

УДК 551.463

АЗИМУТАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ВЗРЫВНЫХ СИГНАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ В ПРИБРЕЖНОМ КЛИНЕ

© 1997 г. О. П. Галкин, А. В. Микрюков, О. Е. Попов, Р. Ю. Попов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 26.06.96 г.

Исследовалась азимутальная изменчивость пространственной корреляции сигналов от толовых зарядов, сбрасываемых с самолетов, летящих вдоль дуги окружности радиусом 700 км. Центр окружности находился в районе размещения двух приемных гидрофонов, лежащих на дне вдоль изобаты 300 м на расстоянии 10 км друг от друга. Азимутальные углы изменялись в диапазоне от 55° до -60° относительно нормали к линии изобат. Анализ сигналов проводился в полосе частот от 37 до 57 Гц. Значения кратковременной функции корреляции по участкам сигналов, соответствующим вступлениям отдельных мод или группы мод соседних номеров, достигают величины 0.7–0.9. Наблюдается ярко выраженная азимутальная зависимость.

Исследования океана гидроакустическими средствами сопряжены с необходимостью приема слабых сигналов на фоне помех. Этим обстоятельством вызвано применение приемных антенн с большими апертурами. Эффективность таких антенн тесно связана со степенью пространствен-

ной корреляции звукового поля полезного сигнала. Задача осложняется тем, что пространственно развитые антенны, как правило, размещаются недалеко от берега, а в условиях прибрежного клина при малых угловых раскрытиях большую роль в формировании звукового поля играют

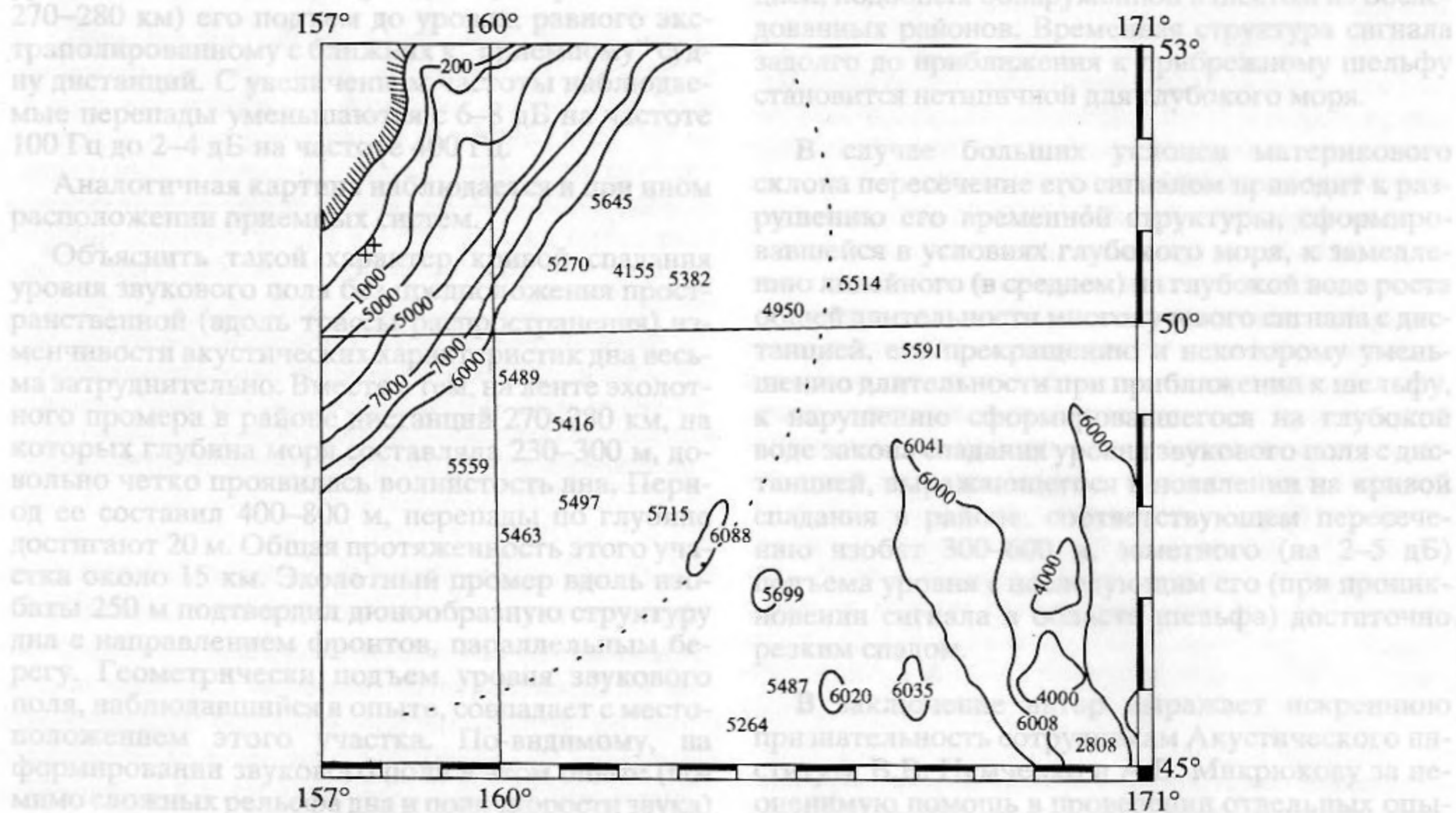


Рис. 1. Район работ. Пунктиром обозначена трасса, по которой производились подрывы толовых зарядов, сбрасываемых с самолетов. Крестиками отмечено местоположение гидрофонов.

акусто-геологические характеристики морского дна. В этих условиях зависимость пространственной корреляции поля сигнала от азимутального угла в ряде случаев может оказаться значительной.

Следует отметить, что проблемам когерентности распространяющихся в океане сигналов посвящено значительное число работ (см., например, [1]). Однако результаты исследований пространственной корреляции от подводных взрывов, принимаемых в береговом клине, и ее азимутальной изменчивости в публикациях практически отсутствуют.

Ниже представлены результаты исследований азимутальной изменчивости пространственной корреляции сигналов от подводных взрывов, осуществленных в северо-западной части Тихого океана вблизи полуострова Камчатка.

Эксперименты проводились в летне-осеннее время года с использованием самолетов и исследовательского судна. На рис. 1 представлен район работ и трасса, по которой производились подрывы толовых зарядов. В качестве источников звука использовались подводные взрывы зарядов весом 6.3 кг, сбрасываемых с самолетов, летящих по дуге окружности радиусом 700 км с центром в районе размещения приемной системы.

Прием сигналов осуществлялся на два гидрофона, лежащих на дне вдоль изобаты 300 м на расстоянии ~10 км друг от друга (отмечены крестиками на рис. 1). Сигналы от гидрофонов через радиобуи передавались на борт стоящего на якоре недалеко от приемной системы научно-исследовательского судна, где они регистрировались и анализировались. За два с лишним часа полета самолетов был сброшен 61 заряд по дуге, общая длина которой составила ~1500 км. Азимутальные углы изменялись в диапазоне от ~55° к северу от нормали к приемной базе до ~60° – к югу от нее. При скорости самолета около 600 км/ч (в среднем) пространственный интервал между соседними взрывами составлял 25 км, что соответствует изменению азимутального угла на ~2°. Взрывы должны были производиться на горизонте 100–105 м, однако истинные глубины взрывов, оцененные по периоду пульсаций газового пузыря (см., например, [2]) отклонялись от заданного горизонта и лежали в пределах 56–160 м. В связи с этим сравнение результатов корреляционных измерений для разных взрывов нужно было проводить с осторожностью, учитывая возможность значительного отличия коэффициентов возбуждения различных мод.

Использование в качестве источников звука подводных взрывов было вызвано по меньшей мере двумя обстоятельствами. Во-первых, – дефицитом достаточно мощных, широкополосных, низкочастотных излучателей; во-вторых, – воз-

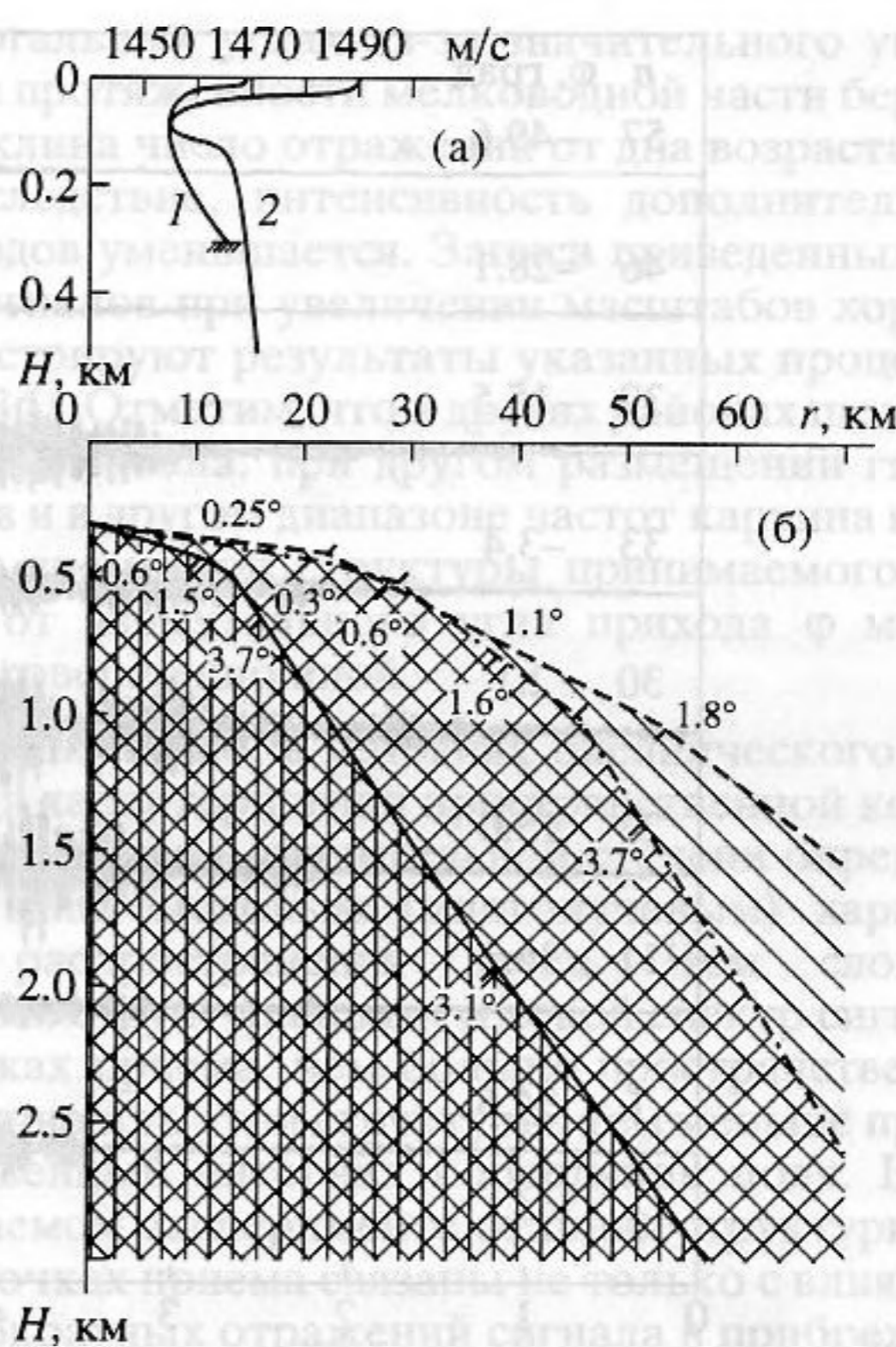


Рис. 2. а – изменения профиля скорости звука вдоль трасс распространения взрывных сигналов: 1 – профиль в районе расположения гидрофонов; 2 – профиль на удалении 300 и более километров от приемной базы. б – рельеф дна для различных трасс распространения сигналов. Сплошная линия – траверзное направление. Штриховая линия – к северу от траверзного направления под углом ~55°. Штрихпунктирная линия – к югу от траверзного направления под углом ~60°.

можностью использования самолетов для проведения взрывного разреза, что позволяет изменять азимутальные углы прихода сигналов в диапазоне 110°–120° за относительно короткий временной интервал (2–3 ч).

На рис. 2а представлены измеренные в первых числах сентября (время проведения опытов) зависимости скорости звука от глубины при различном удалении (по траверзу) от гидрофонов. Отметим, что вблизи точек приема звуковой канал, ось которого находилась на глубине около 50 м, в значительной степени размыт; по мере удаления от берега до дистанции 300 км наблюдалось постепенное заглубление оси канала от 50–60 м до 100–110 м. В интервале дистанций от 300 до 700 км профиль скорости звука практически не изменялся.

На рис. 2б изображен сглаженный рельеф дна в районе расположения приемной системы для трех азимутальных направлений распространения звука: +55° (севернее траверза), 0° (траверз) и –60° (южнее траверза). Как следует из рисунка, удаление гидрофонов от начала континентального

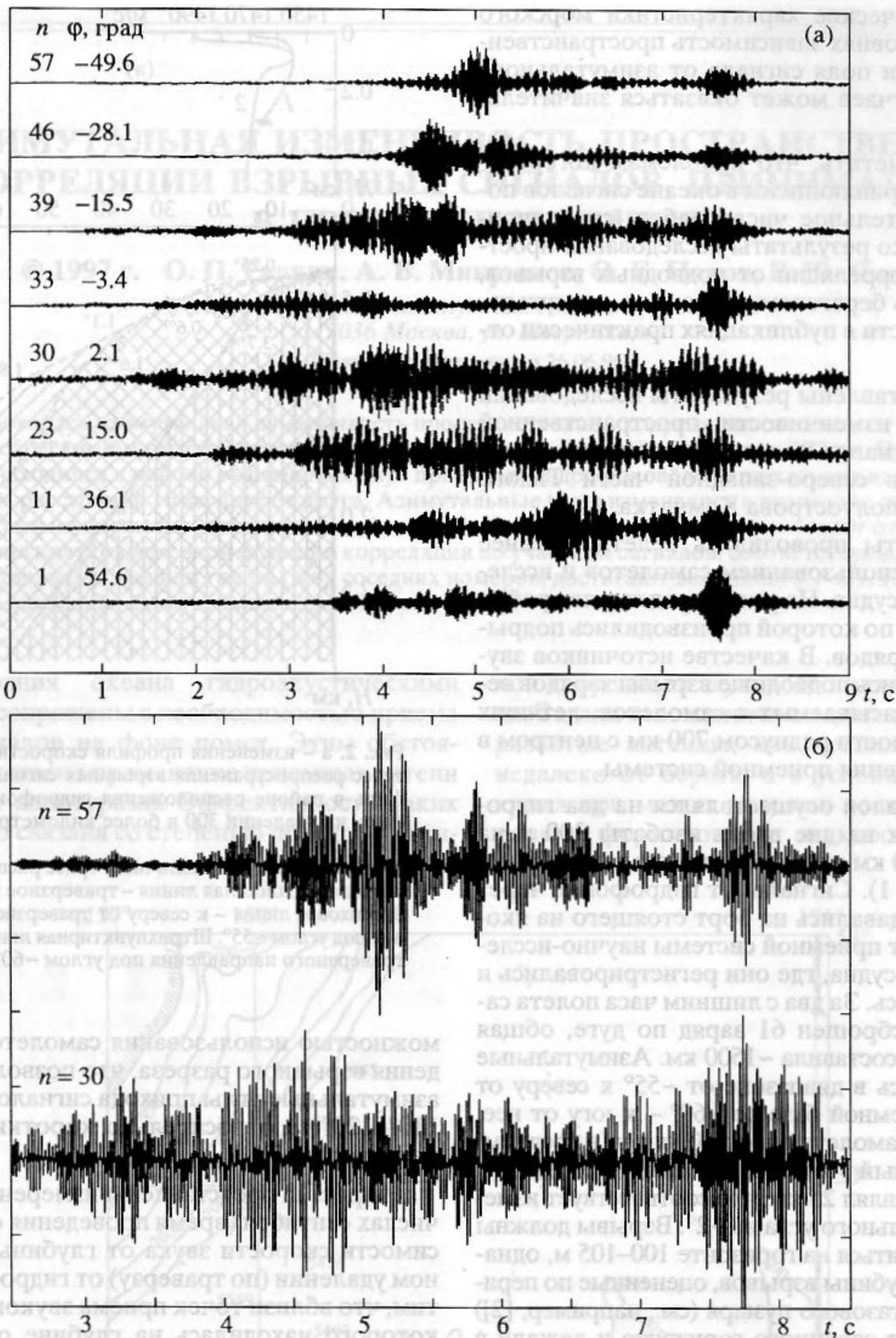


Рис. 3. а – форма взрывных сигналов, принятых одним из гидрофонов, при расположении трасс под различными азимутальными углами; n – номер взрыва; б – записи двух из приведенных выше сигналов в увеличенном масштабе.

склона (примерно до изобаты 500 м) в траверзном направлении составляет ~ 13 км при наклоне дна, не превышающем 1.5° . Затем средний угол наклона быстро увеличивается до 3.7° . В то же время для максимальных азимутальных углов (50° и -60°) расстояние до континентального склона возрастает до 45 и 70 км соответственно. Необхо-

димо заметить, что при увеличении азимутального угла, когда трасса распространения сигналов располагается под некоторым углом к линии изобат, возникает горизонтальная рефракция звуковых лучей [3], из-за которой может заметно измениться структура звуковых полей (рефракция, в частности, приводит к разным изменениям

направления прихода сигналов в горизонтальной плоскости для различных лучей многолучевого сигнала). Все эти обстоятельства, как будет видно ниже, существенным образом сказываются на характеристиках сигналов.

Принятые гидрофонами и переданные с помощью радиобуев на борт научно-исследовательского судна сигналы фильтровались и вводились в ЭВМ для определения характеристик взаимнокорреляционных функций. Анализ велся в полосе частот шириной 20 Гц (37–57 Гц), причем параметры фильтра согласовывались со спектром измеряемого сигнала, который, как известно, модулируется по амплитуде пульсациями газового пузыря. К сожалению, часть сигналов (12 взрывов) пришлось исключить из рассмотрения из-за значительного отклонения горизонта подрыва заряда от заданного.

Образцы записей сигналов, зарегистрированных одним из приемников с различных азимутальных направлений (от $+54.6^\circ$ до -49.6°) при глубинах подрыва зарядов от $105 + 12$ до $105 - 3$ м приведены на рис. 3а. Для наглядности записи сигналов синхронизированы относительно времени вступления их хвостового прихода, т.е. относительно вступления моды самого низкого номера.

Одно из основных отличий в форме принятых сигналов при различных азимутальных углах сводится к изменению их длительности. Заметное возрастание пути, проходимого сигналом при больших азимутальных углах в области прибрежного клина с минимальным наклоном дна, ведет к более интенсивному ослаблению мод высоких номеров, значительным образом взаимодействующих с дном на этом участке трассы распространения звука. Поскольку эти моды в глубоком океане имеют более высокие групповые скорости и определяют начальные участки сигнала, постольку их значительное ослабление при распространении под большими азимутальными углами ведет к заметному уменьшению длительности принимаемого сигнала по сравнению с траверзным случаем.

Второе отличие, обращающее на себя внимание, состоит во все более усложняющейся структуре сигналов по мере приближения направления прихода к траверзному. Такой характер поведения сигналов связан с процессами многократного отражения сигналов от дна в глубоководной части берегового клина, где углы наклона дна (3.5° – 4°) еще заметно превышают наклоны дна в мелководной части клина (0.25° – 1.5°). Дополнительные приходы сигналов, появляющиеся после прохождения звуком глубоководной части клина, сохраняются при направлениях, близких к траверзному, так как количество отражений, заметно ослабляющих сигналы, невелико. При больших

азимутальных углах из-за значительного увеличения протяженности мелководной части берегового клина число отражений от дна возрастает и, как следствие, интенсивность дополнительных приходов уменьшается. Записи приведенных выше сигналов при увеличении масштабов хорошо иллюстрируют результаты указанных процессов (рис. 3б). Отметим, что в других районах шельфовых зон океана, при другом размещении гидрофонов и в другом диапазоне частот картина изменения временной структуры принимаемого сигнала от азимутального угла прихода φ может быть совершенно иной.

Как известно, в условиях океанического волновода характеристики пространственной корреляции сигнала в значительной степени определяются многомодовым (многолучевым) характером распространения звука. Чем сложнее модовая структура поля (угловой спектр сигнала) в точках приема, чем больше пространственная изменчивость этой структуры, тем меньше пространственный интервал корреляции поля. В обсуждаемом эксперименте отличия структуры поля в точках приема связаны не только с влиянием многократных отражений сигнала в прибрежном клине, о чем шла речь выше, но и с существованием при нетраверзных углах продольной составляющей приемной базы. Величина ее зависит от азимутального угла φ направления на источник звука. Продольная составляющая приемной базы в рассматриваемом опыте по мере роста φ увеличивается от нуля при $\varphi = 0$ (траверзное направление) до значения 5 км при $\varphi = \pm 60^\circ$. Следовательно, при $\varphi = 60^\circ$, после того как сигнал будет принят ближайшим к излучателю гидрофоном, ему необходимо пройти дополнительно еще 5 км по мелководью перед тем, как он будет принят удаленным гидрофоном приемной базы.

Два рассмотренных выше механизма изменения пространственной структуры звукового поля действуют на взаимную корреляцию принимаемых гидрофонами сигналов в противоположных направлениях. По мере роста φ временная структура взрывных сигналов упрощается за счет удлинения мелководной части трассы, что должно приводить к увеличению взаимной корреляции принимаемых сигналов, а с другой стороны, с ростом φ корреляция должна уменьшаться из-за увеличивающейся роли продольной составляющей приемной базы.

При определении взаимной корреляции сигналов, принятых пространственно разнесенными гидрофонами, вычислялась нормированная корреляционная функция:

$$R(t, \tau) = \frac{1}{T \sqrt{\sigma_1^2(t) \sigma_2^2(t)}} \int_t^{t+\tau} s_1(t) s_2(t + \tau) dt, \quad (1)$$

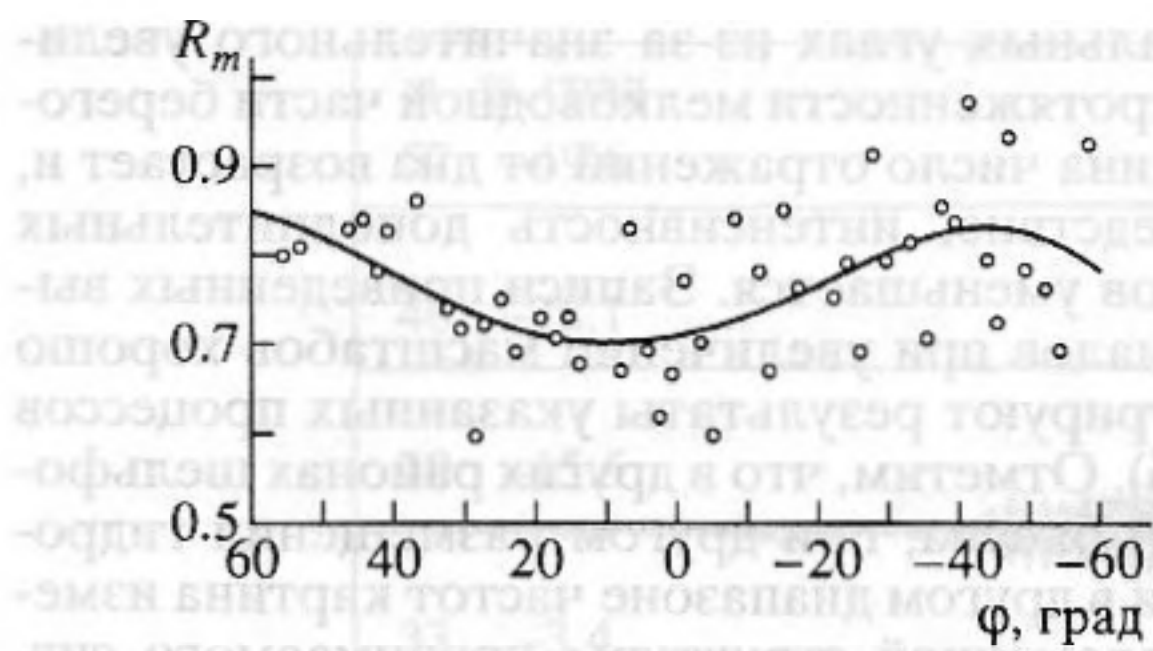


Рис. 4. Зависимость максимального значения коэффициента взаимной корреляции сигналов, принятых ненаправленными гидрофонами, от азимутального угла. Сплошной линией показана аппроксимация полученных значений методом наименьших квадратов.

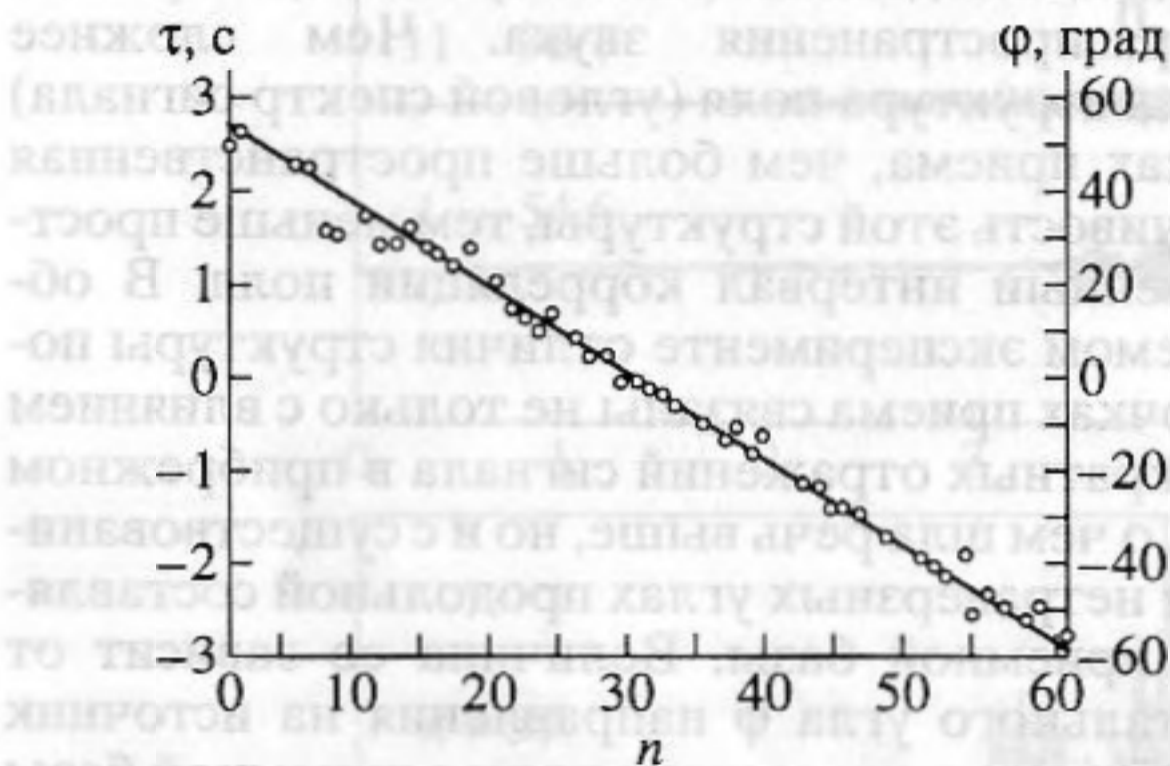


Рис. 5. Зависимость временной задержки τ и азимутального угла ϕ от номера взрыва n .

где T – время усреднения, $s_1(t)$ и $s_2(t)$ – принимаемые взрывные сигналы плюс шумы в точках 1 и 2; $\sigma_1^2(t)$ и $\sigma_2^2(t)$ – дисперсии $s_1(t)$ и $s_2(t)$, τ – временной сдвиг.

Если T берется равным полному времени затягивания принимаемых сигналов, т.е. корреляция определяется по всей длительности сигнала, то, как это следует из эксперимента, при любом азимутальном угле, даже в выбранном диапазоне частот (ниже 60 Гц), значения R не превышают 0.2–0.3, что мало отличается от фонового уровня. Естественно, выявить какую-либо зависимость R от ϕ в этом случае весьма затруднительно.

Известно (см., например, [4]), что для повышения взаимной корреляции следует выделять отдельные моды или моды близких номеров, либо принимать сигналы по лучам в узком диапазоне вертикальных углов прихода. При использовании взрывных, т.е. импульсных, источников звука приходы сигнала по модам различных номеров в значительной степени разделены во времени. Поэтому для достижения поставленной цели (увеличения R) достаточно измерять кратковременную

функцию корреляции (1) со временем усреднения, заметно меньшим времени затягивания сигнала. Таким образом, время T должно быть относительно малым, чтобы снизить влияние на R многомодового характера распространения звука, но в то же время достаточно большим, чтобы ошибка при определении R не была слишком велика (не превышала фонового уровня).

Методика измерений кратковременной нормированной функции корреляции R сводилась к следующему. Прежде всего сигналы, приходящие на разнесенные гидрофоны с некоторой временной разницей, грубо совмещались по времени с использованием огибающих принятых сигналов. После этого брался начальный участок одного из сигналов выбранной длительности (длительность варьировалась от 0.4 с до нескольких секунд) и вычислялась функция корреляции при его последовательном перемещении (с шагом 0.004 с) вдоль всего второго сигнала. Затем брался следующий участок в первом сигнале, причем его смещение по времени относительно первого участка не превышало длительности самого участка. Все расчеты повторялись. Процедура проводилась до тех пор, пока при своем последовательном смещении эталонный участок не достигал конца первого сигнала. В результате данной операции для каждой пары зарегистрированных сигналов (т.е. для каждого ϕ) было получено семейство корреляционных кривых, позволяющее определить местоположение участков в сигналах, на которых корреляция имеет максимальное значение. Сама же величина азимутального угла определялась как по корреляции огибающих принятых сигналов, так и по кратковременной корреляции их начальных участков.

Указанным способом были выбраны оптимальные параметры для определения R : частотная полоса анализа – 20 Гц, протяженность эталонного участка – 2.4 с; шаг при смещении последующих эталонных участков вдоль сигнала – 0.4 с.

Полученные в результате указанной обработки зависимости максимальных значений функции корреляции R_m от азимутального угла ϕ и значения задержек τ принимаемых сигналов с соответствующими им азимутальными углами от номера взрыва n представлены соответственно на рис. 4 и 5. Полученные временные задержки, оказавшиеся, как правило, близкими к ожидаемым, были пересчитаны в значения азимутальных углов прихода сигналов ϕ , которые и представлены на рис. 4. Аппроксимация значений ϕ прямой по методу наименьших квадратов (см. рис. 5) дало среднеквадратичную ошибку 1.2° при изменении ϕ от 54.6° до –59.2°.

Из рис. 4 видно, что максимальные значения коэффициента взаимной корреляции R_m во всем диапазоне азимутальных углов ϕ лежат в интер-

вале от 0.6 до 0.97. Для выбранных при обработке параметров среднеквадратичное отклонение σ_R не превышает 0.1 [5, 6].

Значения максимальных коэффициентов корреляции R_m обнаруживают явную азимутальную изменчивость. Для определения аппроксимирующей зависимости представленных значений использовался метод наименьших квадратов при начально неизвестной степени аппроксимирующего полинома. Кривая на рис. 4 представляет собой аппроксимацию экспериментальных точек полиномом 4-й степени, который, как оказалось, соответствует наилучшему приближению к данным эксперимента. Минимум кривой приходится на область малых значений φ , т.е. область, где пространственная структура поля наиболее сложна, хотя продольная составляющая приемной базы близка к нулю. По мере роста азимутального угла влияние продольной составляющей растет, однако роль увеличивающегося пути в мелководной части клина пока преобладает. Наконец, при больших φ пространственная изменчивость структуры поля существенно зависит от продольной составляющей приемной базы и пиковые значения R_m снова уменьшаются.

Из вышеизложенного вытекают следующие основные выводы:

– пространственная корреляция взрывных сигналов, распространяющихся по трассам большой протяженности (700 км) в глубоком море и принимаемых на ненаправленные гидрофоны, лежащие на дне прибрежного клина на расстоянии ~ 10 км друг от друга в диапазоне частот ниже 60 Гц при усреднении по всей длительности принимаемых сигналов практически не превышает фоновый уровень; выявление азимутальной изменчивости в этом случае крайне затруднено;

– кратковременная функция пространственной корреляции, соответствующая выделению сигналов, приходящих по отдельной моде или модам соседних номеров (по лучам в узком диапазоне вертикальных углов прихода), при полосе анализа $\Delta f = 20$ Гц и частотах ниже 60 Гц достигает значений 0.7–0.9; азимутальная зависимость явно выражена;

– азимутальная изменчивость существенно образом зависит от относительных ролей мелководной части прибрежного клина (среднего наклона, рельефа дна, параметров грунта) и продольной составляющей приемной базы; в анализируемом случае минимальное значение коэффициента взаимной корреляции R отвечает азимутальным углам φ , близким к 0° , с увеличением φ корреляция сначала растет, а затем снова уменьшается;

– для приема слабых сигналов на фоне помех – ситуация обычная при исследовании океана акустическими методами, следует использовать планарные антенны достаточно развитые по вертикали, что позволяет разделить приходы сигналов по отдельным модам или модам соседних номеров, при этом радиус пространственной корреляции сигнала значительно увеличивается.

В заключение авторы выражают благодарность М.В. Железнякову, С.А. Белолипецкому, М.К. Ермолаеву, С.Р. Попову за помощь в проведении эксперимента в океане и Н.К. Абакумовой – за проведение ряда использованных в статье расчетов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Munk W., Baggeroer A. The Heard Island papers: a contribution to global acoustics // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 96. № 4. P. 2327–2484.
2. Wekeley J. Coherent Ray Tracing Measured and Predicted Schallow Water Frequency Spectrum // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 63. № 6. P. 1820–1823.
3. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы подводной акустики. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
4. Галкин О.П., Панкова С.Д. Экспериментальные исследования временной и корреляционной структуры звуковых полей в глубоком океане // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 216–222.
5. Пирсол Л., Бендат Д. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989.
6. Уорсинг А., Геффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. М.: Иностран. лит., 1953.

Azimuthal Variability of the Spatial Correlation of Explosive Signals Received in a Coastal Wedge

O. P. Galkin, A. V. Mikryukov, O. E. Popov, and R. Yu. Popov

The azimuthal variability of the spatial correlation was investigated for signals produced by explosive charges dropped from aircrafts flying over circular arc of 700-km radius. The center of this circle was in the region of location of two hydrophones lying 10 km apart on the bottom along a 300-m isobath. Azimuthal angles varied in the range from 55° to -60° from the normal to the isobath lines. Signals were analyzed over the frequency band from 37 to 57 Hz. The short-time correlation function determined for signal sections corresponding to arrivals of separate modes or modal groups of adjacent numbers reach 0.7–0.9. A distinct azimuthal dependence was observed.