюдался один корреляционный пик. В этом случае, естественно, $|\bar{R}_{max}| \equiv |\bar{R}_{\Sigma}|$. На глубине приема 450 м (рис. 3в) для сигналов с углами прихода ~–12°и ~–9° во временны́х спектрах $\tau(t)$ регистрировались две составляющие и, соответственно, в функциях корреляции – два корреляционных пика. Наблюдающиеся же на рис. 3а–3в плавные изменения средних значений разностей времен $\tau$ в течение интервала наблюдения $t$ (40–80 минут) в основном связаны с изменением дистанции между корреспондирующими точками.

Различные данные, характеризующие условия проведения опытов (дистанция $r$, глубина расположения центра вертикальной антенны $h$, углы наведения главного максимума диаграмм направленности $\alpha_1$ и $\alpha_2$) и результаты, полученные при одногоризонтном приеме (среднее значение максимальных величин коэффициентов взаимной корреляции $|\bar{R}_{max}|$, число корреляционных пиков $n$, скорректированный коэффициент взаимной корреляции $|\bar{R}_{\Sigma}|$ и среднеквадратичное отклонение разностей времен прихода $\sigma_\tau$) приведены в табл. 1.

Рассмотрим результаты, полученные при разногоризонтном приеме, т.е. при приеме сигналов двумя антеннами, расположенными на разных горизонтах. На рис. 4 представлены графики для сигналов, принятых в 1-й зоне конвергенции. Центр одной антенны находился на глубине 200 м, а другой – на 450 м. Углы прихода сигналов $\alpha$ на горизонт 200 м отмечены точками, а на горизонт 450 м – крестиками. Измерения различных характеристик принимаемых сигналов проводились для

**Таблица 1**

| $r$, км | $h$, м | $\alpha_1$, град. | $\alpha_2$, град. | $\lvert\bar{R}_{max}\rvert$ | $n$ | $\lvert\bar{R}_{\Sigma}\rvert$ | $\sigma_\tau$, мс |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 63.0–64.6 | 200 | ~+8 | ~–6 | 0.53–0.77 | 2 | 0.67–0.85 | 0.40–0.73 |
| 120.3–122.3 | 200 | ~–5 | ~–8 | 0.76–0.83 | 1 | 0.76–0.83 | 0.25–0.39 |
| 121.4–122.3 | 450 | ~–12 | ~–9 | 0.56–0.59 | 2 | 0.71–0.82 | 0.27–0.52 |

**Таблица 2**

| $r$, км | $h = 200$ м $\alpha_1$, град. | $h = 450$ м $\alpha_2$, град. | $\lvert\bar{R}_{max}\rvert$ | $n$ | $\lvert\bar{R}_{\Sigma}\rvert$ | $\sigma_\tau$, мс |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 59.8–63.3 | ~ –7 | ~ –9 | 0.58–0.87 | 2–3 | 0.66–0.87 | 0.11–1.25 |
| 64.8–65.9 | ~ –6 | ~ +11 | 0.71–0.78 | 2 | 0.83–0.91 | 0.39–0.88 |
| 65–66 | ~ +8 | ~ +11 | 0.64–0.76 | 1–2 | 0.66–0.88 | 0.36–0.67 |
| 119.5–126.0 | ~ –5 | ~ –10 | 0.59–0.83 | 1–3 | 0.66–0.92 | 0.32–0.53 |
| 120.1–122.2 | ~ –7 | ~ –11 | 0.55–0.69 | 2–3 | 0.71–0.82 | 0.16–0.48 |
| 123.3–125.8 | ~ +10 | ~ –10 | 0.61–0.68 | 1–2 | 0.65–0.78 | 0.34–0.88 |

разных углов $\alpha$. Так, в начале опыта (в течение 145 минут) были выбраны отрицательные углы прихода сигналов на оба горизонта (~–7° для 200 м и ~–9° для 450 м), а в конце (в продолжение 50 минут) – один угол был отрицательным (~–6° на 200 м), а другой – положительным (~+11° на 450 м).

Рисунок 5 относится к измерениям, выполненным во 2-й зоне конвергенции, также при разногоризонтном приеме. Здесь, как и во время опытов в 1-й зоне, сначала были выбраны отрицательные углы прихода ($\alpha_1 \cong -7°$ для горизонта 200 м и $\alpha_2 \cong -11°$ для 450 м), а затем – один положительный ($\alpha_1 \cong +10°$ для 200 м), а другой – отрицательный ($\alpha_2 \cong -10°$ для 450 м).

Данные, характеризующие условия проведения опытов и результаты, полученные при разногоризонтном приеме, приведены в табл. 2.

Таким образом, исследования корреляционных характеристик непрерывных широкополосных (в полосе 500 Гц) сигналов, принятых на дистанциях до 130 км, при расположении источника звука вблизи поверхности показали, что максимальные коэффициенты корреляции лежат в пределах от 0.53 до 0.87 (скорректированные – соответственно от 0.60 до 0.91). Такие значения $\lvert\bar{R}_{max}\rvert$ и $\lvert\bar{R}_{\Sigma}\rvert$ характерны и для заглубленного расположения излучателя (см., например, [4, 5]). Что же касается флуктуаций разностей времен прихода сигналов $\sigma_\tau$ от приповерхностного источника, то они в ряде случаев, как это вытекает и из приведенных выше теоретических оценок, оказываются выше (до 1.25 мс), чем для сигналов, распространяющихся чисто водным путем, которые не испытывают влияния поверхности океана и не связаны с изменением глубины излучателя при качке излучающего судна (до 0.3–0.5 мс).

В заключение отметим, что при остронаправленном в вертикальной плоскости приеме (~2°) как на одном горизонте (200 или 450 м), так и при одновременном приеме сигналов на разных глубинах (200 м и 450 м) величины коэффициентов взаимной корреляции сигналов, в основном определяются не приповерхностным расположением источника (~10 м), а угловым разрешением принятых сигналов используемой приемной системы. При приеме нескольких сигналов с близкими углами прихода наряду с увеличением числа корреляционных пиков (в функции взаимной корреляции) снижаются их величины в соответствии с количеством приходящих сигналов и соотношением их интенсивностей. Это происходит при любом пространственном расположении приемно-излучающих систем, и только величины среднеквадратичных отклонений разностей времен прихода сигналов по различным лучам оказываются больше при приповерхностном расположении источника, чем при его заглублении.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Worcester P.F., Cornuelle B.D., Dzieciuch M.A., Munk W.H., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C., Colosi J.A., Mertzger K., Birdsall T.G., Baggeroer A.B.* A test of basinscale 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.

2. *Colosi J.A., Scheer E.K., Flatte S.M., Cornuelle B.D., Dzieciuch M.A., Munk W.H., Worcester P.F., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C., Mertzger K., Birdsall T.G., Baggeroer A.B.* Comparisons of measured and predicted fluctuations for a 3250-km propagation experiment in the eastern North Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 6. P. 3202–3218.

3. *Simmen J.A., Flatte S.M., De-Ferrari H.A., Nguyen H., Williams N.J.* Nearcaustic behavior in a 270-km acoustical experiment // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 6. P. 3231–3244.

4. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Экспериментальные исследования временнóй и корреляционной структуры звуковых полей в глубоком океане // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 216–222.

5. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Временны́е спектры и корреляционная структура звуковых полей на больших дистанциях в глубоком океане // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 1. С. 57–63.

6. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Сопоставление экспериментальной и расчетной структуры звукового поля в океаническом волноводе // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 1. С. 59–68.

7. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Корреляция гидроакустических сигналов в разнесенных точках пространства при направленном приеме в вертикальной плоскости // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 479–486.

8. *Кузнецова Н.Г., Чернов Л.А.* Флуктуации угла прихода луча и времени распространения сигнала по лучу в случайно-неоднородной среде // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1982. Вып. 15. С. 5–13.

9. *Чупров С.Д., Швачко Р.Ф.* Звуковое поле в океане с учетом случайных неоднородностей // В кн.: Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 573–581.

10. *Кузнецова Н.Г.* Корреляционные свойства поля в неоднородной среде с изменяющимися статистическими характеристиками // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1978. Вып. 11. С. 89–95.

11. *Акуличева В.П., Фролов В.М.* Флуктуации уровней, углов и разностей времен прихода звуковых сигналов, принятых в океане по отдельным лучам // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 6. С. 742–747.

12. *Копыл Е.А.* Интенсивность звука, отраженного и рассеянного поверхностью океана. Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 143–153.

# Correlation Structure of the Sound Field Produced in a Deep Ocean by a Near-Surface Sound Source

**O. P. Galkin and S. D. Pankova**

**Abstract**—Experimental data obtained by studying the sound field produced in the first and second convergence zones by an omnidirectional pseudonoise source operating in the kilohertz frequency range at a depth of ~10 m are presented. The measurements of the cross-correlation and the time spectra are performed for the signals received from different directions in the vertical plane by one narrow-beam 40-m array and by two such arrays, the array centers being positioned at different depths (200 and 450 m). The results of the experiments show that, for the signals arriving over different ray paths, the cross-correlation coefficients and the fluctuations of the time spectra obtained by using the reception at one depth and at two different depths are practically identical.