

УДК 534.29

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ДВУХКАНАЛЬНОМ ОКЕАНИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

© 2001 г. О. П. Галкин, Л. В. Швачко

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 20.06.2000 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований энергетической и угловой структуры звукового поля в районе Иберийской котловины в северо-восточной части Атлантического океана. Опыты проводились в двухканальном волноводе, оси которого были расположены на глубинах ~450 и ~2000 метров. При излучении использовался непрерывный псевдощумовой сигнал в диапазоне частот 2.5–4.0 кГц. Принимались сигналы на ненаправленные гидрофоны и одновременно на протяженную 10-метровую вертикальную антенну, позволявшую осуществлять остроуправленный (~2.5°) прием в вертикальной плоскости. Корреспондирующие точки находились в 500-метровом слое океана в пределах верхнего звукового канала. Характеристики поля измерялись при непрерывном изменении дистанции в диапазоне расстояний от 1 до 65 км. Сопоставление экспериментально полученных данных с результатами расчетов показало, что структура поля, формируемая нижним каналом значительно ближе к расчетной, чем структура поля, обусловленная верхним каналом. В пределах верхнего звукового канала зона тени проявлялась слабо, а первая зона конвергенции оказалась примерно на 7–11 км ближе к источнику, чем следовало из расчетов. При этом угловая структура звукового поля была достаточно четко сформирована в вертикальной плоскости и не носила случайного характера, свойственного полям, рассеянным на неоднородностях.

Одной из основных задач при исследовании звуковых полей в океане является выяснение соответствия данных эксперимента принятой расчетной модели [1–3]. Решение этого вопроса необходимо не только для разработки адекватной модели волновода и повышения надежности гидроакустического прогноза, но и для успешного решения томографических задач. Проведенные многолетние исследования в различных районах Мирового океана показали, что даже в стабильных условиях одноосевого подводного звукового канала тропического типа, когда имеется согласие основных экспериментальных и расчетных закономерностей, существуют заметные различия в тонкой структуре поля. В первую очередь это относится к пространственному положению зон конвергенции и зон тени, и особенно к угловой и временной структуре звукового поля [4–8].

Намного сложнее обстоит дело в условиях двухосевого подводного звукового канала, который встречается в целом ряде районов Мирового океана. Например, в Атлантическом океане он наблюдается в районе Бермудских островов у восточного побережья Северной Америки, в южной части Норвежского моря, в Иберийской котловине вблизи берегов Португалии и в некоторых других местах океана. В первых двух районах двухканальная система с осью верхнего канала примерно на 200–250 м образует благодаря появлению дополнительного максимума в профиле скорости

звука $C(z)$ на глубине ~400–450 м за счет наклонного фронта теплого течения Гольфстрим. В районе же Иберийской котловины верхний минимум $C(z)$, находящийся на глубине ~450–500 м, обусловлен теплыми и более солеными средиземноморскими водами, проникающими в Атлантику через Гибралтарский пролив, и приводящими к появлению на глубине ~1200 м глубоководного максимума скорости звука. Проведенные в различные годы экспериментальные исследования структуры звукового поля в указанных районах показали, что степень соответствия опытных данных и результатов расчетов характеристик поля была значительна хуже, чем в условиях одноосевого подводного звукового канала тропического типа [1, 2, 7]. Отметим, что расчеты проводились на базе лучевых представлений, поскольку основной массив экспериментальных данных по угловой, временной, энергетической и корреляционной структуре звукового поля был получен для сигналов в диапазоне частот 1–5 кГц. Такой подход вполне оправдан, так как даже для максимальных относительных градиентов скорости звука

$\left(a = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial z}\right)$, встречающихся в открытом океане, и

указанных частот (f) выполняются условия приме-

нимости лучевой теории $\left(\frac{Ca}{2\pi f} \ll 1\right)$, а соответ-

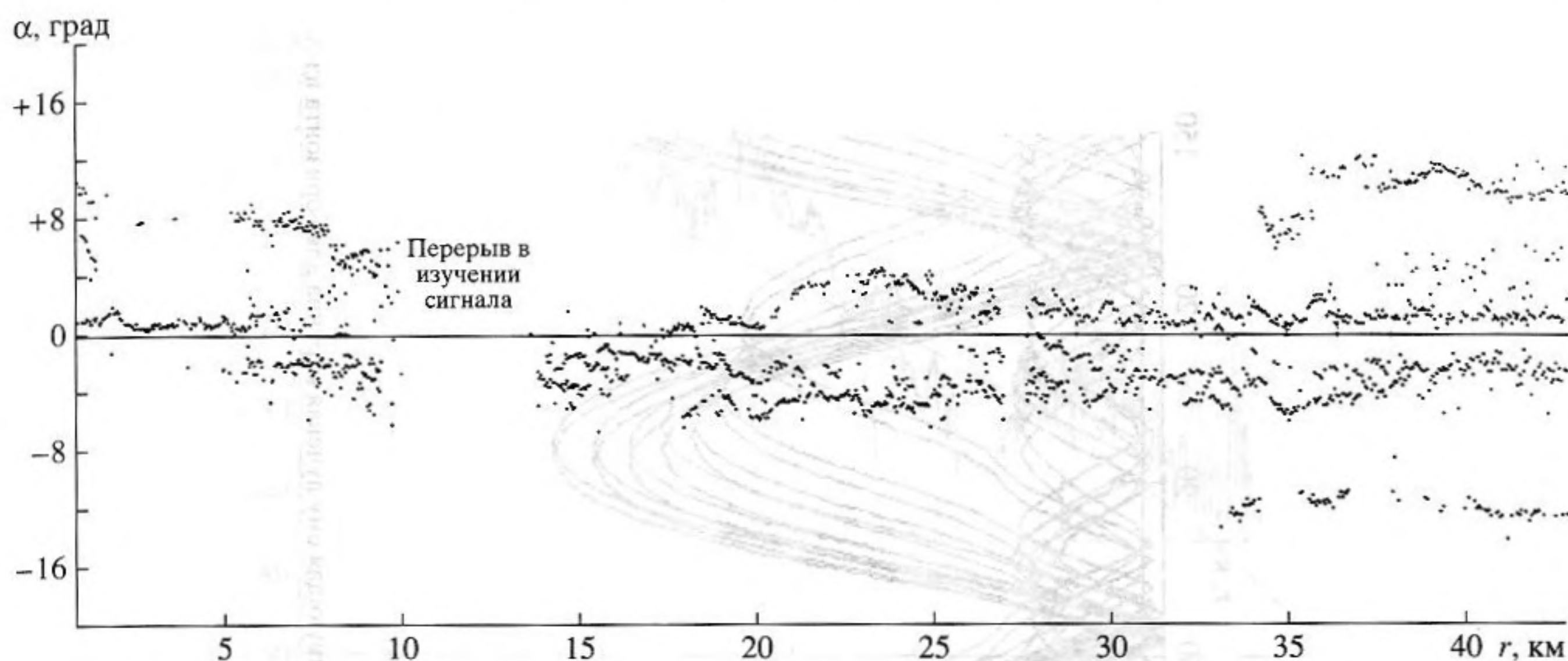


Рис. 1. Зависимость углов прихода сигналов α от расстояния r .

“+ α ” — соответствует сигналам, принимаемым сверху;

“- α ” — соответствует сигналам, принимаемым снизу.

вие лучевых и волновых расчетов для таких ситуаций неоднократно проверялось (см., например, [3]). Кроме того лучевые расчеты позволяют без затруднений получить все указанные выше элементы структуры поля. Использование других подходов для решения волнового уравнения делают задачу, в частности задачу определения углового спектра приходящих сигналов, практически неразрешимой, особенно если учесть более чем двухоктавную полосу частот используемых сигналов.

Рассмотрим результаты исследований энергетической структуры и углового спектра звукового поля, полученные в условиях двухосевого канала в Иберийской котловине Атлантического океана. Отметим, что под угловым спектром понимается зависимость интенсивности принимаемых сигналов от угла скольжения в вертикальной плоскости. Опыты проводились в 1989 и 1991 годах. Результаты исследований 1989 года показали, что структура поля, образованная сигналами, распространяющимися по нижнему каналу (с осью на глубине ~ 2000 м), неплохо соответствует расчетной модели. Структура же поля в верхнем канале, ось которого была расположена на глубине ~ 500 м, существенно отличается от расчета. В соответствии с теоретическими представлениями первая зона конвергенции, образованная лучами верхнего канала, при расположении корреспондирующих точек (излучателя и приемников звука) на глубинах от 180 до 200 м должна была начинаться на дистанциях 28–30 км, а ближе нее (от 28 до 7 км) должна была находиться геометрическая зона тени. На рис. 1 приведена экспериментально полученная угловая структура звукового поля, т.е. зависимость угло-

вого спектра от расстояния $\alpha(r)$, из которой видно, что сигналы с углами прихода $\alpha \cong \pm 5^\circ$, распространяющиеся по верхнему каналу, зафиксированы практически во всем диапазоне расстояний r , представленных на графике.

Результаты опыта 1989 года явились основанием для подробных исследований особенностей распространения звука в двухосевом канале в том же районе в декабре 1991 года во время экспедиции на научно-исследовательских судах Акустического института “Академик Николай Андреев” и “Академик Борис Константинов”. Трасса распространения сигналов располагалась между подводными горами Ампер и Жозефин при глубине места ~ 4800 м. Изменчивость профилей скорости звука $C(z)$ до глубины 2300 м, измеренных в течение 1.5 суток в районе проведения опытов, приведена на рис. 2а. Профиль скорости звука $C(z)$, при котором проводились исследования структуры звукового поля, и соответствующая ему лучевая картина для горизонта излучения 180 м представлены на рис. 2б. Видно, что ось верхнего канала располагалась на глубине 450–500 м, а нижнего — на глубине ~ 2000 м. Как следует из лучевой картины, при выбранной глубине источника звуковое поле на глубинах приема от 100 до 1200 м определяется двумя группами лучей, одна из которых не выходит за пределы верхнего звукового канала, а другая охватывает всю толщину волновода. В связи с этим было необходимо выявить вклад каждой группы лучей в формирование звукового поля.

Опыт проводился по методике, опробированной и протестированной во многих ранее проведенных океанических экспедициях [2, 7]. Излучающая (практически ненаправленная) система

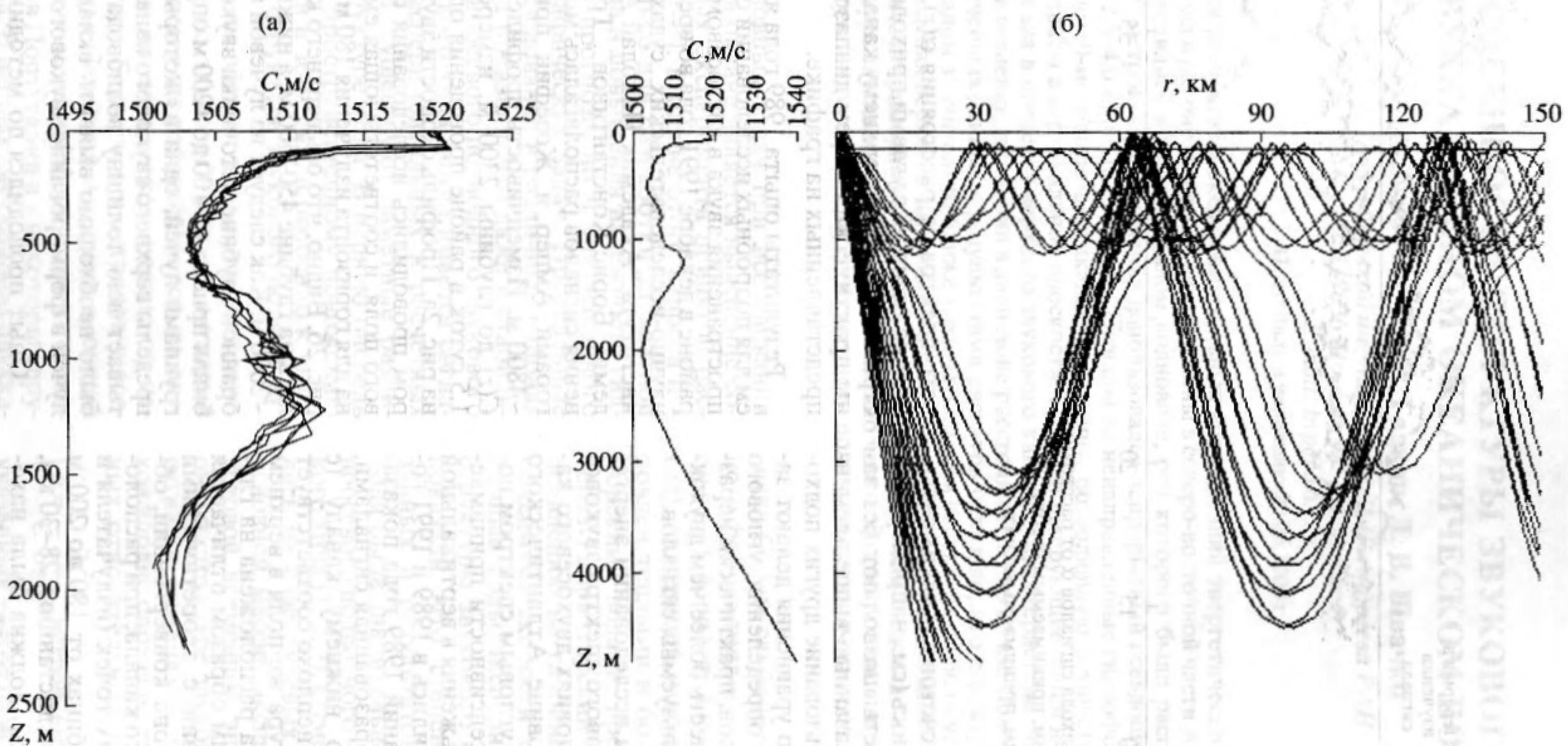


Рис. 2. а – изменчивость профилей скорости звука $C(z)$ в течение 1.5 суток в районе проведения опытов. б – профиль $C(z)$, зарегистрированный непосредственно во время проведения экспериментов (слева), и соответствующая ему лучевая картина для горизонта излучения 180 м (справа).

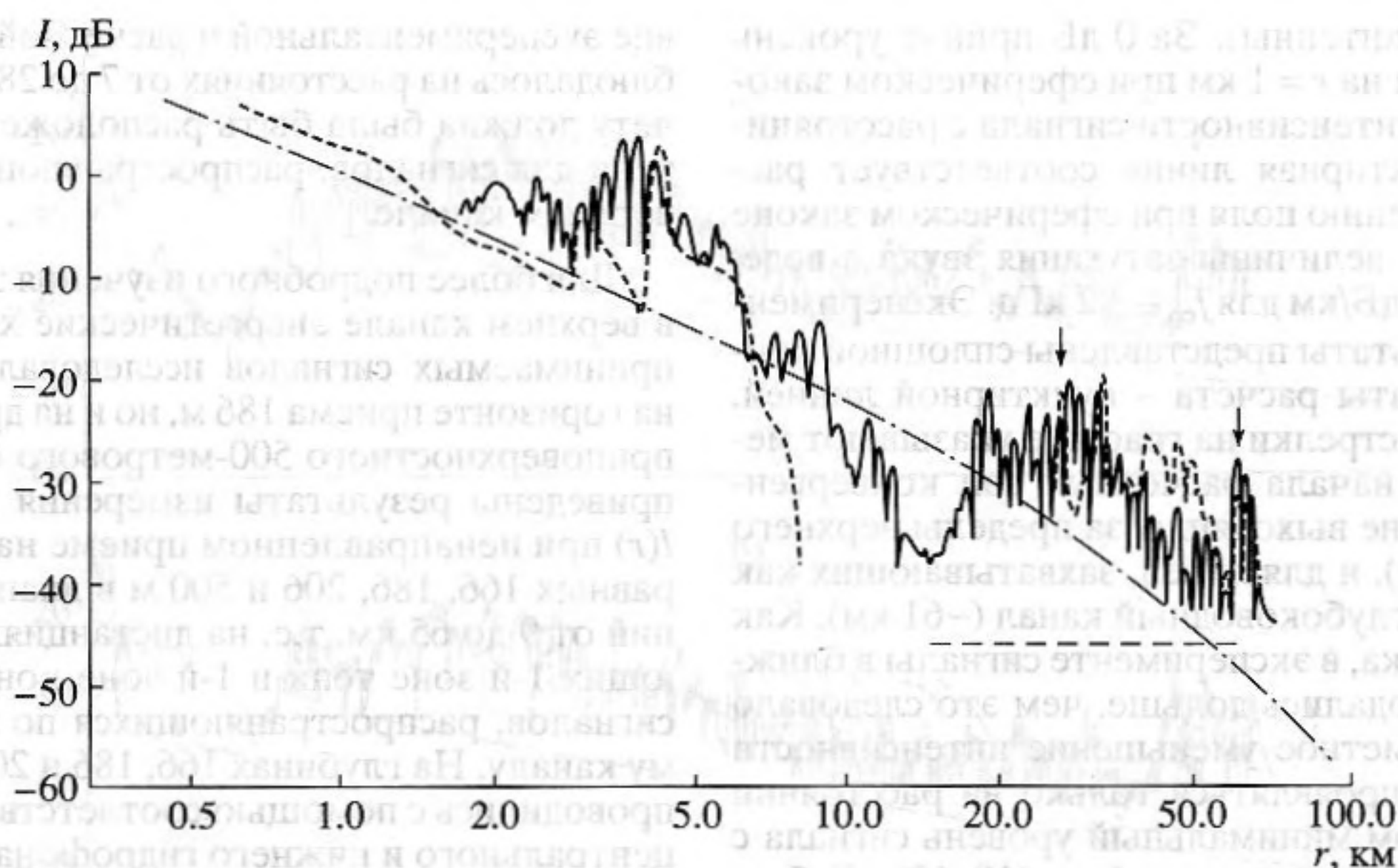


Рис. 3. Изменение интенсивности сигнала с расстоянием $I(r)$ при ненаправленном приеме ($H_{\text{пр}} \cong 186$ м) для горизонта излучения 180 м:

— эксперимент; ---- расчет; вертикальными стрелками указано расчетное положение начала 1-х зон конвергенции, образованных сигналами, распространяющимися в верхнем и нижнем канале соответственно; --- уровень помех.

буксировалась со скоростью около 6–7 узлов на глубине ~ 180 м на трассе от 1 до ~ 135 км, т.е. трасса включала дистанции, соответствующие двум зонам конвергенции, образованным лучами, охватывающими всю толщину волновода. Прием сигналов осуществлялся в дрейфе принимающего судна как на ненаправленные гидрофоны, расположенные в верхнем слое океана (от 160 до 500 м), так и на вертикальную антенну длиной 40 м, центр которой находился на глубине $H_{\text{пр}} \cong 186$ м. Эта антенна позволяла исследовать угловой спектр приходящих сигналов в вертикальной плоскости в диапазоне углов $\pm 23^\circ$ в широкой полосе частот. Поскольку излучался непрерывный псевдошумовой сигнал в диапазоне относительно высоких частот (2.5–4.0 кГц), то формирование диаграмм направленности при приеме сигналов в вертикальной плоскости осуществлялось с помощью центральной 10-метровой части антенны. Для средней частоты используемого диапазона ($f_{\text{ср}} \cong 3.2$ кГц) ширина главного лепестка диаграммы направленности (по уровню 0.7) составляла $\alpha_{0.7} \sim 2.4^\circ$. Отметим, что конструкция антенны была такова, что угол ее отклонения от вертикали в условиях максимального дрейфа судна (~ 1.5 –2 узла) не превышал 1° – 1.5° . Во время обработки полученных материалов (при необходимости) вносились соответствующие коррективы, поскольку угол наклона антенны регистрировался с помощью специально разработанных прецизионных кренометров. Кроме того, учесть отклонение антенны в направлении на источник звука можно было по различию углов прихода сигналов, один из которых отразился от дна,

а другой — от дна и поверхности океана. Вопросы отклонения антенны от вертикали рассматривались в предыдущих работах (см., например, [1, 8]). Расстояние между точкой излучения и точками приема (а не между исследовательскими судами!) определялось с большой точностью с помощью гидроакустической системы измерения дистанции [9]. Для этого в системе единого времени, установленной на обоих судах, к непрерывному псевдошумовому сигналу в определенное время подмешивались короткие тональные импульсы большой интенсивности. Определив на приемном судне углы прихода сигнала в вертикальной плоскости и время распространения импульсов по соответствующим лучам, используя данные о профиле скорости звука, вычислялась дистанция до излучателя.

Особый интерес при исследовании энергетических и угловых характеристик звукового поля представляли измерения на начальном участке трассы (до ~ 65 км), соответствующем 1-й зоне тени и 1-й зоне конвергенции для сигналов, распространяющихся по глубоководному (нижнему) каналу. На этих расстояниях (до ~ 62 км) для звукового поля, формируемого верхним каналом, естественно, должно быть получено наилучшее соответствие экспериментальной структуры поля и расчетных данных. Именно поэтому ниже будут рассмотрены результаты изучения звукового поля только на 65-километровом участке трассы.

На рис. 3 приведены результаты измерения энергетической структуры поля при приеме сигналов на горизонте $H_{\text{пр}} \cong 186$ м с помощью ненаправленного гидрофона (центральный гидрофон

вертикальной антенны). За 0 дБ принят уровень звукового поля на $r = 1$ км при сферическом законе изменения интенсивности сигнала с расстоянием. Штрихпунктирная линия соответствует расчетному изменению поля при сферическом законе спада с учетом величины затухания звука в воде, равного $\beta = 0.2$ дБ/км для $f_{cp} \cong 3.2$ кГц. Экспериментальные результаты представлены сплошной кривой, а результаты расчета – пунктирной линией. Вертикальные стрелки на графике указывают местоположения начала расчетных зон конвергенции для лучей, не выходящих за пределы верхнего канала (~ 28 км), и для лучей, захватывающих как верхний, так и глубоководный канал (~ 61 км). Как видно из графика, в эксперименте сигналы в ближней зоне наблюдались дольше, чем это следовало из расчета. Заметное уменьшение интенсивности сигнала стало проявляться только на расстоянии ~ 9 км. При этом минимальный уровень сигнала с аномалией распространения $A \cong -(10-12)$ дБ был зафиксирован на расстояниях 13–14.5 км, соответствующих середине зоны тени для лучей, удерживаемых верхним каналом. Согласно лучевой картине (рис. 2б), первая зона конвергенции в верхнем канале на горизонте приема (186 м) должна начинаться на расстоянии $\sim 27-28$ км. Следует заметить, что весь набор $C(z)$, представленный на рис. 1а и характеризующий временную изменчивость среды за время, значительно превышающее продолжительность опыта, не позволяет существенным образом “сдвинуть” это расчетное начало зоны. Вопреки лучевой картине, рост интенсивности поля $I(r)$ в эксперименте начинался уже с дистанции $r \sim 16$ км и при $r \cong 18-19$ км аномалия распространения достигала величины $A = +(6-9)$ дБ. При дальнейшем увеличении дистанции интенсивность в среднем менялась мало, но носила медленно осциллирующий характер с перепадами $I(r)$, достигающими значения $\Delta I_{max} \sim 10-15$ дБ. Интенсивность сигнала на дистанции, соответствующей расчетному началу зоны конвергенции для лучей верхнего канала ($r \cong 27-28$ км), практически ничем не выделялась по своему характеру на фоне общего высокого уровня звукового поля ($A \cong +15$ дБ). На дистанциях после 40 км начинается некоторое понижение уровня поля, достигающее средних значений аномалии распространения $A_{cp} \cong +7$ дБ. Такая величина аномалии распространения сохранялась до $r \cong 59$ км. Это расстояние близко к расчетному концу зоны тени (~ 62 км) для сигналов, распространяющихся по глубоководному каналу. На расстоянии ~ 60 км для этих же лучей начиналась 1-я зона конвергенции. Уровень звукового поля при этом повысился до $A \cong +20$ дБ.

Таким образом, в опыте, в отличие от расчета, была зафиксирована практически полная “засветка” всей трассы водными сигналами вплоть до первой зоны конвергенции, соответствующей глубоководному каналу. Наибольшее несоответст-

вие экспериментальной и расчетной структуры наблюдалось на расстояниях от 7 до 28 км, где по расчету должна была быть расположена первая зона тени для сигналов, распространяющихся только в верхнем канале.

Для более подробного изучения звукового поля в верхнем канале энергетические характеристики принимаемых сигналов исследовались не только на горизонте приема 186 м, но и на других глубинах приповерхностного 500-метрового слоя. На рис. 4 приведены результаты измерения интенсивности $I(r)$ при ненаправленном приеме на глубинах $H_{пр}$, равных 166, 186, 206 и 500 м в диапазоне расстояний от 9 до 65 км, т.е. на дистанциях, соответствующих 1-й зоне тени и 1-й зоне конвергенции для сигналов, распространяющихся по глубоководному каналу. На глубинах 166, 186 и 206 м измерения проводились с помощью соответственно верхнего, центрального и нижнего гидрофона вертикальной антенны, причем данные графика рис. 4б соответствуют зависимости $I(r)$, представленной на рис. 3. Измерения же на глубине $H_{пр} \cong 500$ м проводились с помощью дополнительного ненаправленного гидрофона. Результаты опыта изображены на рисунке сплошными линиями, а результаты расчета для горизонтов 186 и 500 м – пунктирными линиями. Как видно из представленных зависимостей $I(r)$, общий характер изменения структуры звукового поля с расстоянием идентичен для всех горизонтов приема. На всех глубинах, начиная с 9–11 км, наблюдается заметное падение интенсивности сигналов, соответствующее концу ближней облученной зоны, причем на глубине 186 м это уменьшение происходит на 2.0–2.5 км позже, чем дает расчет (см. график рис. 3). В то же время на глубине 500 м эти различия незначительны (рис. 4г). В середине области пониженной интенсивности, которая на всех горизонтах приема наблюдалась на расстоянии $r \sim 15$ км, аномалия распространения с ростом глубины увеличивалась от значений $A = -(13-10)$ дБ в слое расположения вертикальной антенны (166–206 м) до величины $A = -(5-4)$ дБ на глубине 500 м. Далее, начиная с $r \cong 16$ км, наблюдался рост интенсивности сигналов, приводящий к образованию первой зоны конвергенции для лучей верхнего канала. Уже на расстоянии 17–18 км во всем диапазоне исследуемых глубин величина аномалии распространения повышалась до $A = +(4-7)$ дБ. Затем значения аномалии продолжали расти, достигая 10–15 дБ. При дальнейшем увеличении расстояния вплоть до начала зоны конвергенции, определяемой сигналами, распространяющимися по нижнему каналу ($r \sim 60$ км), аномалия, оставаясь положительной, постепенно уменьшалась. Таким образом, в реальных условиях океана начало 1-й зоны конвергенции в верхнем канале на всех глубинах приема было ближе расчетного расстояния (23–28 км) примерно на 7–11 км. Следует также отметить, что эксперименталь-

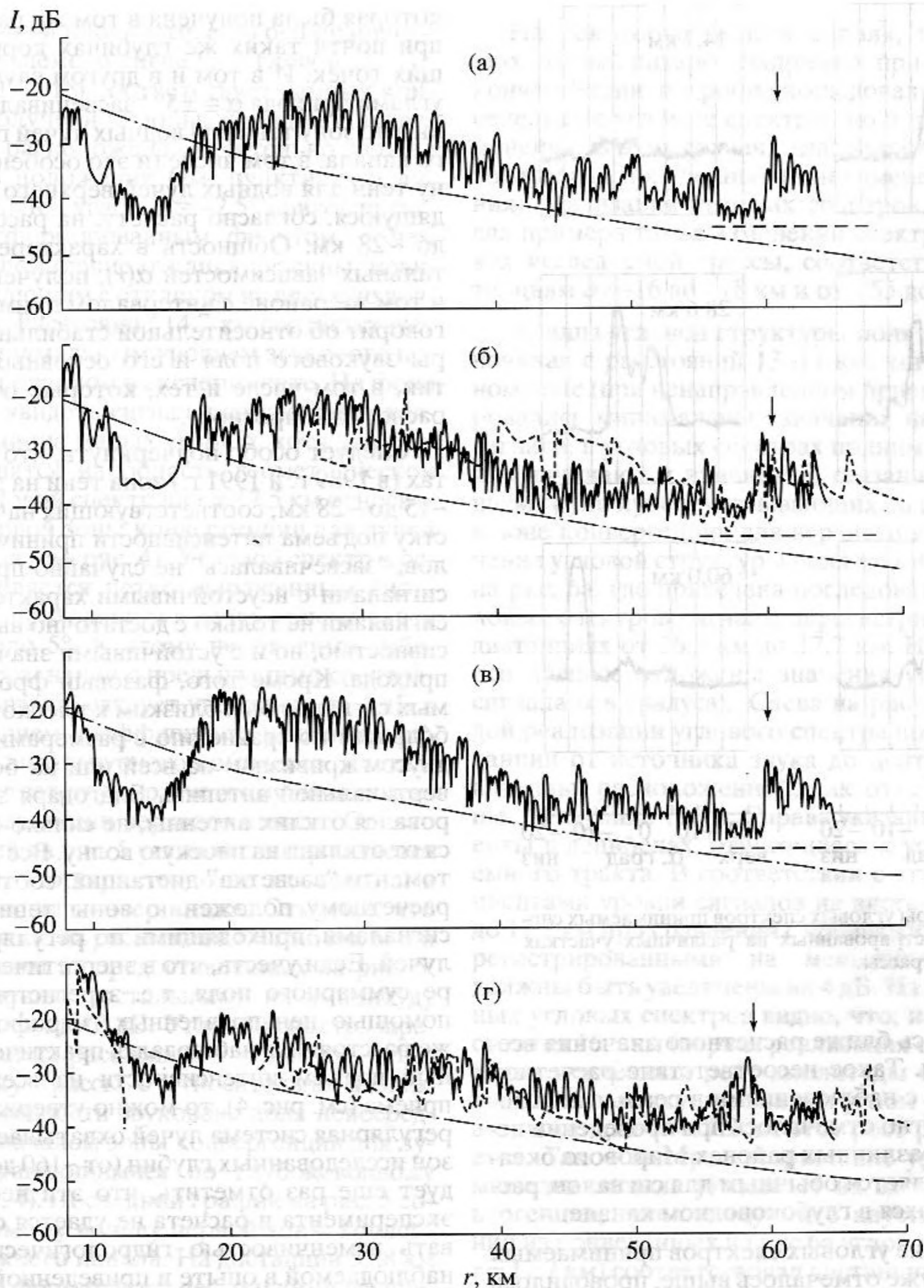


Рис. 4. Изменение интенсивности сигнала с расстоянием $I(r)$ при горизонте излучения 180 м и ненаправленном приеме: а – горизонт приема $H_{\text{пр}} \approx 166$ м; б – $H_{\text{пр}} \approx 186$ м; в – $H_{\text{пр}} \approx 206$ м; г – $H_{\text{пр}} \approx 500$ м.

ные зависимости интенсивности от расстояния $I(r)$ плохо согласуются с аналогичными расчетными данными (см. пунктирные кривые на рис. 4б и 4г).

Первая зона конвергенции, определяемая лучами, распространяющимися по глубоководному каналу, как видно из графиков, начиналась на расстояниях от 57 до 61 км в зависимости от глубины приема. Максимальная величина аномалии

распространения слабо зависела от горизонта приема и изменялась с увеличением глубины от +20 до +18 дБ. Из сопоставления дистанций начала 1-й зоны конвергенции, зафиксированных в эксперименте, с результатами расчетов (расчетные данные на рис. 4 отмечены вертикальными стрелками), видно, что различия между ними существенно меньше, чем для лучей верхнего канала. Граница начала зоны конвергенции в экспери-

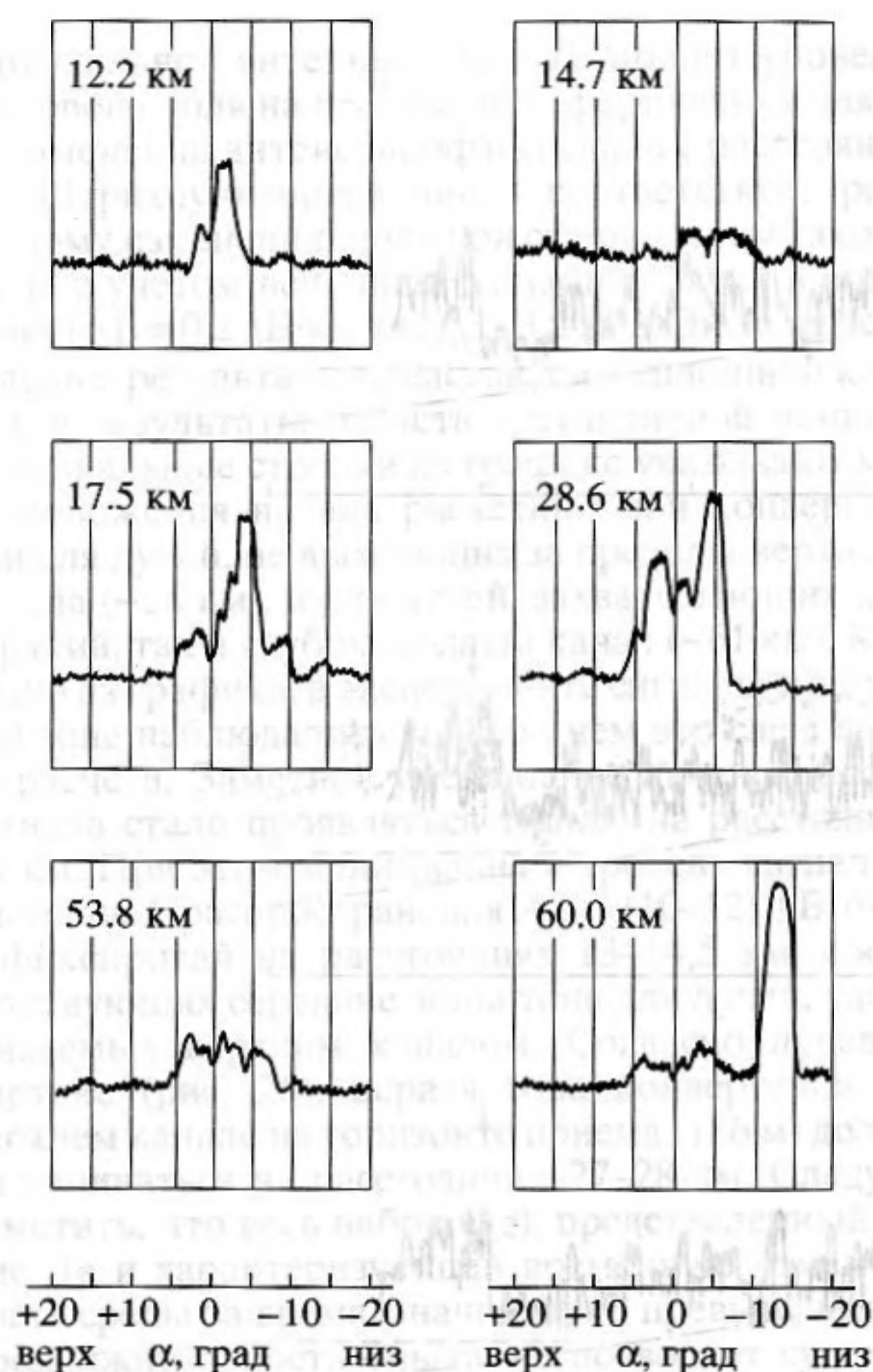


Рис. 5. Примеры угловых спектров принимаемых сигналов, зарегистрированных на различных участках исследуемой трассы.

менте оказалась ближе расчетного значения всего на 1–1.5 км. Такое несоответствие расчетной границы зоны с наблюдениями в реальных условиях многократно отмечалось при проведении исследований в различных районах Мирового океана [1, 2, 7] и является обычным для сигналов, распространяющихся в глубоководном канале.

Исследование угловых спектров принимаемых сигналов, как уже отмечалось выше, проводилось с помощью сканирования диаграммой направленности 10-метровой антенны диапазона углов $\pm 23^\circ$ при ширине главного лепестка $\sim 2.4^\circ$. Угловые спектры приходящих сигналов измерялись при непрерывном изменении дистанции от 1 до 65 км. Это дало возможность получить подробную зависимость углов прихода сигналов в вертикальной плоскости от расстояния $\alpha(r)$ вдоль всей трассы исследований. Соотношение же уровней сигналов, одновременно приходящих в точку приема под различными углами, позволило проанализировать энергетические характеристики спектров. Измеренная в опыте $\alpha(r)$ была практически идентична зависимости $\alpha(r)$, представленной на рис. 1,

которая была получена в том же районе в 1989 г. при почти таких же глубинах корреспондирующих точек. И в том и в другом случае сигналы с углами прихода $\alpha \cong \pm 5^\circ$ “засвечивали” практически всю зону тени для водных лучей глубоководного канала, в том числе (и это особенно важно) зону тени для водных лучей верхнего канала, находящуюся, согласно расчету, на расстоянии от ~ 7 до ~ 28 км. Общность в характере экспериментальных зависимостей $\alpha(r)$, полученных в одном и том же районе с интервалом примерно в 2 года, говорит об относительной стабильности структуры звукового поля и его основных характеристик, в том числе и тех, которые отличаются от расчетного прогноза.

Следует особо подчеркнуть, что в обоих опытах (в 1989 г. и 1991 г.) зона тени на дистанциях от ~ 15 до ~ 28 км, соответствующих начальному участку подъема интенсивности принимаемых сигналов, “засвечивалась” не случайно проникающими сигналами с неустойчивыми характеристиками, а сигналами не только с достаточно высокой интенсивностью, но и с устойчивыми значениями углов прихода. Кроме того, фазовый фронт принимаемых сигналов был близким к плоскому (точнее – с большим по сравнению с размерами антенны радиусом кривизны) на всей или на большей части вертикальной антенны. Благодаря этому формировался отклик антенны, не сильно отличающийся от отклика на плоскую волну. Все это говорит о том, что “засветка” дистанций, соответствующих расчетному положению зоны тени, происходит сигналами, приходящими по регулярной системе лучей. Если учесть, что в энергетической структуре суммарного поля, т.е. зарегистрированного с помощью ненаправленных гидрофонов, на этих же расстояниях наблюдался практически синхронный подъем интенсивности на всех горизонтах приема (см. рис. 4), то можно утверждать, что эта регулярная система лучей охватывает весь диапазон исследованных глубин (от ~ 160 до 500 м). Следует еще раз отметить, что эти несоответствия эксперимента и расчета не удается скорректировать изменчивостью гидрологических условий, наблюдаемой в опыте и приведенной на рис. 2а.

Остановимся подробнее на характеристиках угловых спектров принимаемых сигналов. На рис. 5 представлены реализации угловой структуры поля, зарегистрированные на некоторых дистанциях исследуемой трассы (12.2, 14.7, 17.5, 28.6, 53.8 и 60.0 км), соответствующих участкам существенного изменения звукового поля. Отметим, что приведенные на рисунке угловые спектры, кроме двух – на дистанциях 17.5 и 28.6 км (ниже они будут рассмотрены подробно), были зарегистрированы при одном и том же усилении приемного комплекса аппаратуры, условно принятого за 0 дБ. По оси абсцисс отложены углы поворота α главного лепестка диаграммы направленности антен-

ны в вертикальной плоскости, а по оси ординат — уровень принимаемого сигнала. Угловой спектр на дистанции 12.2 км соответствует самому концу ближней облученной зоны, которая в эксперименте была расположена значительно дальше ее расчетного положения (см. пунктирную линию на рис. 3). Под углом $\alpha \cong -2.5^\circ$ приходил сигнал с четко сформированным фронтом, о чем можно судить по ширине отклика антенны, практически совпадающим с откликом на плоскую волну ($\alpha_{0.7} \cong -2.4^\circ$). Расстояние 14.7 км соответствует дистанции с минимальным уровнем звукового поля, зарегистрированном в эксперименте. На фоне шумов можно увидеть сигналы со слабой интенсивностью в районе малых углов α , хотя эти дистанции приходятся на область геометрической зоны тени. Угловой спектр на $r = 17.5$ км относится к началу первой зоны конвергенции для лучей верхнего канала (см. рис. 4). Угловой спектр в основном определяется четко выраженным сильным сигналом, приходящим в точку приема снизу под углом около 5° . К этому необходимо добавить, что при сравнении с предыдущими спектрами величину сигнала следует увеличить на 4 дБ в связи с изменением коэффициента усиления приемного тракта аппаратурного комплекса. Дистанция 28.6 км соответствует расчетному началу первой зоны конвергенции верхнего канала. Однако представленный на рис. 5 угловой спектр является многолучевым, что характерно не для начала, а для середины зоны конвергенции. Отметим, что сигналы, принятые на расстоянии $r = 28.6$ км, были самыми сильными из предоставленных на рис. 5. Для сопоставления с остальными их амплитуду нужно увеличить на 12 дБ. Угловой спектр, зарегистрированный на расстоянии $r = 53.8$ км, относится к участку трассы с относительно низким уровнем интенсивности звукового поля непосредственно перед началом зоны конвергенции для лучей, распространяющимися по глубоководному каналу (см. рис. 4). Последний график на рис. 5 соответствует самому началу первой зоны конвергенции для нижнего канала. На дистанции 53.8 км угловой спектр формируется несколькими группами лучей, по которым распространяются сигналы в пределах верхнего канала, с диапазоном углов прихода $\alpha \sim \pm 5^\circ$. На дистанции 60.0 км основной вклад в звуковое поле вносит сигнал, приходящий снизу под углом $\alpha \cong -12^\circ$, что характерно для начала зоны конвергенции. Остальные сигналы на этом расстоянии, распространяющиеся только по верхнему каналу, оказываются значительно слабее его. Следует также отметить, что энергетические характеристики сигналов в угловых спектрах, приведенных на рис. 5, хорошо согласуются с уровнем суммарного звукового поля при ненаправленном приеме $I(r)$ для глубины 186 м, представленной на рис. 4б.

На некоторых участках поля, представляющих особый интерес, например, при входе в зоны конвергенции, подробно исследовались не только отдельные угловые спектры, но и процесс их изменения. В этих случаях анализировались последовательно полученные (при изменении расстояния) реализации угловых спектров. Рассмотрим два примера таких изменений спектров на участках исследуемой трассы, соответствующих дистанциям от ~ 16 до ~ 18 км и от ~ 55 до ~ 61 км.

Анализ угловой структуры поля показал, что, начиная с расстояний 13–14 км, когда в суммарном поле (при ненаправленном приеме) регистрировались минимальные значения интенсивности сигнала, в угловых спектрах принимаемых сигналов начинаются изменения, связанные с появлением групп лучей, указывающих на приближение к зоне конвергенции для верхнего канала. Изменения угловой структуры поля можно проследить на рис. 6а, где приведена последовательность угловых спектров сигнала, зарегистрированных на дистанциях от 16.3 км до 17.7 км. На рисунке по оси абсцисс отложены значения углов прихода сигнала α в градусах. Слева на рисунке для каждой реализации углового спектра приведены дистанции от источника звука до центра приемной антенны, расположенной, как отмечалось раньше, на глубине 186 м. Справа указаны коэффициенты в децибелах, относящиеся к усилению приемного тракта. В соответствии с этими коэффициентами уровни сигналов на дистанциях от 17.4 до 17.7 км при сравнении с уровнями сигналов, зарегистрированными на меньших дистанциях, должны быть увеличены на 4 дБ. Из представленных угловых спектров видно, что, начиная с расстояния 16.3 км (первая реализация снизу), происходит медленный рост амплитуды сигнала, приходящего в точку приема под углом $\sim 2^\circ$ – 3° снизу, а с дистанции $r = 17.2$ км этот рост резко ускоряется. Такое быстрое возрастание уровня принимаемого сигнала указывает на вход в зону конвергенции, начинающуюся с каустики. Последний из приведенных на рис. 6а угловой спектр (для $r = 17.7$ км) соответствовал дистанции, на которой амплитуда сигнала с $\alpha \cong (3\text{--}4)^\circ$ была максимальной. В это же время, естественно, наблюдалось и максимальное увеличение интенсивности сигнала в суммарном поле при ненаправленном приеме (см. рис. 3 и рис. 4б). Отметим, что на дистанциях от 16.3 до 17.2 км фронт принимаемого сигнала отличался от плоского или, возможно, не был еще до конца сформирован, на что указывает более широкий угловой отклик антенны по сравнению с откликом на плоскую волну. При дальнейшем увеличении расстояния (свыше 18 км) до $r \sim 60$ км, т.е. на дистанциях, соответствующих зоне тени для лучей нижнего канала, угловой спектр сигналов из практически однолучевого становился многолучевым (см. рис. 5 $r = 28.6$ км и $r = 53.8$ км).

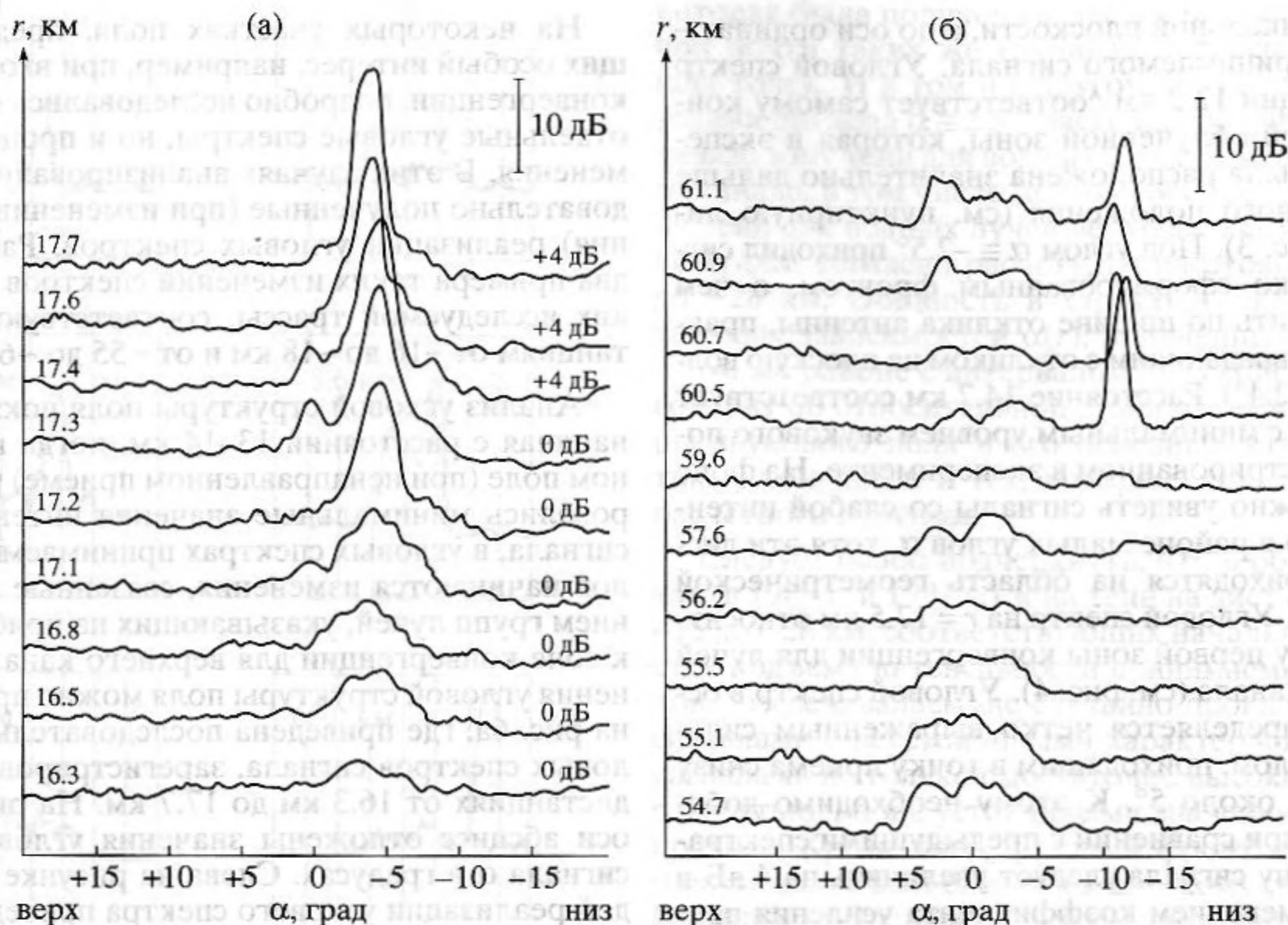


Рис. 6. Изменения угловых спектров принимаемых сигналов при входе в первую зону конвергенции:

а – для сигналов, распространяющихся только в верхнем канале;

б – для сигналов, распространяющихся как в верхнем, так и в нижнем канале.

При этом всегда углы прихода α располагались вблизи малых углов скольжения, определяемых перепадом скоростей звука на горизонте приема и в области максимума профиля скорости звука $C(z)$ на глубине ~ 1200 м.

Второй пример изменений углового спектра принятых сигналов с ростом расстояния представлен на рис. 6б, где приведены десять реализаций из довольно большой последовательности спектров, зарегистрированных на дистанциях, соответствующих концу зоны тени и самому началу зоны конвергенции для сигналов, распространяющихся по нижнему каналу. На рисунке по осям отложены те же параметры, что и на рис. 6а. Отсутствует только указание на коэффициент усиления приемного тракта (справа от угловых спектров), поскольку он в течение этого времени не изменялся. Как видно, во всех приведенных угловых спектрах присутствуют сигналы, пришедшие по верхнему каналу с углами скольжения $\sim \pm 5^\circ$. Однако на дистанциях, превышающих 59.6 км (последние четыре угловых спектра) происходит резкое изменение спектра, связанное со входом в зону конвергенции для сигналов, распространяющихся по нижнему каналу (см. рис. 2). Начало зоны, соответствующее каустике для сигналов, приходящих в точку приема снизу (на рис. 6б –

под углом $\alpha \cong -10^\circ$), было зарегистрировано на расстоянии 60.5 км, что на 1.5 км меньше расчетного начала зоны конвергенции (62 км). Как уже отмечалось, такое несоответствие данных эксперимента и расчета является обычным для сигналов, распространяющихся в глубоководном канале, даже в стабильных (в гидрологическом аспекте) районах Мирового океана.

Представленные результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик звукового поля при ненаправленном приеме и его угловой и энергетической структуры при направленном (в вертикальной плоскости) приеме в двухканальном волноводе показывают, что для источника, расположенного в пределах верхнего канала:

– структура звукового поля, определяемая лучами, проходящими по нижнему каналу, вполне удовлетворительно соответствует расчетным данным, полученным для обычно используемой модели волновода, и наличие верхнего канала в двухканальном океаническом волноводе практически не сказывается на результатах; различие эксперимента и расчета по пространственному положению зон тени и зон конвергенции (например, более раннее начало первой зоны конвергенции по сравнению с расчетом на ~ 1.5 км) во многих практических случаях не является прин-

ципальным; отметим, однако, что так называемая тонкая структура поля (угловая, временная и энергетическая) на каждой конкретной дистанции может довольно сильно отличаться от расчетной, особенно в начале и конце зоны;

– угловые спектры и энергетическая структура поля, формируемые лучами верхнего канала, в реальных условиях океана значительно отличаются от расчетных; в экспериментах наблюдается практически полная “засветка” всей исследуемой трассы сигналами, распространяющимися по водным лучам; первая зона тени для лучей, удерживаемых верхним каналом, точнее область с малой интенсивностью принимаемых сигналов, в опытах оказывается значительно меньше по протяженности, чем дает расчет (например, протяженность такой области при глубине источника 180 м и глубинах приема $H_{пр}$ от 180 до 500 м составляла – в зависимости от $H_{пр}$, ~8–4 км вместо расчетной ~22–13 км); необходимо отметить, что “засветка” основной части зоны тени ($r > 16$ км) происходила не случайными водными сигналами с нестабильными характеристиками (например, рассеянными на неоднородностях водной толщи), а лучевой структурой с практически сформированными плоскими фронтами; начало первой зоны конвергенции для лучей верхнего канала в экспериментах опережало расчетное начало зоны (в зависимости от $H_{пр}$) примерно на 11–7 км.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А. Экспериментальные исследования угловой структуры звукового поля в океане // *Вопр. судостроения. Сер. Акустика*. 1978. № 11. С. 80–84.
2. Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А., Панкова С.Д., Дымшиц А.М. Исследование “толщины” физических лучей в океане и влияние среды на корреляционные свойства сигнала // *Проблемы акустики океана*. М.: Наука, 1984. С. 118–133.
3. Bongiovanni K.P., Siegmann W.L., Ko D.S. Convergence zone feature dependence on ocean temperature structure // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1996. V. 100. № 5. P. 3033–3041.
4. Gerrebout J. Comparison of ray tracing predictions with wideband propagation measurements // *Proc. of Conf. held at Saclantcen on 27–30 sept., 1971*.
5. Guthrie A.N., Fitzgerald R.M., Nutile D.A., Shaffer J.D. Long-range low-frequency CW propagation in the deep ocean: Antigua-Newfoundland // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1974. V. 56. № 1. P. 58–69.
6. Галкин О.П., Харченко Е.А., Швачко Л.В. Исследования угловой структуры звукового поля // В кн.: IX Всесоюзная акустическая конференция: Докл. Секция Д. М.: Акуст. ин-т, 1977. С. 1–4.
7. Галкин О.П., Швачко Л.В. Структура звукового поля в океане на больших расстояниях от источника // *Акуст. журн.* 1998. Т. 44. № 2. С. 192–201.
8. Галкин О.П., Харченко Е.А., Швачко Л.В. Структура акустического поля в океане на различных частотах звукового диапазона // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. № 3. С. 325–335.
9. Веденев А.Е., Галкин О.П., Рогожкин И.С., Филиппов Л.М. Акустический метод измерения расстояния между исследовательскими судами в открытом океане // *Вопр. судостроения. Сер. Акустика*. 1982. № 15. С. 122–125.

Features of the Sound Field Structure in a Two-Channel Oceanic Waveguide

O. P. Galkin and L. V. Shvachko

The results of experimental studies of the energy and angular structure of a sound field in the region of the Iberian Basin in the north-eastern Atlantic are discussed. The experiments are carried out in a two-channel waveguide whose axes are located at depths of approximately 450 and 2000 m. A continuous pseudo-noise signal in the frequency range 2.5–4.0 kHz is emitted. The signals are received by the omnidirectional hydrophones and, simultaneously, by a 10-m-long vertical array, which allows one to realize a narrow beam reception ($\sim 2.5^\circ$) in the vertical plane. The source and the receiver are located in a 500-m-thick layer within the upper sound channel. The field characteristics are measured in the course of a continuous change of distance from 1 to 65 km. The comparison of the experimental data with calculations shows that the sound field structure formed by the lower channel is much closer to the theoretical results than the structure formed by the upper channel. In the upper sound channel, the shadow zone manifests itself only slightly, and the first convergence zone begins approximately 7–11 km nearer to the source than predicted by the calculations. The corresponding angular sound field structure is fairly pronounced in the vertical plane and bears no evidence of the random behavior that is peculiar to the fields scattered by the inhomogeneities.