АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 2, с. 264–273

## ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 550.341+550.834+621.319

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРИЕМА ВОЛН ФАЗИРОВАННЫМИ АНТЕННАМИ В МОРСКОМ ДНЕ НА ШЕЛЬФЕ

© 2007 г. Ю. М. Заславский, Б. В. Кержаков, В. В. Кулинич

*Институт прикладной физики РАН*
*603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46*
*E-mail: zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 08.12.05 г.

Выполнено численное моделирование волнового поля, возбуждаемого как одиночными источниками, так и вертикально ориентированной фазированной излучающей антенной в мелководном волноводе со слоистым упругим дном. Волновое поле регистрируется эквидистантными вертикальными антеннами с различной апертурой и при разной глубине установки в водном слое. В вертикальной плоскости демонстрируется характер распределения и трансформация углового спектра импульсных сигналов, приходящих на антенну при разных параметрах среды, несущих частотах и удалениях от источника. Показано, что путем селективного по углу приема обеспечивается лучшее разрешение годографов волн, используемых для зондирования дна. В качестве примера демонстрируется возможность выделения на плоскости годографов преломленной глубинным слоем волны сдвига, что достигается путем углового сканирования при излучении и при приеме антеннами вертикальной ориентации.

PACS: 43.30.Ma

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение структуры донной морской среды сейсмоакустическими методами проводится с середины прошлого столетия, причем за прошедшее время существенное усовершенствование претерпели как излучающие, так и приемные устройства, используемые при сейсмопрофилировании на акваториях [1–4]. Получили развитие и другие методы разведки [5]. К настоящему времени значительное внимание также уделяется численному моделированию сейсмоакустических полей в средах, образованных водной толщей и слоистым упругим дном, что представляет интерес для решения проблемы сейсмического профилирования донной среды в шельфовой зоне океана. В этой связи в настоящей работе рассматриваются задачи моделирования приема отраженных дном сигналов фазированной вертикальной антенной при зондировании как одиночным источником, так и вертикальной антенной гидроакустических излучателей. В первом случае ставится цель продемонстрировать возможность повышения пространственного разрешения картины волновых годографов, что достигается за счет приема волн с разных направлений в случае применения фазированной антенны приемников, и это принципиально отличается от приема на обычную сейсмическую косу, с помощью которой, как правило, обеспечивается лишь повышение отношения сигнал/шум. Во втором случае анализируется возможность концентрации энергии первичных сейсмических волн в области заданных горизонтов за счет использования фазированной излучающей антенны для повышения энергии сигналов, приходящих от донных осадков, что представляет интерес для разведки залежей нефти. Вместе с этим, происходит уменьшение влияния гидроакустических волн, являющихся в рассматриваемой задаче помехой. В расчетах использовался пакет "OASES" (2-Version) [6].

## МОДЕЛЬ СРЕДЫ И ПАРАМЕТРЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ

Расчетная модель слоистой структуры идентична ранее описанной в работах [7–9] и представляет собой подстилающее полупространство – кристаллический фундамент и три покрывающих слоя, включая верхний изоскоростной слой жидкости. Модель задана следующими значениями мощности слоев и акустических параметров среды, характеризующих ее плотностный и скоростной разрезы ($\rho$ – плотность среды, $V_P$ – скорость продольных, $V_S$ – скорость поперечных волн в среде): 1 – изоскоростной водный слой ($h_1 = 250$ м, $\rho_1 = 1$ г/см$^3$, $V_P^{(1)} = 1.5$ км/с), 2 – первый донный слой – слой осадков ($h_2 = 50$ м, $\rho_2 = 1.5$ г/см$^3$, $V_P^{(2)} = 1.6$ км/с, $V_S^{(2)} = 0.06$ км/с, $\alpha_P^{(2)} = 0.05$ дБ/м кГц, $\alpha_S^{(2)} = 0.5$ дБ/м кГц), 3 – второй донный слой ($h_3 =$

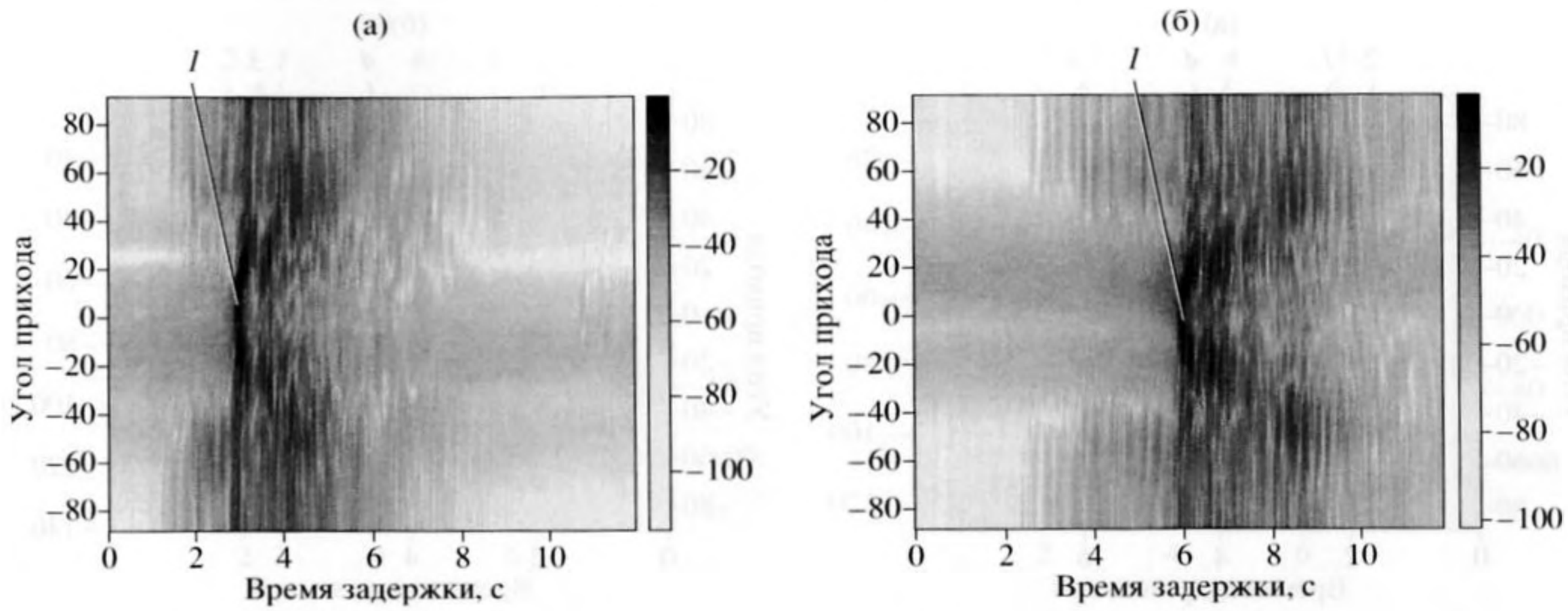


**Рис. 1.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–угол прихода волны" ($-90° < \theta < 90°$), $V_S^{(3)}$ = = 1 км/с, $f$ = 25 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 14 Гц, приемная антенна – 9 гидрофонов с шагом расстановки 25 м и апертурой – 200 м, расстояние источник–приемная антенна: а – 4.5 км, б – 9 км.

= 300 м, $\rho_3$ = 2.1 г/см$^3$, $V_P^{(3)}$ = 2.5 км/с, I – $V_S^{(3)}$ = 1 км/с, II – $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с, $\alpha_P^{(3)}$ = 0.03 дБ/м кГц, $\alpha_S^{(3)}$ = = 0.1 дБ/м кГц), 4 – жесткий фундамент ($\rho_4$ = = 2.5 г/см$^3$, $V_P^{(4)}$ = 4 км/с, $V_S^{(4)}$ = 2.5 км/с, $\alpha_P^{(4)}$ = = 0.02 дБ/м кГц, $\alpha_S^{(4)}$ = 0.1 дБ/м кГц). При моделировании использованы два значения скорости волн сдвига во втором донном слое: I – $V_S^{(3)}$ = 1 км/с, II – $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с. Использование двух последних вариантов связано с тем, что появление флюидонасыщенных включений в этой области среды в первую очередь влечет за собой вариацию величины скорости сдвиговых волн.

Исследования проведены в сейсморазведочном диапазоне частот до 75 Гц с использованием импульсного режима излучения с шириной спектра излучаемых сигналов до $\Delta f$ = 14 Гц. В качестве источников излучения используется одиночный ненаправленный излучатель малых волновых размеров, располагающийся в одном метре от дна, а также линейная вертикальная фазированная излучающая антенна, перекрывающая значительную часть волновода. По результатам численного моделирования получены тоновые картины волнового поля на плоскостях "время задержки импульса–угол прихода волны", определяющие вертикальный угловой спектр, и "время задержки импульса–горизонтальная дальность приема", отображающие картину волновых годографов.

## ВЕРТИКАЛЬНЫЕ УГЛОВЫЕ СПЕКТРЫ

Вертикальные угловые спектры волн, изображаемые на плоскости "время прихода–угол", дают распределение их энергии в вертикальном сечении и важны с точки зрения выбора углов фазирования антенн для регистрации сигналов, несущих информацию о донной структуре и их параметрах. Поскольку при регистрации волн гидроакустической антенной угловое разрешение зависит от ее апертуры, в дальнейшем использованы антенны с различными апертурами, включая и перекрывающие практически весь водный слой. Используемый в антенне пространственный шаг расстановки датчиков варьировался от 5 м до 30 м.

Ниже представлены некоторые результаты модельного эксперимента по исследованию угловых спектров для рассматриваемых моделей среды. На рис. 1 в логарифмическом масштабе (степень потемнения соответствует интенсивности) изображены нормированные на максимальное значение угловые спектры для случая возбуждения поля одиночным гидроакустическим источником и приема сигналов на вертикальную антенну, удаленную от источника на расстояние 4.5 км (рис. 1а) и 9 км (рис. 1б). Антенна с апертурой 200 м состоит из 9 гидрофонов с шагом расстановки 25 м и расположена в 25 м от дна. Координатными осями на тоновых картинах являются время задержки (ось $X$) и угловая координата (ось $Y$). Численный расчет выполнен применительно к импульсам с несущей частотой 25 Гц и полосой 14 Гц, а в качестве модели дна используется первый из вариантов среды со скоростью

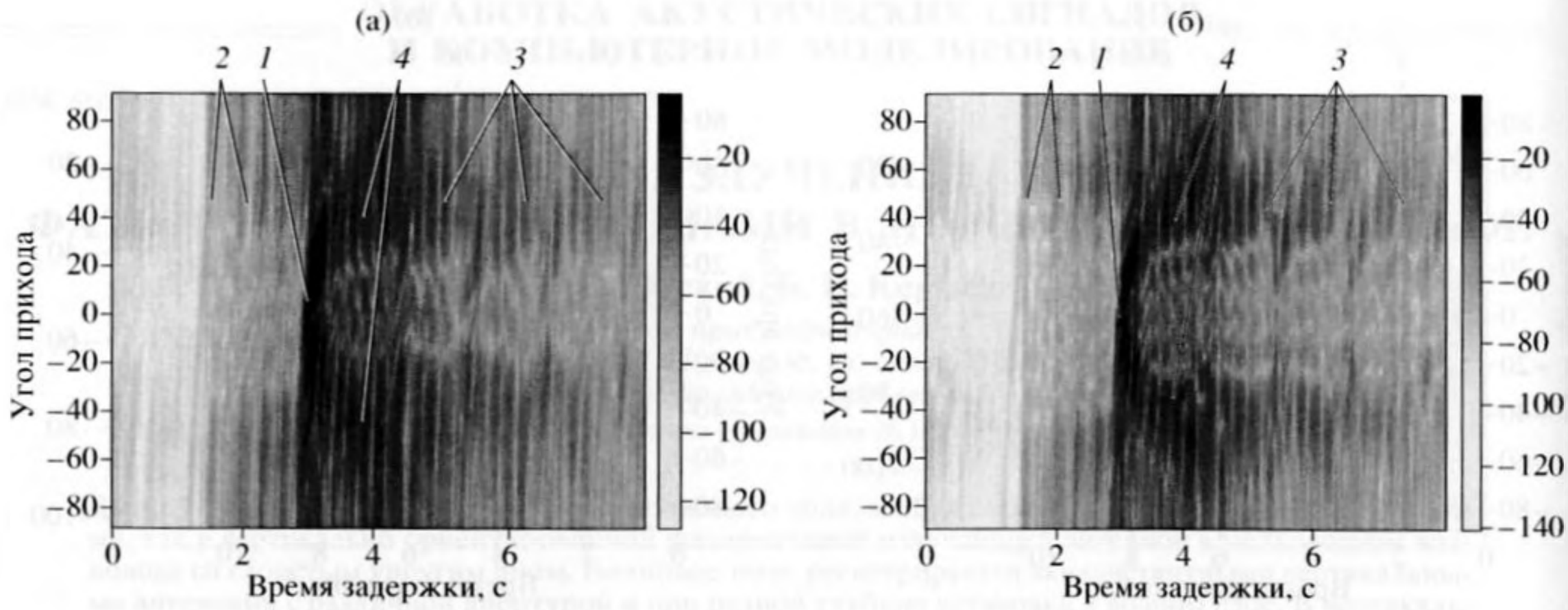


**Рис. 2.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–угол прихода волны" ($-90° < \theta < 90°$), $V_S^{(3)} = 0.5$ км/с, $f = 25$ Гц, полоса частот $\Delta f = 14$ Гц, дистанция источник–приемная антенна – 4.5 км, межэлементное расстояние в антенне 5 м, апертура: а – 145 м (30 элементов), б – 245 м (50 элементов).

волн сдвига в области второго донного слоя $V_S^{(3)} = 1$ км/с. Здесь импульсы, несущие наиболее заметную долю энергии, представляют сигналы старших волноводных мод под углами скольжения, близкими к нулевому (стрелка *1*). С ростом времени задержки вступают моды более высоких номеров, углы прихода которых увеличиваются с номером моды. Их запаздывание объясняется более низкими значениями групповых скоростей и связано с частотной дисперсией в гидроакустическом канале. С дисперсией связано и появление *U*-образной структуры в текущем угловом спектре волн. Конечная угловая ширина разрешаемых по времени групп мод и небольшой наклон определяются шириной спектра излучаемых импульсных сигналов и уменьшением групповых скоростей с понижением частоты. Наряду с этим на углах от ±40° и больших по модулю наблюдаются приходы и более ранних по времени вступления сигналов, преломленных границами глубоко залегающих слоев.

На рис. 2 приводятся аналогичные зависимости при той же несущей частоте в случае, когда $V_S^{(3)} = 0.5$ км/с и дальность до источника составляет 4.5 км. Текущий угловой спектр на рис. 2а соответствует антенне из 30 гидрофонов, имеющей апертуру 145 м, с расстоянием между элементами 5 м и с 5-метровым удалением от дна. На рис. 2б представленный спектр соответствует более развитой по вертикали антенне с апертурой 245 м, состоящей из 50 гидрофонов, с тем же межэлементным расстоянием и отстоящей от дна на 5 м. Угловой спектр, как видно из этого рисунка, несколько видоизменяется относительно предыдущего случая. Как и на последующих рисунках, дающих текущие волновые спектры, стрелкой *1* здесь помечена первая мода гидроакустической волны, стрелкой *2* – несколько импульсов-кратников, переносимых преломленными волнами, имеющими более высокие скорости распространения и идущими под углами, большими 40° по модулю. Стрелки *4* указывают на сигналы с увеличивающимся с номером моды временем прихода, природа которых пояснена выше. Веер их углов со временем запаздывания расширяется от нулевого значения до ±40°...±60°. Стрелками *3* обозначены волны, возникающие вследствие многократного проникания через первую донную границу первой и высших гидроакустических мод с преобразованием в *S*-волну в первом донном слое. После отражения этих волн от второй донной границы и прохождения первой границы в обратном направлении имеет место волновой обмен с преобразованием в гидроакустическую волну, принимаемую гидрофонами в водной среде. Этим можно объяснить кратность по времени вступления *U*-образной структуры текущего углового спектра этих волн.

Сравнение угловых спектров рис. 2а и рис. 2б показывает, что увеличение апертуры приемной антенны приводит к заметному увеличению контраста картины на плоскости "время прихода волны–угол". Сравнение тоновых картин угловых спектров на рис. 1а и рис. 2а,б показывает, что при понижении жесткости второго донного слоя появляются волны-кратники, возникающие вследствие многократного волнового обмена на первой донной границе и отражения от второй,

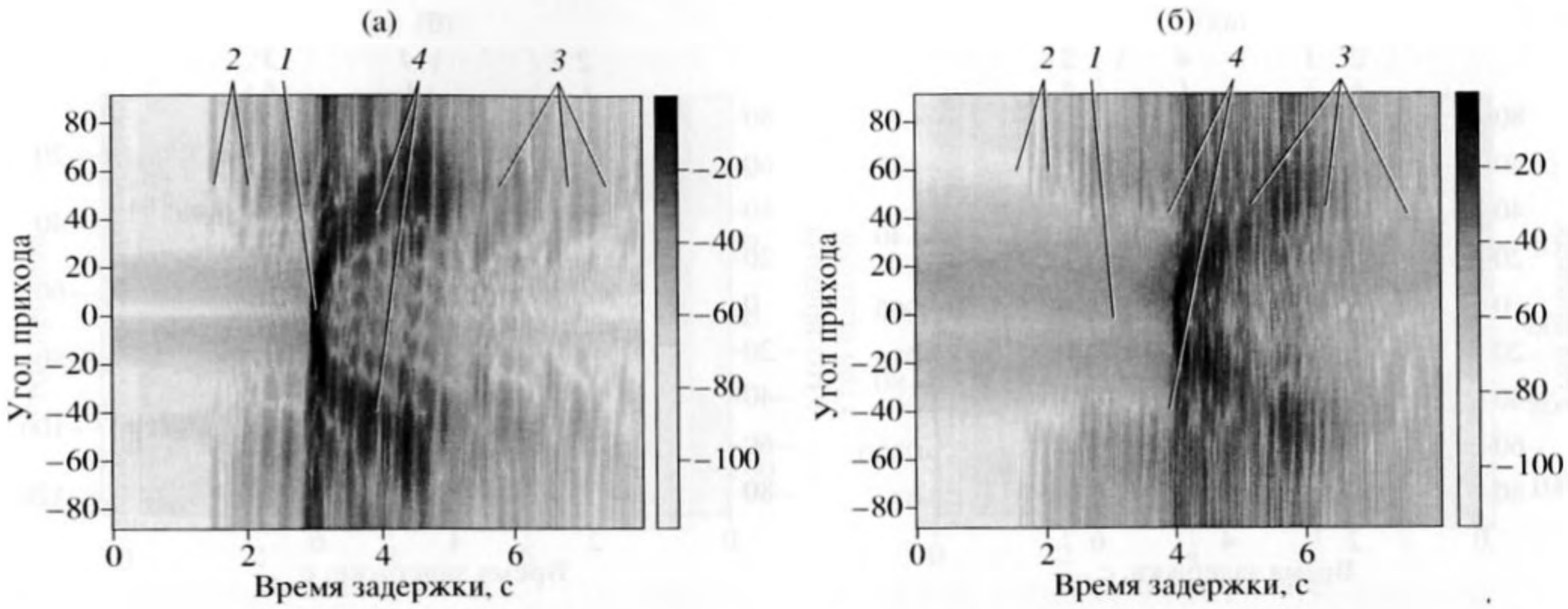


**Рис. 3.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–угол прихода волны" ($-90° < \theta < 90°$), $V_S^{(3)}$ = = 0.5 км/с, $f$ = 45 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 25 Гц, дистанция источник–приемная антенна 4.5 км, межэлементное расстояние в антенне 5 м, апертура: а – 145 м (30 элементов), б – 245 м (50 элементов).

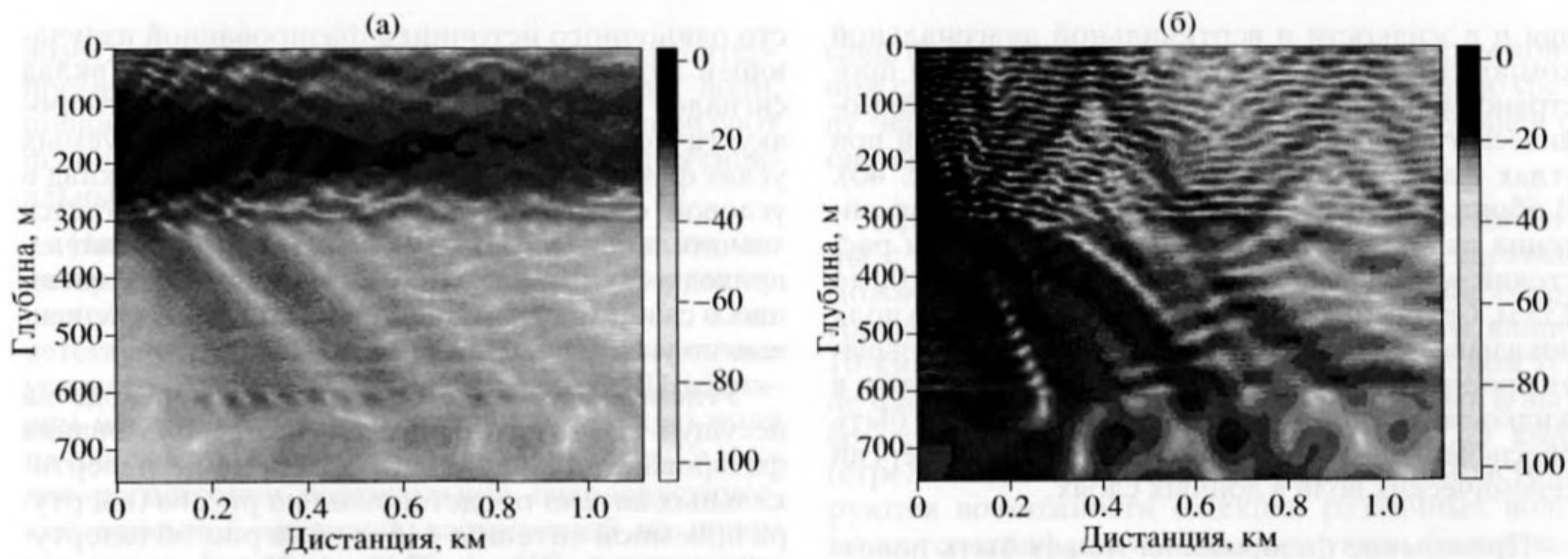


**Рис. 4.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "глубина–дальность". $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с. Режим гармонического излучения на частоте 45 Гц, угол фазирования излучающей антенны:
а – 0°, б – –30°.

чего не было в случае жесткого второго донного слоя.

На рис. 3а,б приводятся аналогичные угловые спектры волн с более высокой несущей частотой импульса $f$ = 45 Гц (полосой $\Delta f$ = 14 Гц) и с неизменными значениями остальных параметров среды, источника и приемной антенны, используемых в предыдущем расчете. Переход к повышенной несущей частоте показывает, что имеет место усиление контрастности угловых спектров, изображаемых на тоновой картине. В угловом спектре присутствуют все ранее перечисленные типы волн, обозначенные стрелками тех же номеров, как и на рис. 2. Наличие $U$-образных областей (стрелки *3* и *4*), как было отмечено выше, свидетельствует о присутствии высших мод в гидроакустическом отклике и в отклике, обусловленном многократным волновым обменом на донных границах.

Использование излучающей антенны с возможностью фазирования в вертикальной плоскости позволяет, в отличие от одиночного источника, регулировать перераспределение излучаемой энергии по вертикальному углу. Для демонстрации этого положения на рис. 4 даны тоновые картины распределения поля (акустического давле-

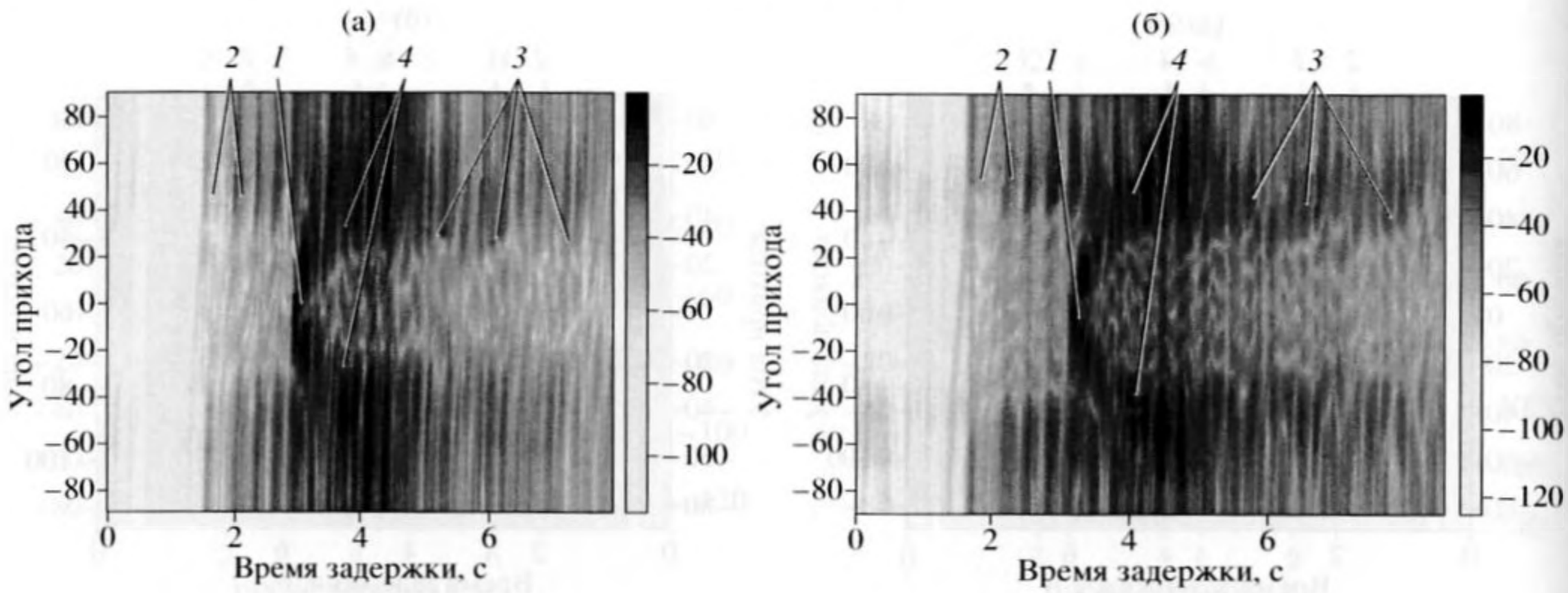


**Рис. 5.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–угол прихода волны" ($-90° < \theta < 90°$), $V_S^{(3)}$ = = 0.5 км/с, $f$ = 25 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 14 Гц, расстояние между излучающей и приемной антеннами 4.5 км, излучающая антенна из 10 элементов, шаг 15 м, перекрытие глубин 100–245 м, межэлементное расстояние в приемной антенне 5 м, апертура: а – 145 м (30 элементов), б – 245 м (50 элементов).

ния $p$ в жидкости и вертикальной диагональной компоненты тензора напряжений в донном пространстве $\sigma_{zz}$) на частоте $f$ = 45 Гц в режиме гармонического излучения вертикальной антенной при углах фазирования 0° (рис. 4а) и –30° (рис. 4б). В обоих случаях излучающая вертикальная антенна из 10 излучателей с межэлементным расстоянием 15 м располагается на глубине от 100 до 235 м. Сравнение тоновых картин звукового поля показывает, что смена угла фазирования вызывает пространственное перераспределение поля и в жидкости, и в донной среде, при этом может быть обеспечена повышенная концентрация энергии сейсмических волн в донных слоях.

Применение фазирования может быть полезным не только в приемных антеннах, но и при излучении сигналов, позволяя концентрировать энергию в заданных областях пространства. В качестве примера рассмотрим результаты численного моделирования вертикального углового спектра волн, когда в качестве источника используется не одиночный всенаправленный излучатель, а излучающая вертикальная антенна из 10 излучателей с межэлементным расстоянием 15 м, располагающаяся на глубине от 100 до 235 м. Угловые спектры волн, возбуждаемых вертикальной излучающей антенной с углом фазирования –30° и принимаемых на вертикальную антенну, представлены на рис. 5. Как и раньше, для сравнения рассмотрены случаи приема волновых импульсных сигналов с несущей частотой $f$ = 25 Гц на вертикальную антенну с апертурой 145 м (рис. 5а) и на антенну с апертурой 245 м (рис. 5б). Сравнение угловых спектров на рис. 5 с аналогичными на рис. 2 показывает, что применение вместо одиночного источника фазированной излучающей антенны дает возможность снизить вклад сигналов старших мод в угловом спектре гидроакустической волны. Однако при используемых углах фазирования излучающей антенны вклад в угловой спектр сигналов высших мод остается значительным (стрелки *4*). Стрелками *2* обозначен приход импульсов высокоскоростных волн, имеющих в своем угловом спектре максимумы, смещенные по углу больше, чем на 40° по модулю.

Угловые волновые спектры при переходе на несущую частоту 45 Гц в случае использования фазированной излучающей и приемной вертикальных антенн представлены на рис. 6а (апертура приемной антенны 145 м) и на рис. 6б (апертура приемной антенны 245 м). Из рассмотрения этих спектров, соответствующих волновым импульсам с повышенной несущей частотой, легко видеть возможности дальнейшего резкого повышения пространственного разрешения на тоновой картине волновых годографов, участвующих в зондировании слоистой донной среды.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ ВОЛНОВЫХ ГОДОГРАФОВ ПРИ ПРИЕМЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИГНАЛОВ ОДИНОЧНОГО ИСТОЧНИКА

Использование вертикальных фазированных антенн, обладающих направленными свойствами в вертикальной плоскости, позволяет селектировать сигналы, приходящие с различных направлений. Следовательно, представляется возможным при определенных углах фазирования приемной антенны выделить годографы сдвиговых волн,

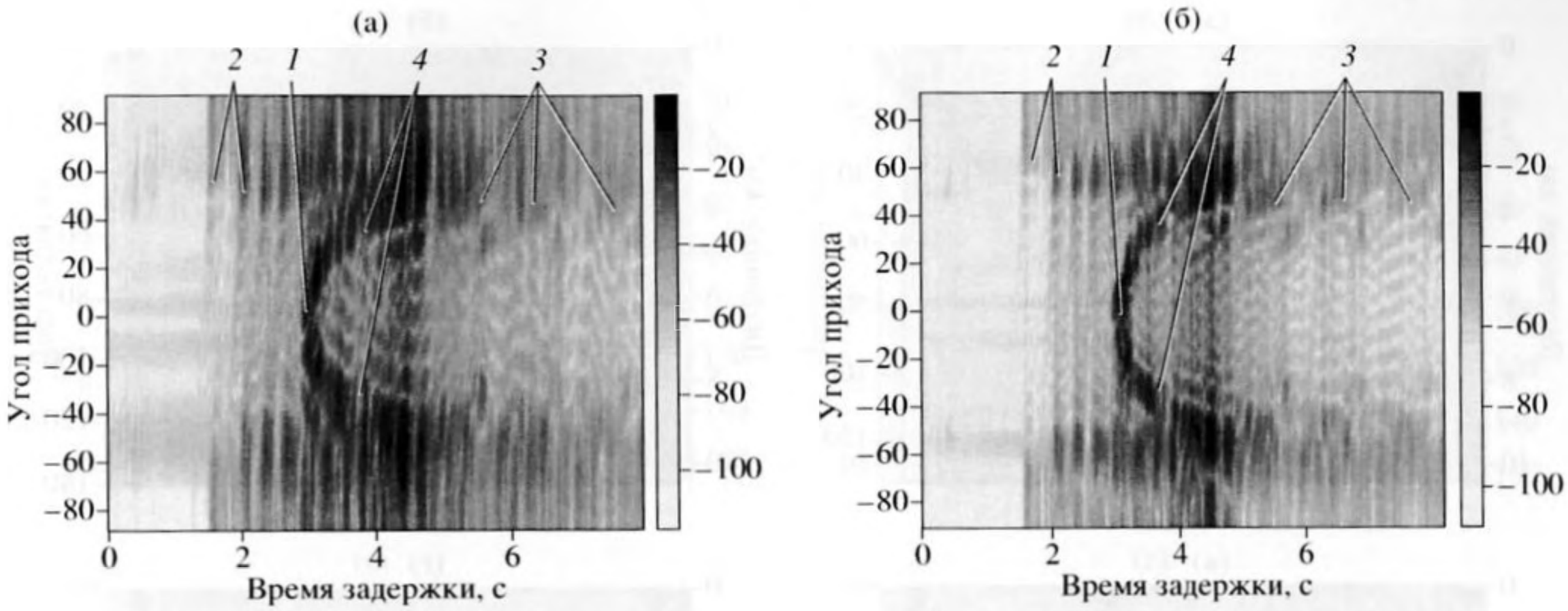


**Рис. 6.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–угол прихода волны" ($-90° < \theta < 90°$), $V_S^{(3)}$ = = 0.5 км/с, $f$ = 45 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 14 Гц, расстояние между излучающей и приемной антеннами 4.5 км, излучающая антенна из 10 элементов, шаг 15 м, перекрытие глубин 100–245 м, межэлементное расстояние в приемной антенне 5 м, апертура: а – 145 м (30 элементов), б – 245 м (50 элементов).

возбуждаемых в донных слоях, и точнее интерпретировать и определять скорости этих волн, пониженные значения которых характеризуют флюидосодержащие слои, являющиеся потенциальным резервуаром нефтезалежи.

Ниже приводятся результаты численного моделирования волновых годографов при различных углах фазирования приемной антенны, соответствующих различным участкам вертикального углового спектра акустического поля. Представим несколько тоновых картин волнового поля на плоскости "время задержки–дальность" в случае регистрации вертикальной гидроакустической приемной антенной, настроенной на прием для углов фазирования 0° и –60°, отвечающих максимальным значениям сигнала.

На рис. 7 изображены картины годографов волновых импульсов с несущей частотой 25 Гц и полосой 14 Гц при углах фазирования антенны 0° (рис. 7а) и –60° (рис. 7б) при значении скорости волн сдвига во втором донном слое $V_S^{(3)}$ = 1 км/с. На рис. 7а видны несколько годографов, соответствующих приходу волн со скоростью 1.5 км/с и ~1 км/с. Регистрация сигналов осуществлялась с использованием антенной решетки из 8 гидрофонов с шагом 30 м, находящейся на удалении 15 м от дна. Ярко выраженный годограф (стрелка *1*) соответствует 1-й волноводной моде гидроволны, обнаруживаемой на протяжении всей 10-километровой трассы. Кроме того, наблюдаются слабо выраженные годографы младших волноводных мод, распространяющихся в водном слое, а также годограф (стрелка *2*), соответствующий сдвиговой волне, локализованной во втором донном слое с частичным прониканием в водную среду через донные границы и интерферирующей с одной из младших волноводных мод.

При смене угла фазирования приемной антенны с нулевого на угол –60° на тоновой картине можно видеть существенное преобладание годографа волны сдвига (стрелка *2*) на всей длине 10-километровой трассы (рис. 7б). При новом угле фазирования становятся обнаружимыми и высокоскоростные волны со скоростями 2.5 км/с (стрелка *3*) и 4 км/с (стрелка *4*). Этим демонстрируются возможности селекции различных волн по их годографам путем выбора углов фазирования приемной антенны, соответствующих различным участкам вертикальных угловых спектров волн, регистрируемых в водном слое.

Переход на повышенную частоту 45 Гц приводит к обострению контраста всех линий годографа на тоновой картине волнового поля на плоскости "время задержки–дальность". При этом еще более заметным становится выбор угла фазирования приемной антенны. Если указанный угол принят равным 0° (см. рис. 7в), то кроме годографа основной моды гидроакустической волны ясно проявляется и другой – годограф взаимно интерферирующих сдвиговой волны второго донного слоя и одной из высших мод гидроакустического канала, совпадающей с ней по скорости ($V_S^{(3)}$ = 1 км/с). Если же указанный угол выбран равным –60° (см. рис. 7г), то последний из указанных годографов сильно размывается, но обостря-

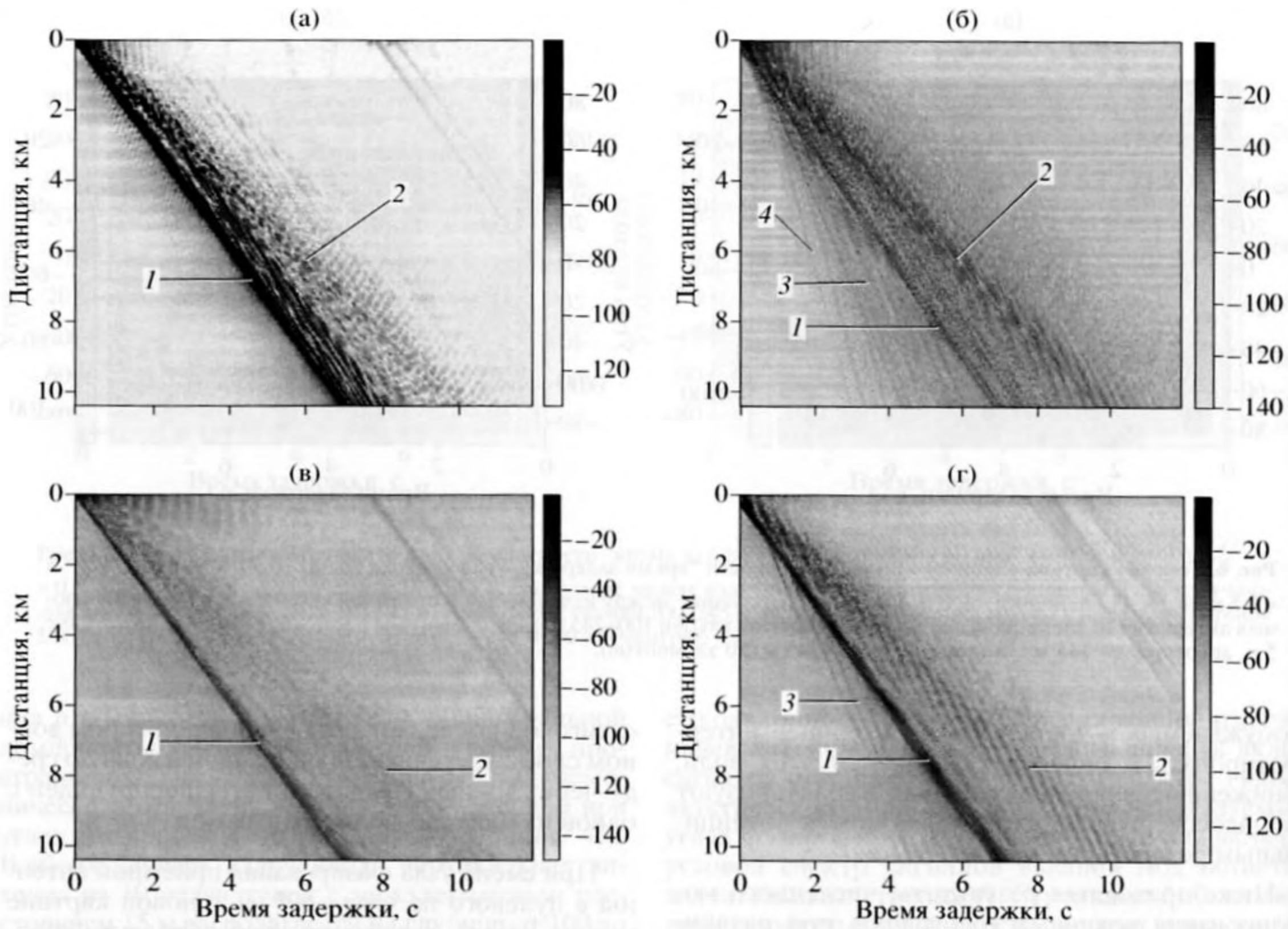


**Рис. 7.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–дальность". $V_S^{(3)}$ = 1 км/с, одиночный излучатель, приемная антенна из 8 элементов (шаг 30 м, удаление от дна 15 м).
Несущая частота $f$ = 25 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 14 Гц,
угол фазирования: а – 0°, б – –60°.
Несущая частота $f$ = 45 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 14 Гц,
угол фазирования: в – 0°, г – –60°.

ются линии годографов высокоскоростных преломленных волн-кратников ($V_P^{(3)}$ = 2.5 км/с).

Переходя ко второму варианту среды, с пониженным значением скорости волн сдвига ($V_S^{(3)}$ = = 0.5 км/с), также рассмотрим два случая, в которых излучаемые импульсы имеют несущие частоты 25 Гц и 45 Гц. На рис. 8а,б показаны тоновые картины годографов, соответствующие приему зондирующего импульса на первой из указанных частот при углах фазирования 0° (рис. 8а) и –60° (рис. 8б). На рис. 8а можно видеть годограф 1-й волноводной моды (стрелка *1*), а также семейство линий годографов высокоскоростных преломленных волн-кратников (стрелки *3*, *4*). Качественно эти картины отличаются появлением кратников основной моды гидроакустической волны, период которых близок к 1.5 с. Их природа, в соответствии с [8, 9], связана с многократным волновым обменом, т.е. преобразованием гидроакустической волны в *S*-волну при падении на первую донную границу, отражением этой волны от нижней границы второго донного слоя и превращением вновь в гидроакустическую при проникании в жидкость на обратном пути к приемной антенне. Выбор в качестве угла фазирования – 60° (рис. 8б) позволяет повысить контраст высокоскоростных преломленных волн (стрелки *3*, *4*), при этом появляется веер высших гидроакустических мод (стрелка *2*) со скоростями, меньшими 1.5 км/с.

На рис. 8в,г представлены картины волнового поля, соответствующие импульсному сигналу с более высокой несущей частотой 45 Гц и частотной полосой 14 Гц, когда прием осуществляется

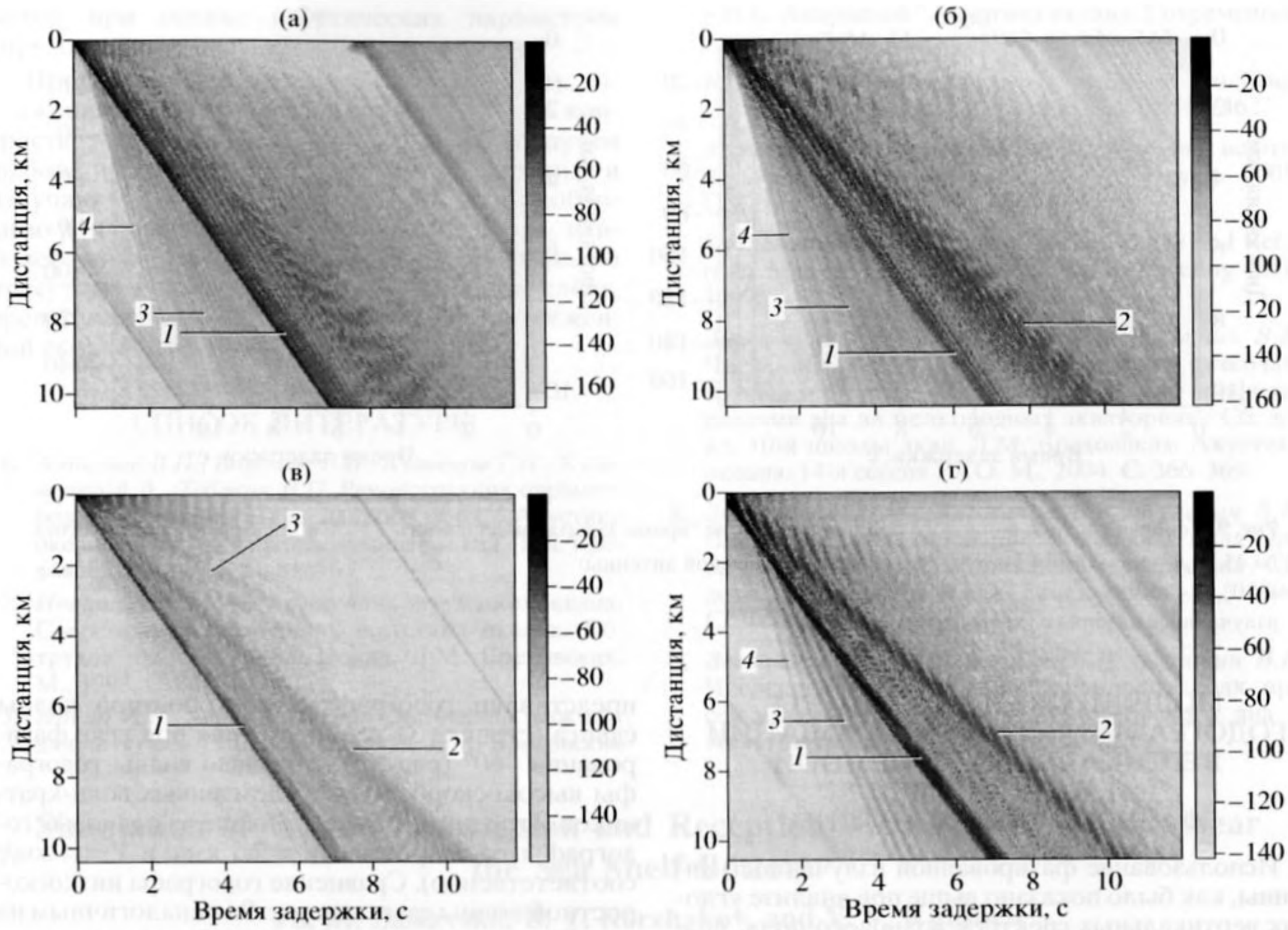


**Рис. 8.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–дальность". $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с, одиночный излучатель, приемная антенна из 8 элементов (шаг 30 м, удаление от дна 15 м).
Несущая частота $f$ = 25 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 14 Гц,
угол фазирования: а – 0°, б – –60°.
Несущая частота $f$ = 45 Гц, полоса частот $\Delta f$ = 14 Гц,
угол фазирования: в – 0°, г – –60°.

антенной с параметрами, аналогичными предыдущему случаю. Так, на рис. 8в дается плоскость годографов, соответствующая углу фазирования приемной антенны 0°. Здесь кроме основной (стрелка *1*) и младших волноводных мод гидроакустической волны (стрелка *2*), также появляется годограф волны сдвига во втором донном слое с низкой скоростью ~0.5 км/с (стрелка *3*), несущий информацию о возможно повышенном в нем флюидосодержании. При этом дистанция от источника до точки, где ее легко обнаружить, составляет не менее 3 км, что демонстрирует возможность регистрации волны требуемого типа в реальном эксперименте путем оптимального выбора несущей частоты сигнала и угла фазирования приемной антенны. На рис. 8г при угле фазирования антенны –60° отчетливо проявляются годографы волноводных мод (стрелки *1* и *2*) и уверенно выделяются годографы высокоскоростных волн, преломленных на границе первого и второго донных слоев ($V_P^{(3)}$ = 2.5 км/с) (стрелка *3*), а также второго донного слоя и кристаллического фундамента ($V_P^{(4)}$ = 4 км/с) (стрелка *4*). Однако при указанном угле фазирования не выделяется ранее обнаруживаемый годограф волны сдвига во втором донном слое, имеющей скорость ~0.5 км/с.

Представленные результаты иллюстрируют возможность получения лучшего разрешения и более резкого контраста на тоновой картине линий годографов принимаемых волн, обеспечиваемых оптимальным выбором частоты и угла фазирования антенны при использовании вертикальных приемных антенн.

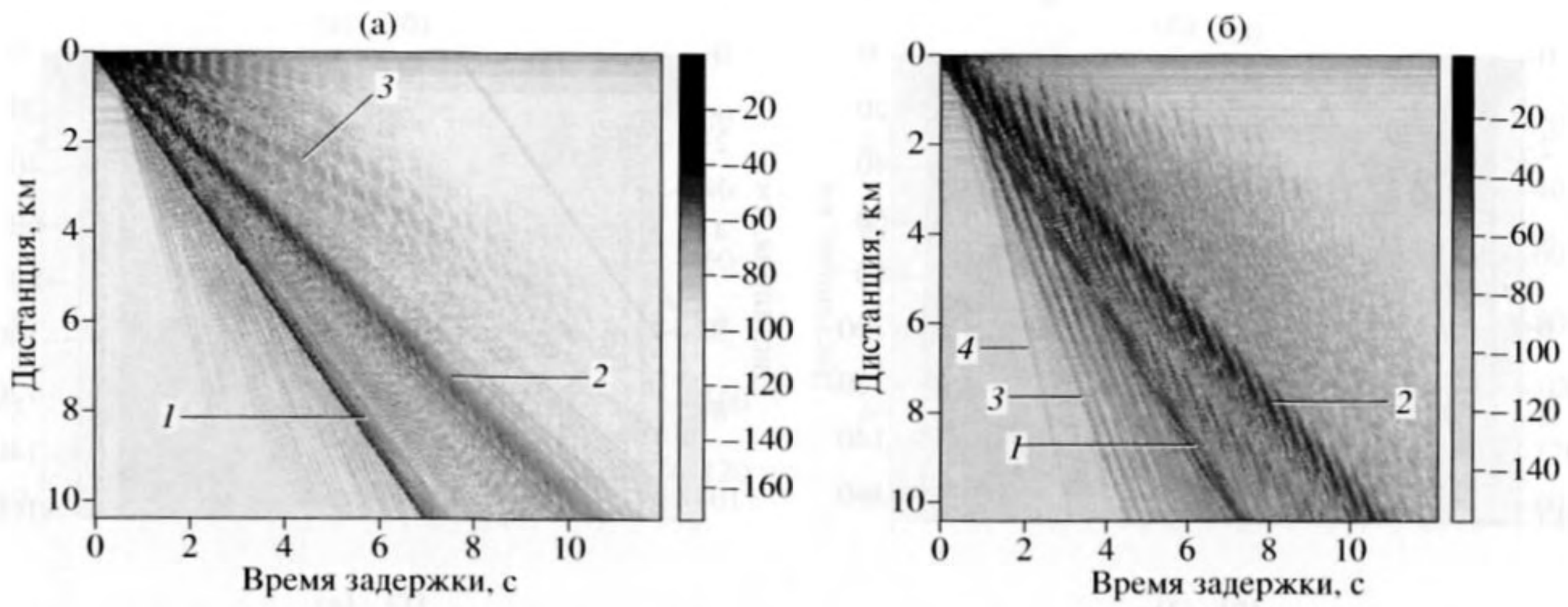


**Рис. 9.** Тоновая картина волнового поля на плоскости "время задержки–дальность". $V_S^{(3)}$ = 0.5 км/с, несущая частота $f$ = 45 Гц, полоса $\Delta f$ = 14 Гц, угол фазирования приемной антенны:
а – 0°, б – –60°,
излучающая антенна с углом фазирования –30°.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ ГОДОГРАФОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРИЕМНОЙ И ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕНН

Использование фазированной излучающей антенны, как было показано выше при анализе угловых вертикальных спектров волнового поля, позволяет обеспечить более интенсивное озвучивание донных слоев и существенно снизить возбуждение гидроакустических волноводных мод, которые являются помехой при оценке акустических параметров дна. Для демонстрации указанной возможности выполнено численное моделирование распределения акустического поля в исследуемом канале при его возбуждении излучающей вертикальной антенной решеткой.

По сравнению с одиночным излучателем работа излучающей антенны в импульсном режиме обеспечивает более высокую эффективность зондирования среды. Для иллюстрации данного утверждения на рис. 9а,б даются тоновые картины волновых годографов, полученные с использованием излучающей вертикальной антенны с углом фазирования –30°, демонстрирующие выигрыш при регистрации сейсмоакустических полей. Излучаемые импульсы имеют центральную частоту $f$ = 45 Гц и ширину полосы $\Delta f$ = 14 Гц. Регистрация сигналов осуществляется вертикальной приемной антенной, состоящей из 8 гидрофонов, имеющих шаг расстановки 30 м, с удалением ее от дна – 15 м, при углах фазирования 0° (рис. 9а) и –60° (рис. 9б).

При настройке приемной антенны на нулевой угол фазирования (рис. 9а) более контрастно представлен годограф низкоскоростной волны сдвига (стрелка *3*), в то время как при угле фазирования –60° (рис. 9б) отчетливо видны годографы высокоскоростных преломленных волн-кратников (стрелки *3*, *4*, указывающие на волновые годографы со скоростью $V$ = 2.5 км/с и $V$ = 4 км/с соответственно). Сравнение годографа низкоскоростной волны сдвига на рис. 9а с аналогичным на рис. 8а показывает значительно большие яркость и контраст линии-годографа (а следовательно, и дальности приема) при использовании излучающей антенны по сравнению с одиночным источником.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований:

В рамках решения проблемы акустической томографии дна и донных осадков проведено исследование сейсмоакустического поля в диапазоне частот ниже 100 Гц, создаваемого в жидкости и в слоистой упругой донной среде ненаправленными гидроакустическими источниками и вертикальными фазированными излучающими антеннами, установленными на мелководной акватории.

Определены основные типы возбуждаемых и рассеянных волн, представленные соответствующими годографами, а также проанализированы волновые угловые спектры. Показано, что за счет применения антенных решеток удается выбрать оптимальные углы фазирования, при которых обеспечивается более интенсивное озвучивание донных слоев и существенно снижается уровень гидроакустических мод, являющихся по-

мехой при оценке акустических параметров упругого дна.

Продемонстрирована также возможность достижения высокого разрешения и резкого контраста тоновых картин волновых полей путем выбора частоты и угла фазирования приемных и излучающих вертикальных антенн, что необходимо для возбуждения и селекции сигналов, наиболее информативных при поиске признаков присутствия нефтезалежи в придонных слоях, представляющих собой области дна с пониженной скоростью волн сдвига.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Антонов В.П., Бородин В.В., Кузнецов Г.Н., Кузьменко А.А., Тебякин В.П.* Реконструкция параметров многослойного дна мелкого моря / Акустика океана: Сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М., 1998. С. 91–96.
2. *Ивакин А.Н.* Модели рассеяния звука дном океана. Современное состояние / Акустика океана: Сб. трудов школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М., 1998. С. 84–91.
3. *Ильин А.В.* Характеристики дна океана, важные для акустики // Сб. под ред. акад. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой "Акустика океана. Современное состояние". М.: Наука, 1982. С. 226–242.
4. *Брайан Л.* Подводный звук в морской геологии. Подводная акустика. М.: Мир, 1970. С. 449–462.
5. *Хавкин А.Я., Чернышев Г.И.* Томография нефтенасыщенных пористых сред. М.: Наука, 2005. С. 271.
6. *Schmidt H.* Oases. Version 2.2. User Guide and Reference Manual. Department of Ocean Engineering. MIT, 1999.
7. *Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В.* Численное моделирование структуры низкочастотных упругих полей при сейсмическом профилировании дна на мелководных акваториях / Сб. докл. 10-й школы акад. Л.М. Бреховских. Акустика океана: 14-я сессия РАО. М., 2004. С. 366–369.
8. *Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В.* Численное моделирование волнового поля при сейсмическом профилировании морского дна / Сб. докл. 15-й сессии РАО. Геоакустика, М., 2004. С. 305–309.
9. *Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В.* Численное моделирование волнового поля при сейсмическом профилировании морского дна // Акуст. журн. 2005. Т. 51. С. 645–651.


# Simulation of Wave Transmission and Reception with Phased Arrays Near the Sea Shelf Bottom


**Yu. M. Zaslavskiĭ, B. V. Kerzhakov, and V. V. Kulinich**

*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhni Novgorod, 603950 Russia*

*e-mail: Zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru*



**Abstract**—The wave field excited by both single sources and a vertically directed phased transmitting array in a shallow-water waveguide with a layered elastic bottom is numerically simulated. The receivers are equispaced vertical arrays with different apertures, which are positioned at different depths in the water layer. The type of distribution and the transformation of the angular spectrum of pulsed signals arriving at a receiving array are demonstrated for different parameters of the medium, different carrier frequencies, and different distances from the source. It is shown that a selective angular reception ensures a better resolution of the travel-time curves of waves used for sounding the bottom. As an example, the possibility of singling out the shear wave refracted by a deep-seated bottom layer from the tone pattern of the travel-time curves is demonstrated. This possibility can be realized by means of angular scanning in the course of transmission and reception with the use of vertically oriented arrays.