АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 6, с. 837–843

УДК 537.23

ВЛИЯНИЕ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

© 1998 г. Л. В. Швачко

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

Поступила в редакцию 28.10.97 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований энергетической и угловой структуры звукового поля шумового источника средней частоты 3 кГц в северо-западной части Тихого океана южнее и севернее фронтальной зоны, образованной течением Куросио, с учетом сезонной изменчивости гидрологических условий, наблюдаемых севернее фронта.

В океанических экспериментах Акустического института всегда присутствовала тематика влияния неоднородности гидрологических условий вдоль трассы распространения, в том числе определяемой фронтальными зонами, на изменение структуры звуковых полей. Наиболее масштабный опыт с использованием четырех научно-исследовательских судов "Сергей Вавилов", "Петр Лебедев", "Академик Николай Андреев" и "Академик Борис Константинов" был проведен в районе течения Гольфстрим в 1989 году. Некоторые результаты этого эксперимента были опубликованы в 1994 году [1]. Влияние течения Гольфстрим, вернее его границ, на величину потерь при распространении звука рассматривалось также в работе [2] по результатам проведения комплекса исследований на сверхпротяженных акустических трассах в международном эксперименте по программе "АТОК" в 1991 году. В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований структуры звуковых полей, полученные во время опытов на судах "Академик Николай Андреев" и "Академик Борис Константинов" в 1989 и 1990 годах в северо-западной части Тихого океана в районе фронтальной зоны, образованной течением Куросио. В то же самое время, в июле 1989 года, в северо-восточной части Тихого океана американскими исследователями проводились томографические опыты на трассах протяженностью порядка 1000 км [3]. Несмотря на то, что одной из задач их опытов была корректировка параметров профиля скорости звука $C(z)$, т.е. детальное исследование гидролого-акустических характеристик региона, судя по приведенным результатам, влияние фронтальной зоны либо не исследовалось, либо не обсуждалось.

В эксперименте Акустического института, проводимом по устоявшейся за многие годы океанических исследований методике (см., например, [4–7]), серия опытов по изучению влияния фронтальной зоны на изменение энергетической и угловой структур звукового поля состояла из двух следующих друг за другом опытов, проводимых южнее и севернее фронта в ноябре 1989 г., и одного опыта, проведенного севернее фронта в марте 1990 г. Профили скорости звука $C(z)$ для условий всех этих опытов до глубин 2000 м приведены на рис. 1, где штриховой линией и индексом *1* обозначен $C(z)$, соответствующий условиям, наблюдавшимся южнее фронта, а сплошной и пунктирными линиями (соответственно индексами *2* и *3*) – наблюдавшимся севернее фронта в ноябре 1989 г. и марте 1990 г. Два последние профиля скорости звука описывают соответственно осенние и весенние условия распространения звука севернее фронтальной зоны. Из-за большой тепловой инерционности водных масс осенние гидрологические

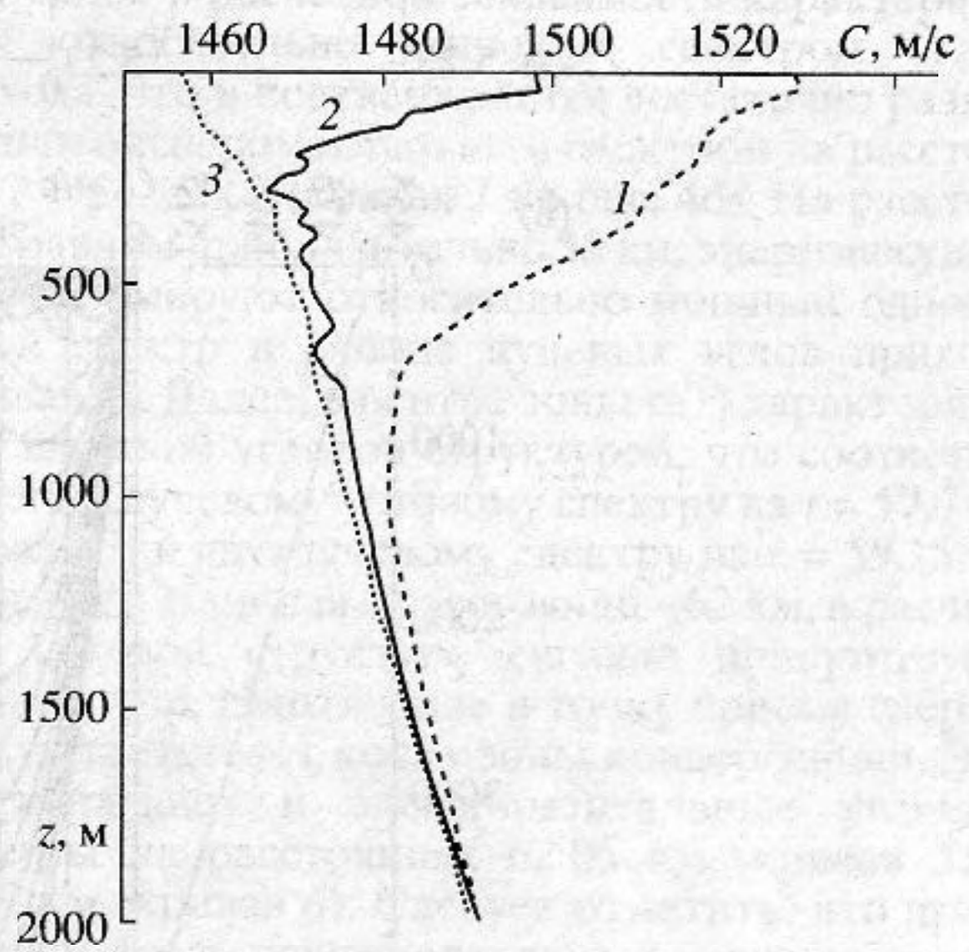

Рис. 1. Профили скорости звука $C(z)$: *1* – южнее фронта, *2* – севернее фронта, осенние условия распространения, *3* – севернее фронта, весенние условия распространения.

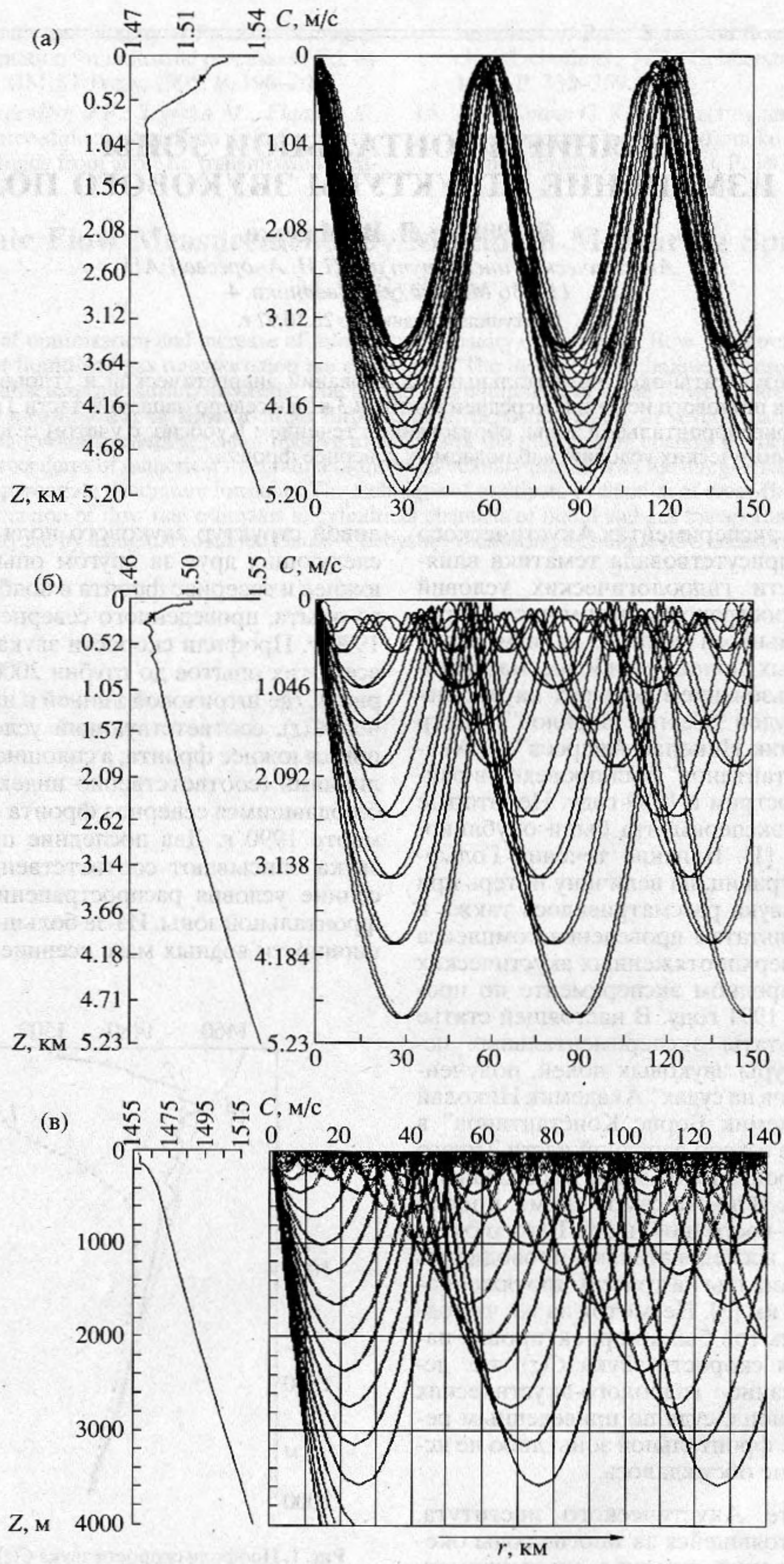

Рис. 2. Лучевые картины. а – южнее фронта, $Z = 250$ м; б – севернее фронта, условия подповерхностного канала, $Z = 250$ м; в – севернее фронта, условия приповерхностного канала, $Z = 50$ м.

условия характеризуются еще сохранившимся прогревом верхних слоев океана, а весенние – зимним охлаждением, а потому условия распространения в этих опытах были практически аналогичны летним и зимним (подповерхностный и приповерхностный каналы).

Основная задача о влиянии течения Куросио на изменение структуры звукового поля решалась первыми двумя опытами, а сопоставление результатов второго и третьего опытов позволяло оценить особенности этой структуры в зависимости от сезонной изменчивости гидрологических условий, наблюдаемых севернее фронтальной зоны. Исходя из главной задачи, первые два опыта проводились по времени непосредственно друг за другом, а именно 12 и 16 ноября, при одних и тех же расположениях корреспондирующих точек. Профили скорости звука во всем диапазоне глубин и соответствующие им лучевые картины при глубинах источника $Z = 250$ м приведены на рис. 2а и рис. 2б. Как следует из данных рис. 2а и рис. 2б, при переходе через фронт с юга на север ось глубоководного канала резко поднимается с глубин 800–1000 м к поверхности, на глубину 250 м, и в верхнем подповерхностном слое появляется резкий градиент скорости звука. Такое изменение профиля скорости звука вызывает, как следует из вида лучевых картин, значительные изменения в характере распределения звукового поля в пространстве. Так, если в южном районе поле характеризовалось зональной структурой с чередованием зон тени и зон конвергенций, то в северном – наблюдалась практически полная засветка водными лучами верхних слоев океана, так как источник располагался уже вблизи оси канала.

Опыты по исследованию структуры звуковых полей проводились при буксировке в слое 200–250 м системы, производящей непрерывное псевдошумовое излучение в диапазоне частот 2.5–4.0 кГц. Прием сигналов осуществлялся на глубине $Z_1 = 250$ м, как ненаправленными гидрофонами, так и протяженной (40 м) вертикальной антенной, позволяющей производить направленный в вертикальной плоскости прием с разрешающей способностью ~2°. Результаты исследования энергетической структуры поля в виде графиков зависимости интенсивности сигнала I в дБ ($I(r)$) от расстояния r в км на трассах протяженностью 120 км южнее фронта и 170 км севернее фронта представлены на рис. 3а и рис. 3б соответственно. На всех графиках этого рисунка, сплошные кривые соответствуют экспериментальным результатам, штриховые – результатам расчета, а штрих-пунктирные – сферическому закону с учетом пространственного затухания. Как следует из приведенных данных, характер экспериментальных зависимостей находится в качественном согласии с характером лучевых картин. Изменение интенсивности сигнала в ближних областях в обоих районах достаточно хорошо согласуется с расчетными зависимостями $I(r)$. Что касается энергетических характеристик на больших расстояниях, то, если величина максимальной аномалии распространения $A(r)$ в районе, расположенном южнее фронта, составляет 19–20 дБ в первой и во второй зонах конвергенции, то севернее фронта при практически полной засветке трассы водными сигналами, начиная с расстояний приблизительно 35 км, величина максимальной $A(r)$ снижается и составляет в зависимости от участка поля от 11 до 15 дБ.

В опыте, проводимом южнее фронта, совместно с энергетическими характеристиками исследовалась также и угловая структура звукового поля. Расчетная зависимость углов прихода сигнала в точке приема в вертикальной плоскости от расстояния $\alpha(r)$ для первой зоны конвергенции и для горизонтов излучения (Z) и приема (Z_1), равных 250 м, представлена на рис. 4а. Здесь по оси абсцисс отложено расстояние r в км, а по оси ординат – угол прихода сигнала α в градусах, причем знак "–" соответствует сигналам, приходящим в точку приема снизу, а знак "+" – сверху. Согласно приведенной зависимости, кривые в диапазоне углов прихода ±12° соответствуют водным лучам, а при более крутых углах – лучам, однократно отраженным от дна. На рис. 4б приведены некоторые примеры экспериментальных угловых спектров – зависимостей отклика приемной направленной системы от угла сканирования в вертикальной плоскости – зафиксированных на индикаторе секторного обзора приемного комплекса в диапазоне углов ±20°. Из сопоставления этих данных видно качественное согласие между расчетной зависимостью $\alpha(r)$ и видом мгновенных реализаций экспериментальных угловых спектров. Так, самое начало зоны в расчетной зависимости характеризуется относительно широким спектром углов прихода, что и подтверждается достаточно размазанным экспериментальным спектром на расстоянии $r = 54.25$ км (кривая *1* на рис. 4б). На расстоянии, равном приблизительно 55 км, энергонесущие лучи формируют относительно мощный однолучевой спектр в районе нулевых углов прихода (кривая *2*). Далее, в центре зоны $\alpha(r)$ характеризуется сложной угловой структурой, что соответствует трехлучевому угловому спектру на $r = 57.7$ км (кривая *3*) и двухлучевому спектру на $r = 59.15$ км (кривая *4*). Начиная с расстояний ~62 км, в расчетной угловой структуре сигнала присутствуют только лучи, приходящие в точку приема сверху, что соответствует концу зоны конвергенции. Это подтверждают и экспериментальные угловые спектры на расстояниях 62.05 км (кривая *5*) и 63.27 км (кривая *6*). Следует отметить, что практически все экспериментальные угловые спектры характеризуются четко выраженными дискретными максимумами, указывающими на то, что разрешающей способности антенны достаточно для разделения отдельных лучей или групп

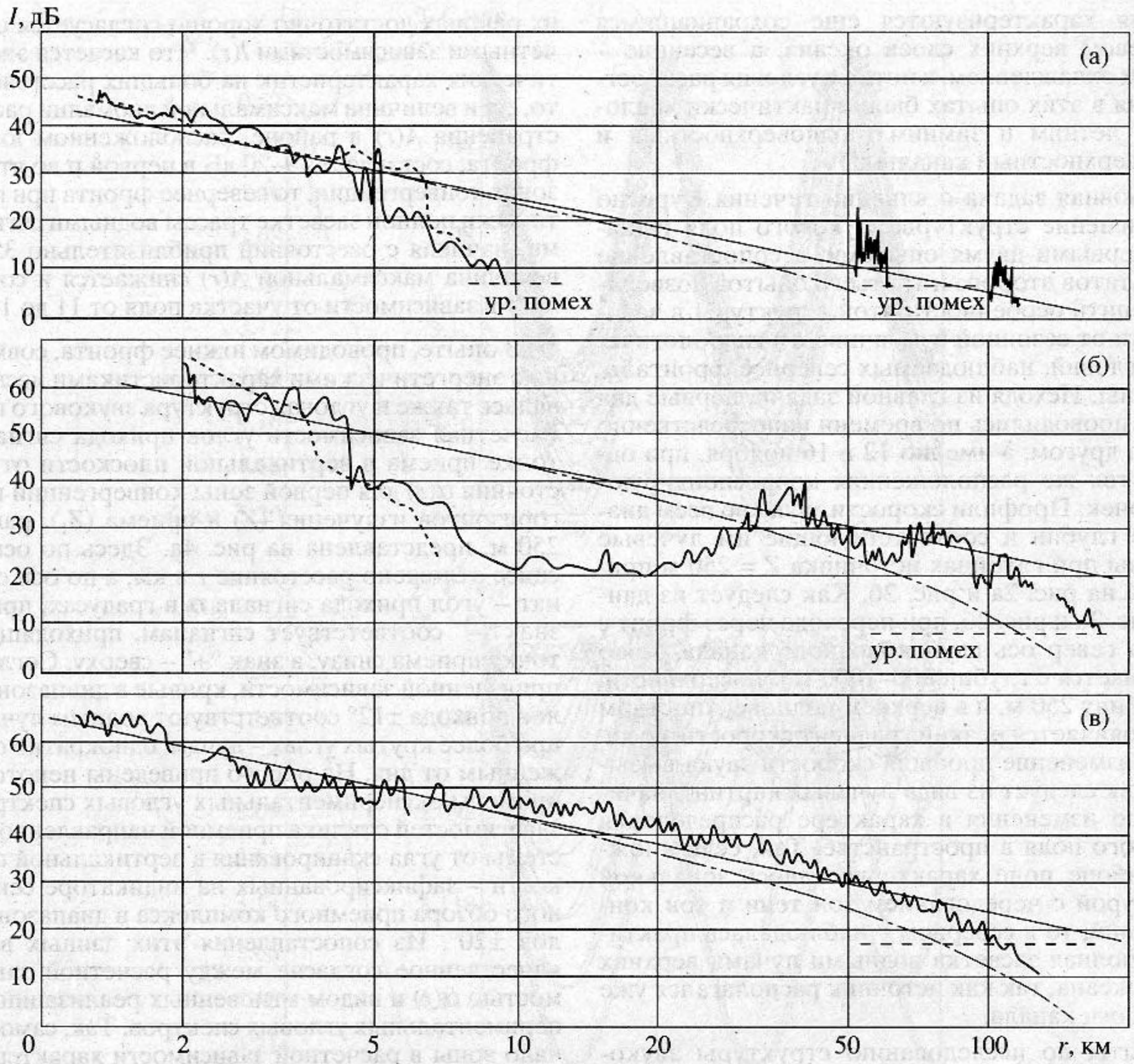

Рис. 3. Зависимости интенсивности звукового поля от расстояния $I(r)$. а – южнее фронта, $Z = 250$ м, $Z_1 = 250$ м; б – севернее фронта, условия подповерхностного канала, $Z = 200$ м, $Z_1 = 250$ м; в – севернее фронта, условия приповерхностного канала, $Z = 50$ м, $Z_1 = 150$ м.

лучей. Обычно такой характер углового спектра наблюдается при относительной малолучевости звукового поля, характерной для условий существования в пространстве зональной структуры.

Опыт севернее фронта проводился в марте 1990 года в гидрологических условиях, характерных для весеннего времени, когда из-за охлаждения на поверхности в верхних слоях океана существует положительный градиент скорости звука (кривая *3* на рис. 1). Характер распределения звукового поля в пространстве, согласно лучевой картине (рис. 2в) в случае расположения источника вблизи поверхности океана, определялся распространением звука в приповерхностном канале, где все траектории лучей претерпевают многократные отражения от поверхности.

Цикл работ в районе состоял из двух опытов. Первый опыт заключался в исследовании энергетической структуры поля при ненаправленном приеме и ее изменении с расстоянием на трассе до 130 км. Экспериментальные исследования проводились с применением того же самого приемно-излучающего комплекса аппаратуры, что и в опытах при проходе через фронтальную зону. Буксировка излучателя происходила на горизонте 50 м, т.е. вблизи оси канала, прием сигналов осуществлялся в слое 100–200 м. Результаты в виде экспериментальной зависимости $I(r)$ для всей исследуемой трассы на горизонте приема 150 м приведены на графике рис. 3в. Согласно графику, максимальная величина аномалии распространения не превышает значений 7–8 дБ в середине трассы и несколько уменьшается в конце ее, на расстоянии 130 км, до

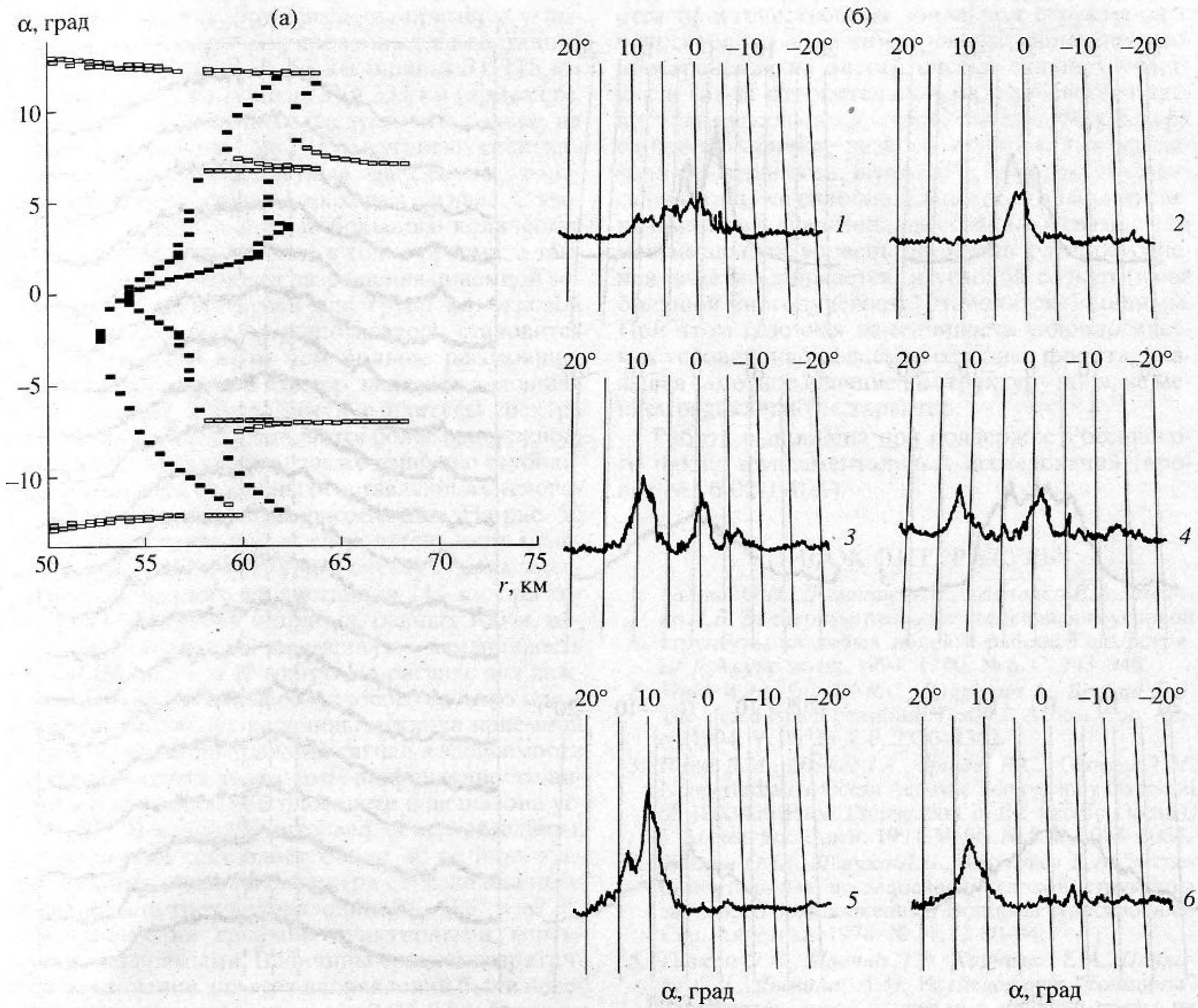

Рис. 4. Угловая структура звукового поля в первой зоне конвергенции южнее фронта; $Z = 250$ м, $Z_1 = 250$ м. а – расчетная зависимость углов прихода сигнала от расстояния $\alpha(r)$. б – примеры экспериментальных спектров сигнала на расстояниях: *1* – 54.25 км, *2* – 55.0 км, *3* – 57.7 км, *4* – 59.15 км, *5* – 62.5 км, *6* – 63.27 км.

6–7 дБ. Слабое отклонение от сферического закона в конце трассы указывает на существенное ослабление поля за счет влияния взволнованной поверхности океана (около 4 баллов).

Из сопоставления экспериментальных зависимостей $I(r)$, полученных севернее фронта и представленных на графиках рис. 3б и рис. 3в (осенние и весенние гидрологические условия соответственно), следует, что сезонная изменчивость $C(z)$, существенная для верхнего слоя толщины порядка 250 м, приводит к некоторым изменениям в энергетической структуре поля. Изменения эти наиболее заметны в ближней области на расстояниях 5–30 км, где для осеннего распределения $C(z)$ наблюдается зона тени с минимальным уровнем аномалии распространения $A = -18 \ldots -20$ дБ, а в весенних условиях – полная засветка водными лучами. На расстояниях свыше 30 км и в том, и в другом случаях водные лучи определяют основную энергетику звукового поля, хотя для осенних условий зависимость $I(r)$, в отличие от относительно монотонного хода $I(r)$ в условиях приповерхностного канала, носит квазипериодический характер, связанный с цикличностью лучевых траекторий в подповерхностном канале. Кроме того в условиях существования подповерхностного канала, большая величина положительного градиента $C(z)$ вблизи поверхности уменьшает роль ее в ослаблении интенсивности поля из-за волнения, поэтому максимальная величина аномалии распространения в осенних условиях (11–15 дБ) заметным об-

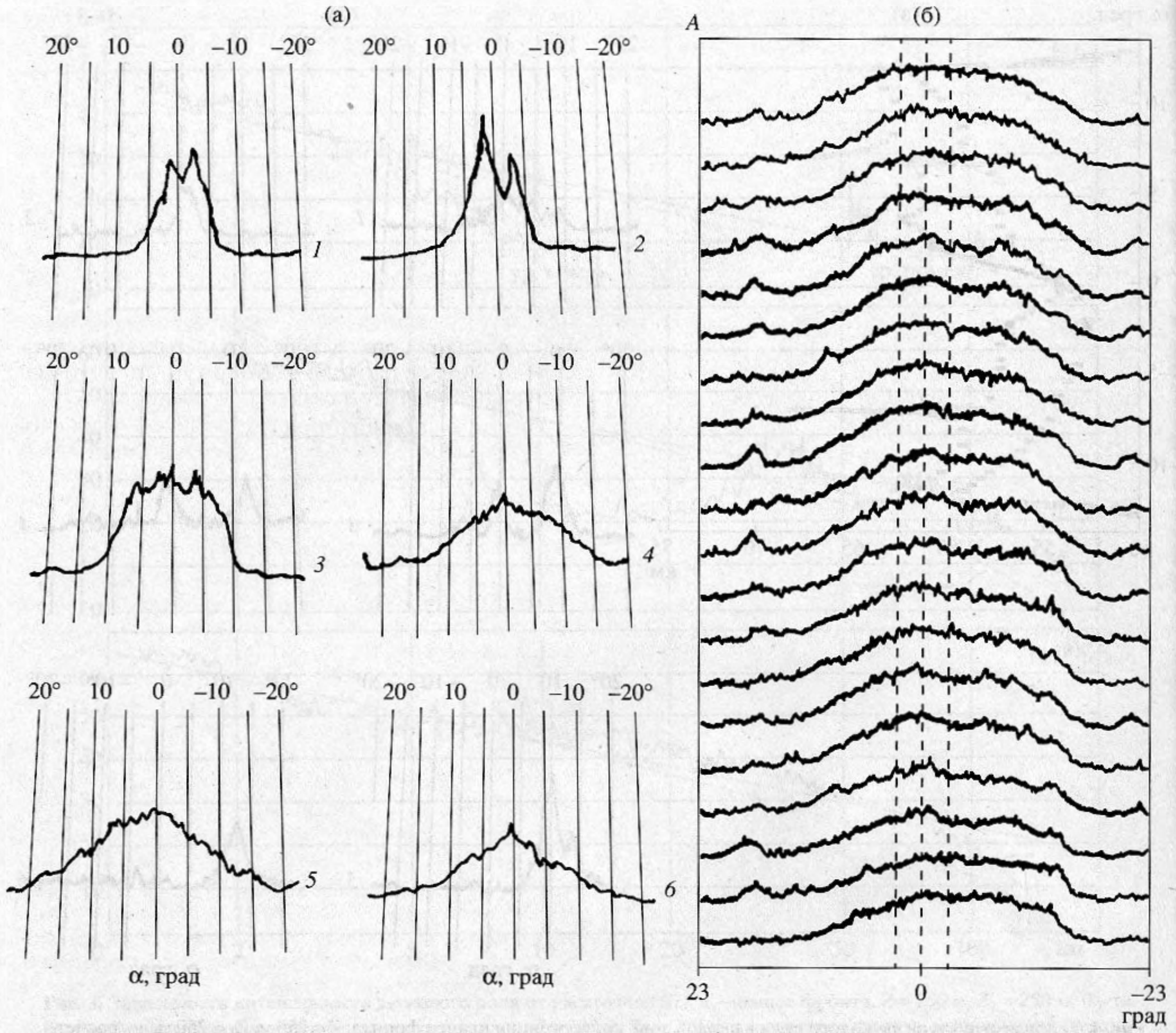

Рис. 5. Экспериментальная угловая структура звукового поля севернее фронта в условиях приповерхностного канала. а – примеры угловых спектров сигнала на расстояниях: *1*, *2* – 10 км, *3* – 63 км, *4* – 115 км, *5* – 212 км, *6* – 334 км. б – пример изменчивости углового спектра сигнала во времени на расстоянии 115 км, $Z = Z_1 = 100$ м.

разом превышает аналогичную величину для весенних условий (7–8 дБ).

Несмотря на приведенные сезонные различия в энергетической структуре поля, следует подчеркнуть основную общую закономерность, наблюдаемую севернее фронта в обоих случаях и определяемую близким расположением к поверхности как оси канала, так и горизонтов излучения и приема. Связана она с тем, что звуковое поле практически на всем протяжении ($r > 30$ км) формируется водными лучами, причем в каждую точку по трассе приходит большое число лучей. Последнее обстоятельство с учетом ограниченной разрешающей способности приемной антенны определяет, как правило, сплошной характер углового спектра сигнала, регистрируемого севернее фронта в любое время года. Подробное исследование экспериментальной угловой структуры поля севернее фронта проводилось в условиях весеннего распределения $C(z)$ и составляло основное содержание второго опыта в цикле работ, проводимом в марте 1990 года. Измерения углового спектра сигнала, а также его стабильности проводились в отдельных точках на трассе протяженностью от 10 км до 334 км при излучении псевдошумового сигнала в диапазоне частот 0.8–4.0 кГц и в 1/3-октавной полосе с центральной частотой $f = 1.25$ кГц при глубинах излучения 100 и 30 м и приеме в слое

100–400 м. На рис. 5а приведены примеры угловых спектров, зарегистрированные на дистанциях 10 км (кривые *1*, *2*), 63 км (кривая *3*), 115 км (кривая *4*), 212 км (кривая *5*) и 334 км (кривая *6*). Из приведенных данных следует, что только на близких расстояниях (до 10 км) в угловых спектрах прослеживаются дискретные максимумы, соответствующие отдельным приходам сигнала. С увеличением расстояния из-за большого количества лучей, формирующих поле в точке приема, а также из-за невозможности разрешения приемной антенной отдельных лучей или групп их, угловой спектр сигнала, как и предполагалось, становится сплошным. При этом чем больше расстояние, тем больший угловой сектор занимает сплошная часть спектра, а зависимость амплитуды спектра от угла прихода $A(\alpha)$ становится более однородной. В опыте были получены также данные о стабильности амплитуд отдельных составляющих углового спектра на различных расстояниях. На рис. 5б для примера приведена последовательность мгновенных реализаций углового спектра сигнала, зарегистрированного на дистанции 115 км при горизонтах излучения и приема, равных 100 м, иллюстрирующая его временную изменчивость приблизительно за 13 минут. На рисунке для каждой отдельной реализации углового спектра представлено изменение величины отклика приемной системы (A) на приходящий сигнал в зависимости от угла поворота диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости в диапазоне углов ±23°. Временнóй интервал между соседними реализациями составляет около 40 с. Флюктуации амплитуд углового спектра сигнала анализировались для трех направлений: 0°, –2.3° и +2.3°, отмеченных на графике пунктирными вертикальными прямыми. Величины среднеквадратичных отклонений для всех направлений были невелики и изменялись в пределах 0.07–0.08. Близкие результаты для сплошной части угловых спектров были получены и на других дистанциях.

Таким образом, на основании результатов всех трех опытов можно сделать вывод, что наличие фронтальной зоны, образованной течением Куросио, приводит к резкому изменению структуры звукового поля. Так, если к югу от нее поле, определяемое наличием в среде одного глубоководного подводного звукового канала, характеризуется пространственной зональной структурой с относительно высоким уровнем аномалии распространения на энергетически сильных участках и (из-за относительной малолучевости) дискретным угловым спектром сигнала, то к северу от нее, по причине резкого приближения оси канала к поверхности, звуковое поле характеризуется практически сплошной засветкой водными сигналами всего диапазона расстояний, в связи с чем максимальный уровень аномалии распространения заметно снижается, а угловой спектр (из-за большой многолучевости) становится сплошным. При этом сезонная изменчивость гидрологических условий, наблюдаемая севернее фронта, оказывая заметное влияние на структуру поля, не меняет радикально ее характер.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-02-19021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галкин О.П., Дымшиц А.М., Харченко Е.А., Швачко Л.В.* Экспериментальные исследования угловой структуры звуковых полей в районе Гольфстрима // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 6. С. 943–946.
2. *Munk W.H., Spindel R.C., Baggeroer A., Birdsall T.G.* The Heard Island Feasibiliti Test // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 96. № 4. P. 2330–2342.
3. *Howe B.M., Merker I.A., Spindel R.C., Georges T.M.* Nonperturbative Ocean Acoustic Tomography Inversion of 1000-km Pulse Propagation in the Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 96. № 5. P. 3054–3064.
4. *Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А.* Экспериментальные исследования угловой структуры звукового поля в океане // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1978. № 11. С. 80–84.
5. *Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А., Панкова С.Д., Дымшиц А.М.* Исследования "толщины" физических лучей в океане и влияние среды на корреляционные свойства сигнала // Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 118–133.
6. *Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А., Дымшиц А.М., Комиссарова Н.Н.* Особенности угловой и энергетической структуры звукового поля в океанических зонах конвергенции // Акустика в океане. М.: Наука, 1992. С. 114–127.
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.

Effect of the Frontal Zone on the Sound Field Structure

L. V. Shvachko

Experimental results are presented on the energy and angular structure of the underwater sound field generated by a noise source with the central frequency 3 kHz. The experiments were carried out to the south and to the north of the frontal zone formed by the Japan Current in the north-western Pacific. The results obtained to the north of the front are interpreted with allowance for the seasonal variability of the hydrological conditions.