АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 4, с. 539–546

УДК 551.463,534.24

ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ЗВУКА ОТ ДНА В ДИАПАЗОНЕ УГЛОВ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

© 2002 г. Н. В. Студеничник

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

Поступила в редакцию 9.07.01 г.

Для практики гидроакустических исследований предлагается новый метод определения коэффициента отражения звука от дна, основанный на использовании сигналов многократных донно-поверхностных отражений. Метод позволяет исследовать угловую зависимость коэффициента отражения от дна при углах скольжения от единиц до десятков градусов в диапазоне звуковых и инфразвуковых частот. Исследуется структура звуковых полей в глубоководных районах Черного (2000 м) и Аравийского морей (4000 м) в диапазоне частот 10–400 Гц. Приводится частотно-угловая зависимость коэффициента отражения звука в исследованных районах, полученная с использованием разработанного метода. Результаты исследований по Черному морю сравниваются с данными, полученными традиционным методом по однократным и двукратным донным и донно-поверхностным отражениям. Приводятся отдельные экспериментально полученные значения и диапазон изменений коэффициента отражения звука от дна в различных глубоководных и мелководных регионах Мирового океана. Выявляется наличие поперечных волн в осадках и определяется их влияние на частотно-угловую зависимость коэффициента отражения.

Задачи прогнозирования и расчета звуковых полей на больших расстояниях требуют знания отражающих свойств дна в диапазоне низких звуковых и инфразвуковых частот при малых углах скольжения. Традиционная методика исследований коэффициента отражения звука от дна, разрабатываемая, в основном, применительно к использованию его значений на малых расстояниях, для этих целей не пригодна. Хорошо известные и единственно применяемые в опытах различные модификации этих методов основаны на использовании однократных и двукратных донных и донно-поверхностных отражений [1–3]. Они позволяют проводить измерения и получать данные лишь в ограниченной области углов скольжения (выше 10–15°) и в большей степени в килогерцовом диапазоне частот. При использовании традиционных методов остаются не изученными (по техническим условиям) области малых углов скольжения и низкий диапазон частот. В настоящей работе на базе изученности большого объема экспериментальных материалов, полученных автором в различных мелководных и глубоководных регионах Мирового океана, предлагается новый метод исследований, основанный на использовании многократных донно-поверхностных отражений. Он дает возможность изучать коэффициент отражения от дна в диапазоне углов скольжения от 1–2 до 30–40° в области инфразвуковых и низких звуковых частот; обладает значительно большей точностью по сравнению с традиционными методами и позволяет получать достоверные (усредненные по трассе и числу отражений) сведения по отражательной способности дна в ситуациях близких к реализуемым на практике. Кроме того, комбинации исследуемых диапазонов частот и углов скольжения, не изученные в литературе, являются наиболее существенными и определяющими при распространении звука на большие расстояния и прогнозировании работоспособности гидроакустических средств дальнего действия. Различные модификации метода пригодны для использования их как в условиях глубокого океана, так и мелкого моря. Наиболее эффективными источниками звука для реализации метода являются взрывы зарядов, создающие широкополосное излучение.

Многочисленные эксперименты по исследованиям звуковых полей в различных глубоководных и мелководных регионах Мирового океана, показывают, что в зависимости от района, исследуемых расстояний, положения корреспондирующих точек, частоты, параметров донных осадков, рельефа и строения дна в структуре поля наблюдаются сигналы, претерпевшие от 2–3 до 30–60 и более отражений от дна и поверхности. Районами со слабыми отражательными способностями, как правило, являются удаленные от материков глубоководные котловины с рыхлыми илистыми отложениями или подводные хребты и разломы при сильной расчлененности рельефа дна. К ним относятся: северная и центральные части Тихого

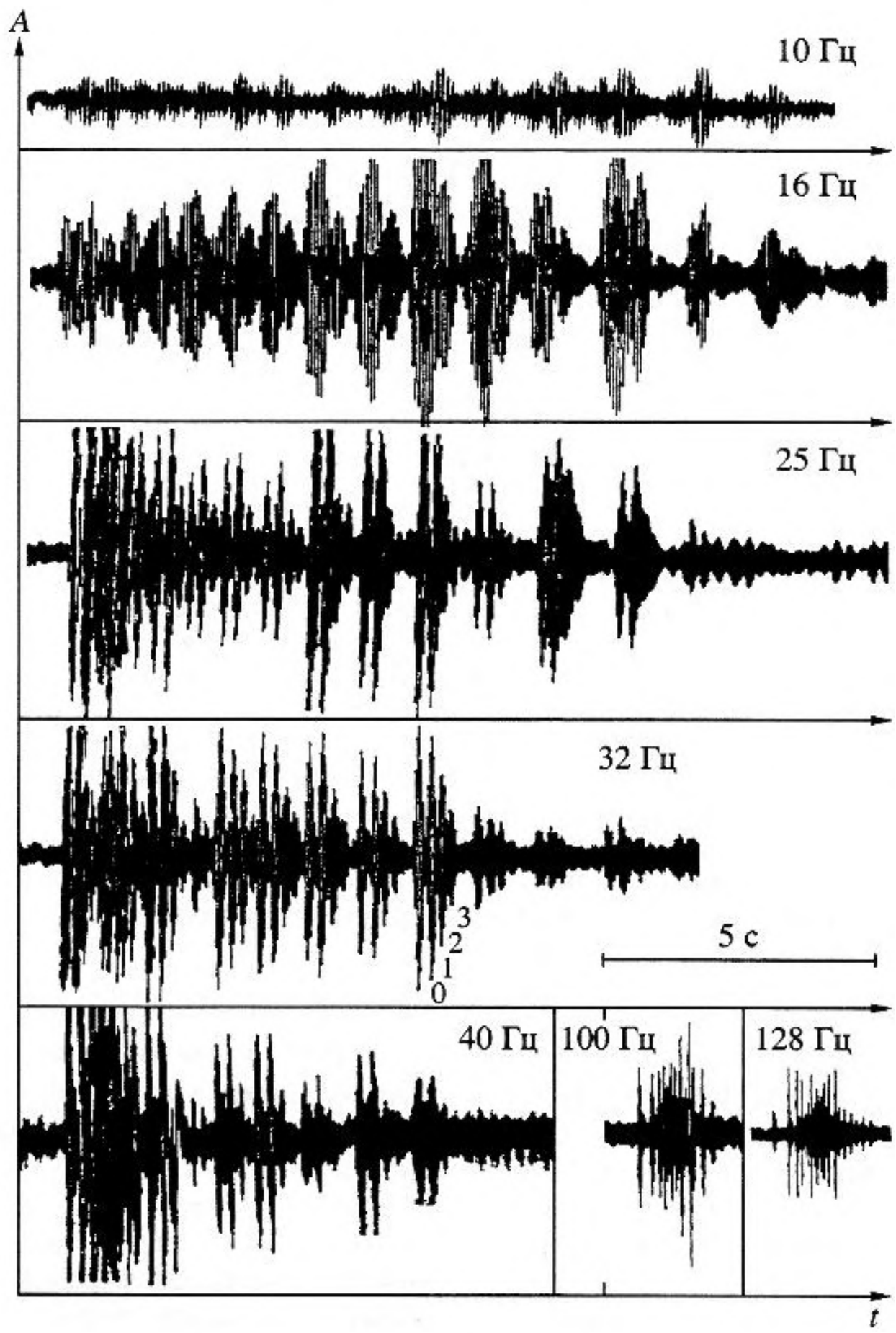

Рис. 1. Зависимость амплитуды (A) от времени (t) звукового поля взрывного источника в Черном море на расстоянии 140 км при глубине 2000 м на частотах 10–128 Гц. Глубина источника 35 м, приемника – 60 м. На частоте 32 Гц: 0 – четверка сигналов ударной волны, 1 – четверка сигналов первой пульсации газового пузыря, 2 – четверка сигналов второй пульсации, 3 – четверка сигналов третьей пульсации. Амплитуды сигналов даны в линейном масштабе.

океана, Филиппинское море, центральная часть Атлантики, включая районы Канарских островов и островов Зеленого мыса, Срединно-Атлантический хребет, абиссали центральных и южных районов Индийского океана и другие глубоководные регионы. Районами с высокой отражательной способностью являются прибрежные акватории с мощными уплотненными слоями осадков и выровненным дном. Это – обширные глубоководные акватории Аравийского моря и Бенгальского залива Индийского океана, Норвежское море, отдельные районы Средиземного и Черного морей, некоторые подледные акватории Арктики. Коэффициент отражения от дна при этом изменяется от 0.1–0.2 (Канарская котловина, центральные районы Индийского и Тихого океанов) до 0.95–0.98 (западные районы Черного моря и северные районы Индийского океана). В мелководных же районах морей и океанов диапазон изменения коэффициента отражения еще более широк. Например, в Южно-Китайском море при скалистом строении дна в слое воды толщиной 40 м, на расстоянии 150 км в диапазоне частот 10–200 Гц регистрировались взрывные сигналы с превышением уровня помех до 30 дБ. Эквивалентное количество донно-поверхностных отражений на оптимальной частоте (125 Гц) было равно 1500. Эффективный коэффициент отражения при этом лежит в пределах 0.9970–0.9976, а при учете потерь на поверхности вода–воздух достигает значений 0.998. Для иллюстрации сказанного проанализируем некоторые типичные структуры звуковых полей, полученные в различных районах Мирового океана, содержащие в своем

составе водно-рефракционные компоненты и сигналы донно-поверхностных отражений. Для этих целей выберем два из отмеченных выше глубоководных района, отличающихся гидрологическими условиями и параметрами донных осадков. Это – северо-западная часть глубоководной котловины Черного моря и глубоководное плато Аравийского моря Индийского океана,

На рис. 1 представлена пространственно-временная и частотно-энергетическая структура звукового поля взрывного источника в глубоководной котловине Черного моря (2000 м) на расстоянии 140 км, обусловленная рефракционными компонентами и компонентами донно-поверхностных отражений. Записи сигналов приведены в линейном масштабе в полосе частот 1/3–октавы. Трасса исследований, протяженностью в 200 км, расположена в 100–300 км юго-восточнее Крымского полуострова. Профиль скорости звука приведен на рис. 2а. Глубина взрыва 35, приема – 60 м. Вес заряда 25 кг. Диапазон эффективно излучаемых частот начинается от 2–3 Гц. Диапазон исследуемых частот 5–300 Гц. Как видно из рисунка, на частотах 10–25 Гц в структурах поля, наряду с рефракционными компонентами присутствует до 20–25, не разделяющихся во времени, четверок сигналов донно-поверхностных отражений. С повышением частоты их количество резко убывает и уже на частоте 100 Гц в структуре поля не содержится ни одного донного отражения. Поле здесь всецело формируется только водными составляющими, рефрагированными в глубинных слоях канала и отражающимися от поверхности. Диапазон частот, в котором лучи свободно проникают через слой скачка к поверхности, лежит в пределах 1.8–800 Гц. На низких частотах каждая группа донно-поверхностных отражений состоит из 12–16 компонент, обусловленных четверками сигналов ударной волны и 2–3 пульсаций газового пузыря. Наиболее отчетливо (не разделяющиеся во времени) четверки донных отражений от ударной волны и трех пульсаций и их параметры (временное разделение, соотношения амплитуд, периоды пульсаций) видны на частоте 32 Гц. Небычайно сильная частотная зависимость отражательной способности дна приводит к тому, что если на частотах 10–25 Гц суммарная длительность рефракционных и донно-поверхностных компонент составляет 15–17 с, то на частоте 100 Гц она падает до 1 с. Длительность же самих систем рефракционных компонент по мере понижения частоты, в соответствии с критическими частотами волновода, а отсюда и его фильтрационными свойствами, падает от максимального значения на высоких частотах (1.1 с) до нуля на критической частоте всего волновода (1.8 Гц). На частотах 10, 16 и 32 Гц время затягивания рефрагированных компонент составляет, соответственно, 280, 480 и 610 мс, а донных отражений 13–17 с, что по длительности (и в значительной степени по суммарному энергетическому уровню) в 30–50 раз превосходит время затягивания рефрагированных составляющих. Соотношения в уровнях ударной волны и первых трех пульсаций газового пузыря на частоте 100 Гц составляют 8, 14 и 20 дБ, а 32 Гц – 1, 4 и 9 дБ. В системах донных отражений четко видны не коррелированные по частоте и углам скольжения максимумы и минимумы, связанные со слоистостью дна и наличием упругих волн в осадках. Кроме того на частотах 10 и 16 Гц реализуется не совсем очевидная на первый взгляд зависимость уровня составных компонент поля от их времени прихода. Здесь, по мере роста углов скольжения и увеличения кратности отражений, амплитуды составляющих не падают с течением времени, а наоборот, нарастают, достигая максимума при углах скольжения равных 15–24°. На частоте 10 Гц результирующие интерференционные максимумы донных отражений увеличиваются относительно рефракционных составляющих до 4–5 дБ,

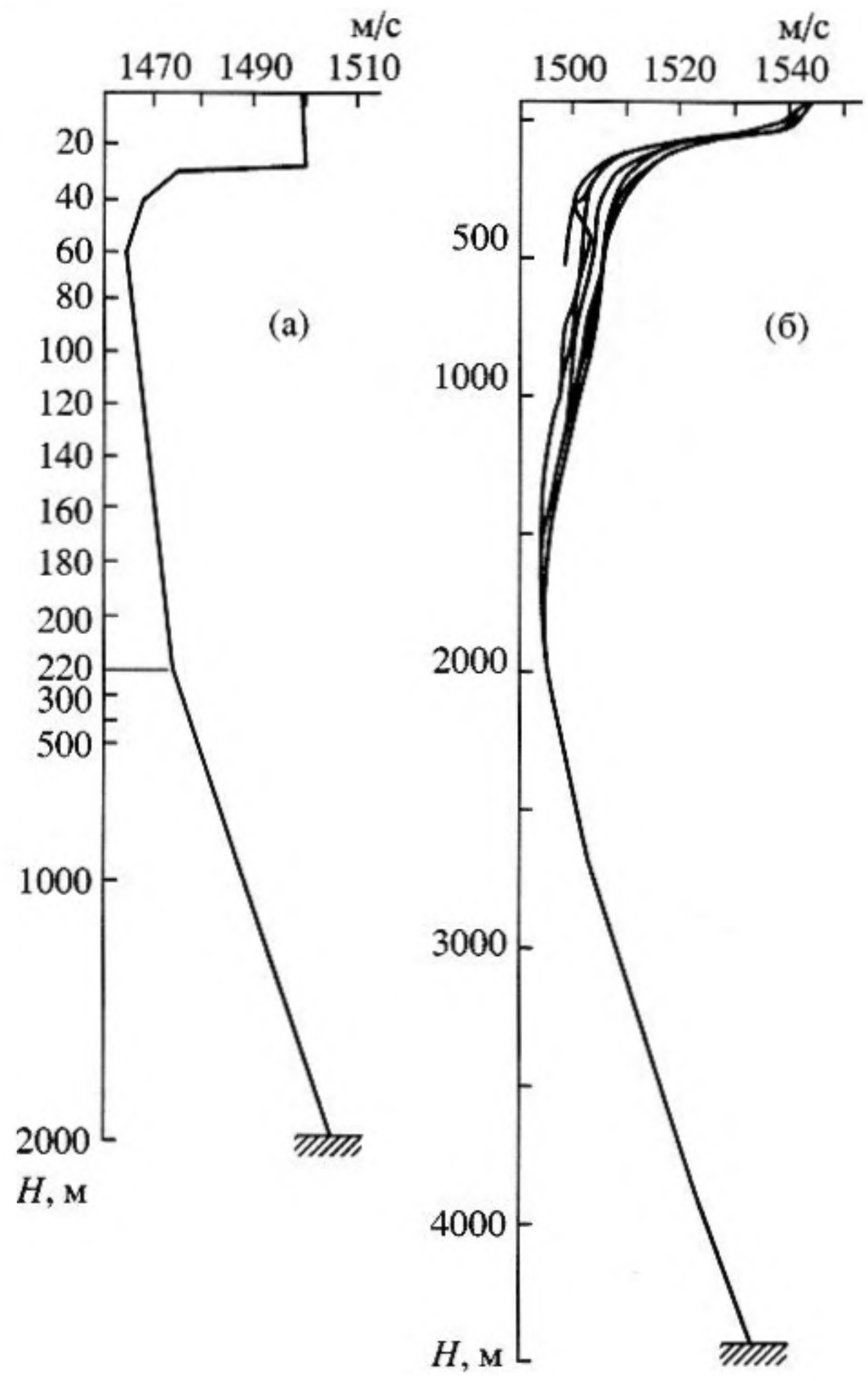

Рис. 2. Профили скорости звука (а) в Черном и (б) Аравийском морях.

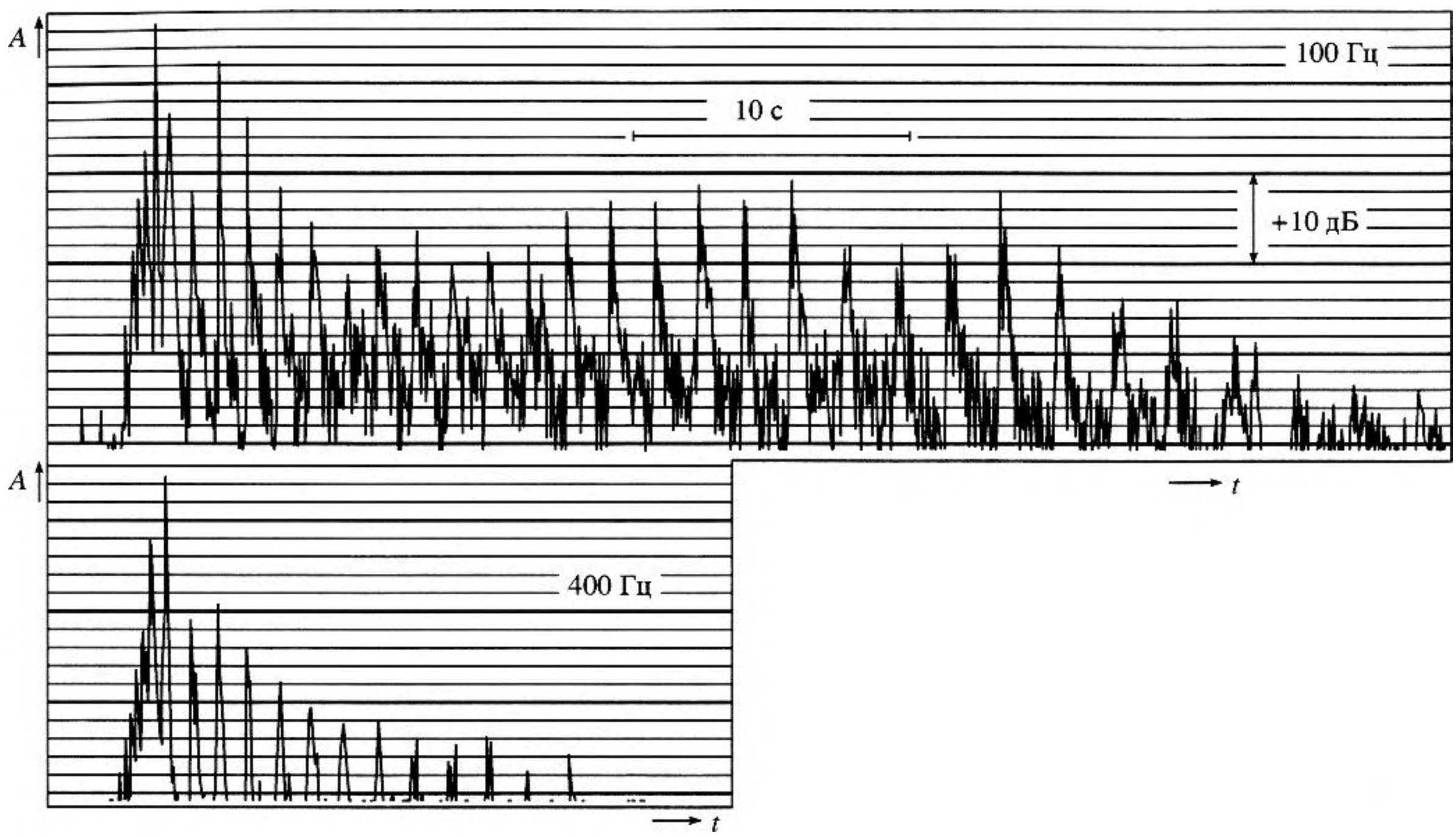

Рис. 3. Тоже, что на рис. 1 в Аравийском море на расстоянии 920 км при глубине океана 3800–4500 м на частотах 100 и 400 Гц. Глубина источника 600 м, приемника – 300 м. Амплитуды сигналов даны в логарифмическом масштабе.

а на частоте 16 Гц достигают 6–9 дБ. При углах скольжения 24–30° амплитуды составляющих донных отражений начинают резко падать, теряя при этом, например, на частоте 16 Гц, от 4 до 6 дБ на каждое последующее отражение, или 0.17–0.25 дБ на каждый удар. С повышением частоты граница спада, и, соответственно, сужение углового диапазона энергонесущих компонент, плавно смещается в область малых углов скольжения. Местоположения границ определяют углы полного внутреннего отражения на каждой из частот и параметры слоев дна, ответственных за отражение волн на соответствующих частотах. Они лежат в пределах углов скольжения у дна от 24–25° в диапазоне частот 5–25 Гц, до 2–6° на более высоких частотах. Скорость звука при этом изменяется от 1506–1507 (скорость в воде у дна 1505 м/с) в верхнем слое грунта до 1660 м/с на глубине. Полученные характеристики свидетельствует о чрезвычайно высокой частотно-угловой зависимости коэффициента отражения от дна в регионе и градиентной зависимости физических параметров верхних слоев осадков от глубины. Отсюда явствует, что при расчетах характеристик звуковых полей в широком диапазоне частот и соответственном при этом моделировании волновода, на каждой из частот следует учитывать свои параметры канала (скорость звука, плотность, коэффициент потерь в грунте, а при лучевых расчетах и профиль скорости звука).

На рис. 3 приведена структура звукового поля в Аравийском море на расстоянии 920 км от источника на частотах 100 и 400 Гц. Глубина океана 3800–4500 м. Профили скорости звука по трассе, протяженностью 1000 км, представлены на рис. 2б. Глубина взрыва (заряд 25 кг) – 600, приема – 300 м; ось канала – на 1700 м. Диапазон эффективного излучения взрывом начинается с 20–25 Гц. Записи сигналов представлены в логарифмическом масштабе при скорости протяжки бумаги 3 мм/с. На обеих частотах хорошо различимы системы сигналов рефрагированных волн и волн донно-поверхностных отражений. Первые, слабо разделяющиеся во времени, вступления (четверки сигналов), с общей длительностью 2 с, представляют собой сигналы рефрагированные в верхних слоях волновода и отражающиеся от дна, и чисто рефрагированные компоненты, распространяющиеся в канале без взаимодействия с границами. Чисто водными четверками в первой группе являются два последних вступления, обладающие максимальными амплитудами. В наблюдаемых условиях средние горизонтальные скорости волн, отражающихся от дна при малых углах скольжения, превосходят скорости чисто рефрагированных компонент. В результате донно-рефракционные

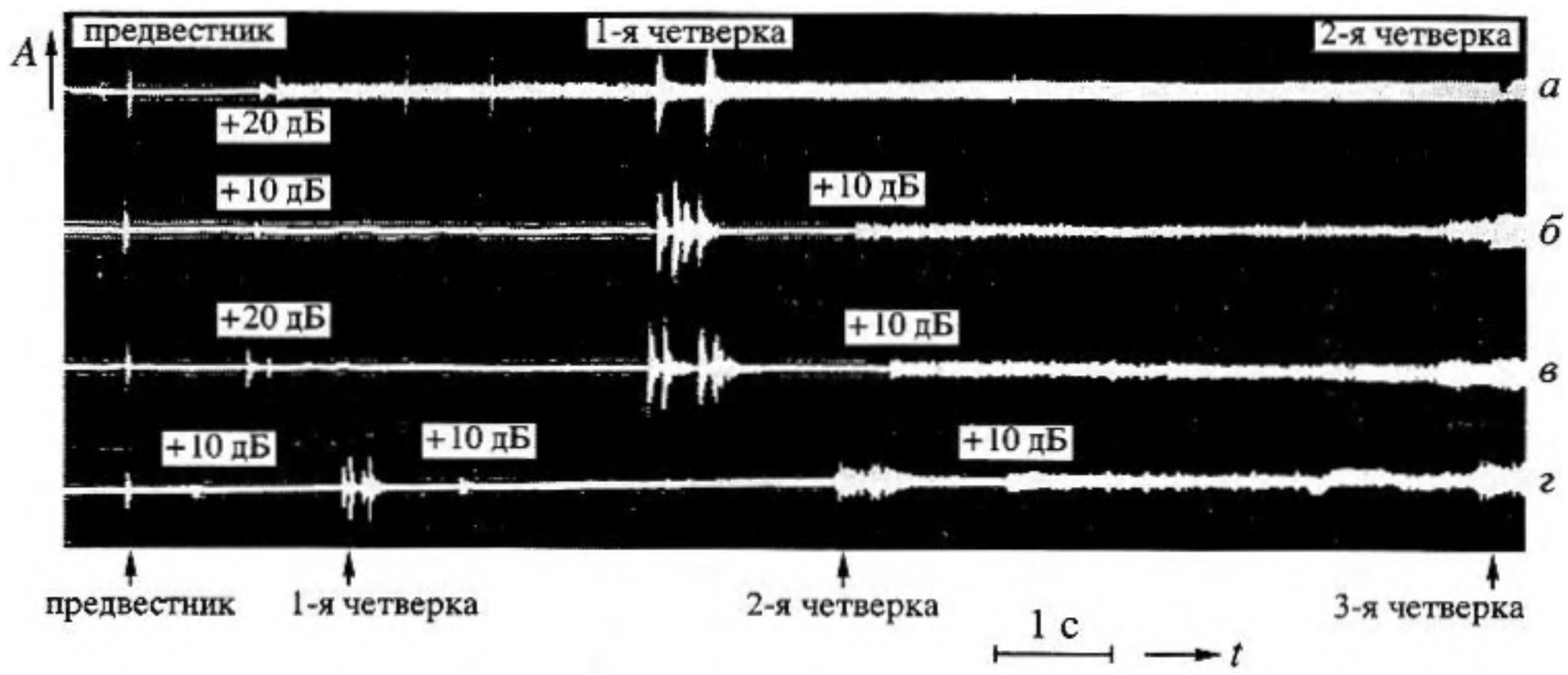

Рис. 4. То же, что на рис. 1 в ближней зоне глубоководный Канарской котловины Атлантического океана (5000 м) на частоте 3 кГц при скорости развертки 16.8 мм/с. Расстояние от источника до приемника: *а*, *б* – 4 км, *г* – 20 км; глубина источника: *а*, *б* – 150 м, *г* – 300 м; глубина приемника: *а* – 10 м; *б*, *в*, *г* – 90 м.

компоненты приходят первыми. Их уровни, естественно, уступают уровням чисто водных составляющих и стремятся к нулю (в соответствии с резко убывающим фактором фокусировки) при приближении к нулевым углам скольжения. Все последующие вступления – сигналы донно-поверхностных отражений. Суммарная их длительность на частоте 400 Гц составляет 17 с, а частоте 100 Гц – достигает 50 с. Сопоставление частотно-энергетических структур звукового поля, представленных на рис. 1 и 3, показывает, что если в Черном море даже на расстоянии 140 км на частоте 100 Гц не содержалось ни одной компоненты взаимодействующей с дном, то в Аравийском море на расстоянии 920 км не только на частоте 100 Гц, но и на частоте 400 Гц присутствуют донные отражения, претерпевшие до 25–30 отражений от границ. Их амплитуды довольно значительны и уступают рефрагированным сигналам не более чем 8–20 дБ. При тщательном рассмотрении формы отдельных составляющих видно, что по мере увеличения кратности отражений, и, соответственно, возрастании углов скольжения, заметно улучшаются условия временного разрешения составных компонент поля; появляется возможность расщепления в четверках сигналов их отдельных вступлений. Кроме того, на частоте 100 Гц в огибающей системы сигналов вырисовывается ряд амплитудных максимумов и минимумов с перепадом в уровнях до 10–20 дБ, связанных с частотно-угловой зависимостью коэффициента отражения от дна, и обусловленных его слоистостью и наличием сдвиговых волн в осадках. При этом амплитуды донных отражений в максимумах сравнимы с амплитудами рефрагированных волн. На частоте 400 Гц степень затухания донных отражений с увеличением их кратности, и, соответственно, с ростом углов скольжения, значительно выше степени затухания на частоте 100 Гц и составляет 2–4 дБ на каждый дополнительный удар.

С целью оценки физико-технических возможностей и эффективности традиционных методов определения частотно-угловых характеристик коэффициента отражения звука от дна по однократным (двукратным) отражениям, проанализируем структуру поля в типичных (наиболее благоприятных по угловому разрешению) условиях глубокого океана. На рис. 4 представлены записи сигналов на частоте 3 кГц на расстояниях 4–20 км (внутренняя зона тени) при глубине акватории 5000 м (Канарская котловина Атлантического океана). Глубины излучения 150 и 300 м, приема – 10 и 90 м. Здесь же на записях указаны дополнительные усиления донно-поверхностных отражений относительно уровня предвестника. На всех расстояниях видны первыми приходящие одиночные сигналы и четверки сигналов 1–3-кратных донных и донно-поверхностных отражений. Одиночные вступления представляют собой дифракционное поле, рожденное на малых расстояниях от источника при первичных отражениях прямых сигналов от взволнованной поверхности. Рассеянная при этом часть энергии захватывается приповерхностным каналом и удерживается в нем вплоть до больших расстояний. В дальнейшем эти компоненты при распространении и повторных отражениях от поверхности (вторично рассеиваясь) проникают под слой скачка и представляют звуковое поле в зоне тени в качестве предвестников. Амплитуды их ослаблены и лежат значительно ниже сферического закона спада. Их существование в волноводе не описывается в рамках классической теории распространения звука в стратифицированных волноводах и, естественно, не учитывается при расчетах поля. Сигналы донно-поверхностных отражений при глубинах взрывов 150 и 300 м и приеме на горизонте 90 м четко разделяются во всех первых четверках. Однако на расстояниях, превышающих 20–30 км, разделение составных компонент первых, а так-

же последующих четверок становится затруднительным. При глубине приема 10 м (даже на частоте 3 кГц) разделение составных компонент в двойках полностью исключается. Времена запаздываний на выбранных дистанциях и положениях корреспондирующих точек изменяются в пределах от 5 до 500 мс, а относительные вариации амплитуд достигают 4–6 дБ. Время запаздываний однократных отражений на расстоянии 4 км составляет 4 с при углах скольжения 40°. На расстоянии 20 км запаздывание первой четверки составляет 1.6 с. Разница времен вступлений в двойках равна 50, а между двойками – 150 мс. Углы скольжения при этом в трех четверках, соответственно равны 26, 45 и 56°. По мере увеличения расстояния и приближения к первой зоне конвергенции (65–75 км) углы скольжения, естественно, уменьшаются и стремятся к нулю. В то же время стремятся к нулю и времена запаздывания сигналов в четверках, а также и их амплитуды. В таких ситуациях разделение отдельных компонент и решение любой обратной задачи становится проблематичным, или вообще невозможным. Отсюда явствует, что при использовании метода однократных донных отражений (даже при больших глубинах и на высоких частотах) в определении коэффициента отражения по физическим условиям не удается даже приблизиться к малым углам скольжения. При последующих отражениях условия разделения составляющих в четверках теоретически улучшается, однако в реальности их разрешение также затруднительно даже при выровненном дне и довольно гладкой поверхности океана. Приведенные примеры демонстрируют физические возможности по угловому разрешению составных компонент, ожидаемые точности и ограниченность метода определения коэффициента отражения от дна по однократным отражениям. При меньших глубинах акваторий угловое разрешение компонент поля значительно ухудшается, а минимально достижимые углы скольжения смещаются вверх. В реальных условиях единственно приемлемым и правильным решением задачи может быть, и является, использование амплитуд многократных донно-поверхностных отражений, получаемых в результате усреднения интерференционных осцилляций по частоте суммы четверок сигналов в полосе фильтрации.

Непосредственно процедура получения коэффициента отражения заключается в том, что по известным параметрам волновода (глубине места, профиле скорости звука и некоторым априорным сведениям по характеристикам дна) и взаимному расположению корреспондирущих точек производится расчет временных, угловых и энергетических характеристик поля в диапазоне углов скольжения достаточном для использования их при идентификации составляющих поля с их параметрами и нахождения искомой частотно-угловой зависимости коэффициента отражения от дна. Произведя идентификацию экспериментально полученных и расчетных составляющих в различных точках по трассе, и определив кратность отражения и соответствующие им углы скольжения, устанавливается (по данным эксперимента и расчетов) наиболее достоверный уровень сигналов, к которому необходимо нормировать уровни всех составляющих и определять величины потерь каждой из них при известном количестве донно-поверхностных отражений. С целью исключения дополнительных ошибок и получения наиболее достоверных сведений по отражательной способности дна эксперимент выгоднее проводить при гладкой поверхности акватории. При значительном волнении потери на поверхности на высоких частотах могут быть сравнимы, и даже превосходить потери на дне. Непосредственное определение коэффициента отражения (после выполнения указанных процедур и идентификации компонент) производится из соотношения

$$K(f, \alpha, n) = [B(R_n/R_0)A]^{1/n},$$

где f – частота, α – угол скольжения, n – кратность отражения выбранного сигнала, B – суммарные потери сигнала при n-ом отражении с учетом нормировки уровней сигналов, R_0 – горизонтальное расстояние, R_n – расстояние, проходимое сигналом при угле скольжения α для n-кратного отражения, A – фактор фокусировки n-ной компоненты.

Использование предлагаемого метода обеспечивает измерения в широких диапазонах частот и углов скольжения, высокую точность.

На рис. 5 представлены, полученные разработанным методом, частотные зависимости коэффициента отражения от дна в Черном море в диапазоне частот 10–128 Гц при углах скольжения от нуля до 40–50°. Для получения приведенных результатов в указанном диапазоне углов скольжения использованы записи сигналов на расстояниях от 5 до 180 км. Видна хорошо выраженная частотная зависимость коэффициента отражения. На низких частотах (до 30–40 Гц), как это характерно для водоподобного полупространства с потерями (отсутствие сдвиговых волн), происходит монотонное уменьшение коэффициента отражения от единицы до 0.20–0.35 в диапазоне углов скольжения 20–30°. По мере повышения частоты наблюдается постепенное смещение углов полного внутреннего отражения от 30°, что соответствует скорости звука в слое грунта, равной 1730 м/с, до 8° на частотах 60–128 Гц при скорости звука в поверхностном слое осадков, равной 1520 м/с и при скорости в воде 1505 м/с. На частотах выше 60 Гц в диапазоне углов скольжения 8–15° появляется минимум на угловой зависимости коэффициента отражения, связанный и со слоистостью верхнего слоя осадков, которая для таких частот

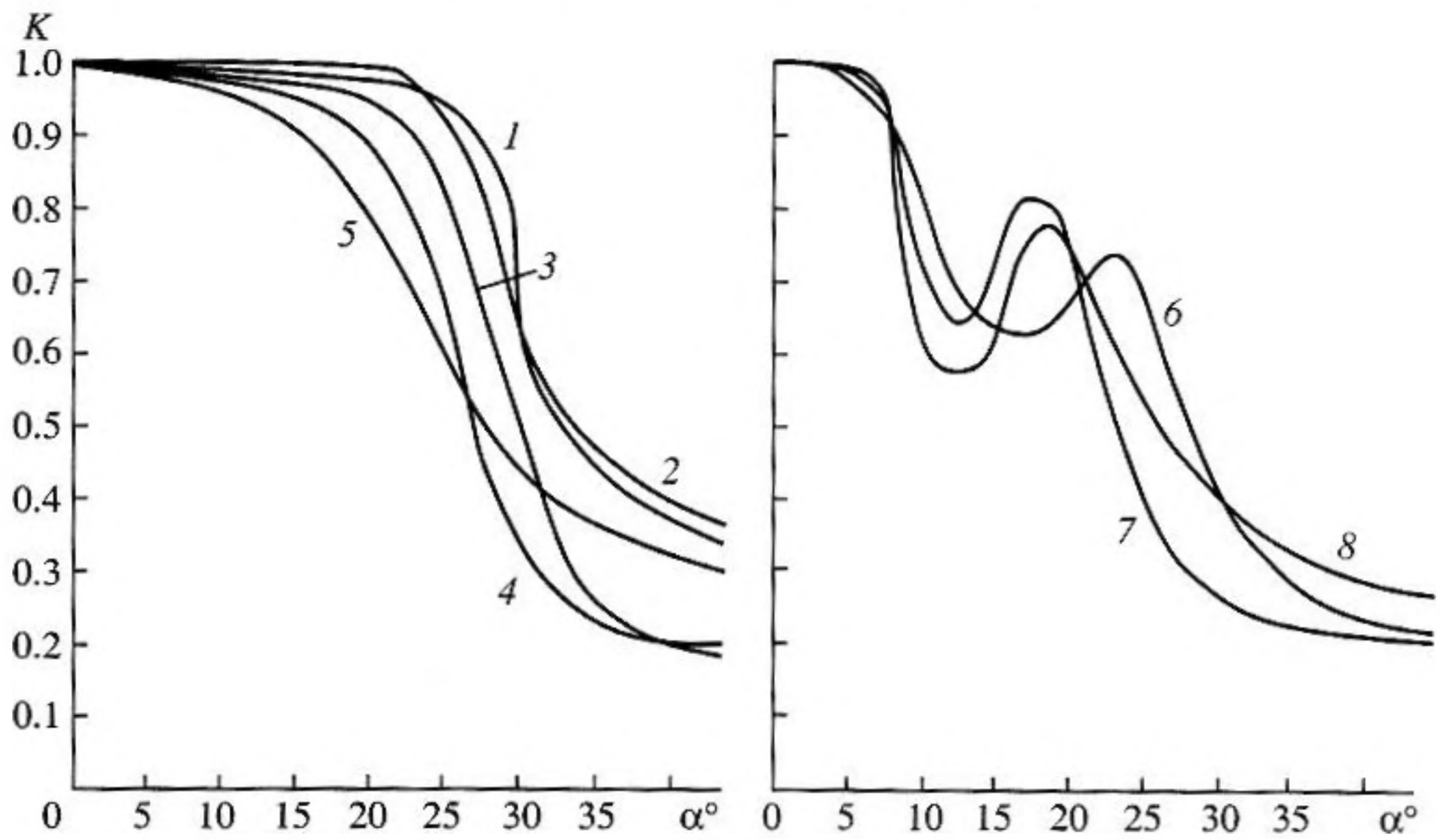

Рис. 5. Частотно-угловые зависимости усредненных коэффициентов отражения звука от дна в Черном море, полученные методом многократных донно-поверхностных отражений. Кривые *1–8* относятся, соответственно, к частотам 10, 15, 25, 32, 40, 64, 100, 128 Гц.

уже оказывается существенной, и с наличием в консолидированных слоях сдвиговых волн со скоростями 600–700 м/с, и со значительными потерями продольных и сдвиговых волн на этих частотах.

Для сопоставления полученных данных с результатами измерения коэффициента отражения традиционным способом и сравнения величин разброса ошибок на рис. 6 представлены измеренные в том же эксперименте в Черном море коэффициенты отражения с использованием однократных и двукратных донно-поверхностных отражений на частотах 5, 10, 32 и 100 Гц. Согласие результатов наблюдается лишь на частотах 30 Гц и выше. На частотах 5–25 Гц, особенно в области углов скольжения 13–27°, отличие очень велико. Малые значения коэффициента отражения и значения, превышающие единицу, являются результатами неизбежных в таком методе ошибок и влияния фокусировки звука в водном слое и при отражениях от поверхности, а также из-за рефракции в осадочной толще. Возникающие при этом ошибки в измерении амплитуд в традиционных методах входят непосредственно в величину коэффициента отражения. При использовании метода многократных донно-поверхностных отражений такие ошибки значительно уменьшаются, или исключаются вовсе, в результате естественного осреднения, накапливаемых при многократных отражениях абсолютных ошибок, и при этом отнесенных к количеству отражений.

На рис. 7 представлены результаты измерений угловой зависимости коэффициента отражения от дна, полученные в Аравийском море на часто-

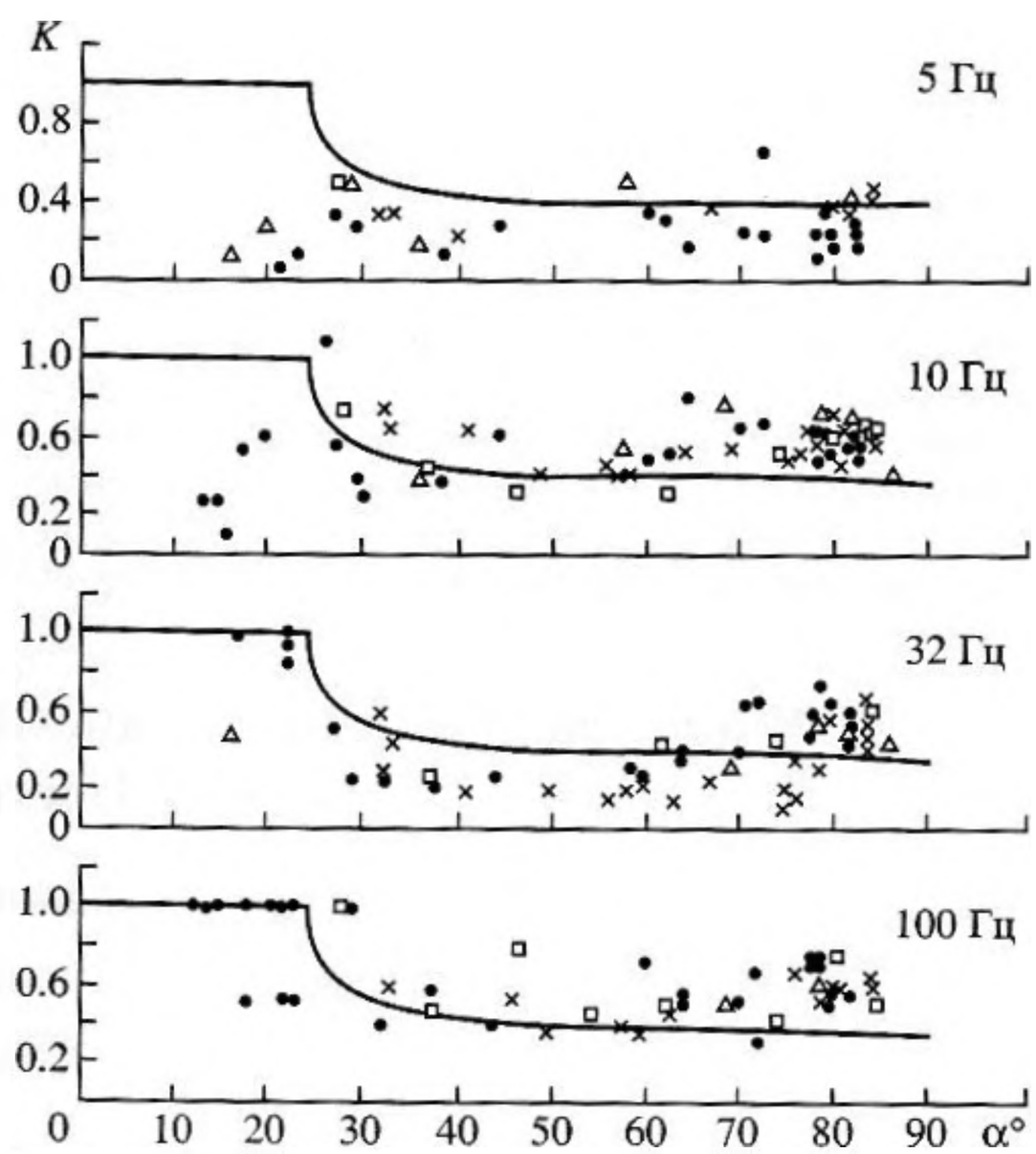

Рис. 6. Угловая зависимость коэффициента отражения в Черном море по однократным и двукратным донно-поверхностным отражениям в диапазоне углов скольжения от 12–15° до 85–87° 0 на частотах 5, 10, 32 и 100 Гц при глубине приемника 60 м. Непрерывная кривая – расчетные значения коэффициента отражения при скорости звука в грунте 1650 м/с. Точки – однократные отражения, крестики – двукратные отражения от дна при глубине источника 35 м; треугольники – однократные отражения, четырехугольники – двукратные отражения от дна при глубине источника 20 м.

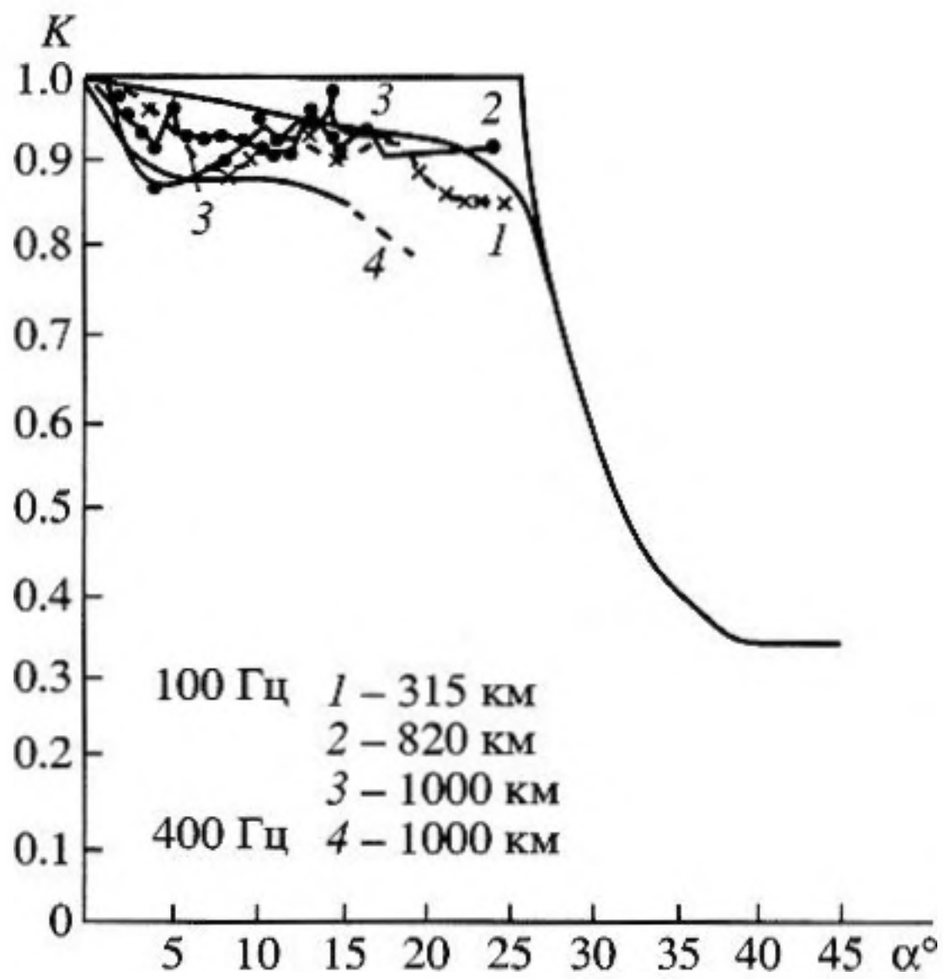

Рис. 7. Угловая зависимость коэффициентов отражения от дна в Аравийском море на частотах 100 и 400 Гц при глубине источника 600 м, приемника – 300 м. Кривые *1–4* указывают расстояния, на которых определены коэффициенты отражения.

тах 100 и 400 Гц в диапазоне углов скольжения от нуля до 20–25°. Использовались записи сигналов на расстояниях от 300 до 1000 км. Здесь, как и Черном море, в диапазоне углов скольжения 5–15° проявляется минимум, обусловленный действием сдвиговых волн в осадках. Судя по глубине интерференционных максимумов и минимумов и абсолютным величинам коэффициента отражения, потери продольных и сдвиговых волн в этом районе значительно меньше. Скорость продольных волн в Аравийском, как и в Черном море, определяемая по низким частотам, равна 1730 м/с (скорость в воде – 1530 м/с). Таким образом отличия в основных параметрах грунта в этих двух районах состоят только в величинах коэффициента потерь продольных и поперечных волн в слоях на этих частотах.

Приведенные результаты исследований показывают, насколько велико многообразие свойств донных осадков и, соответственно, характеристик звуковых полей в различных районах Мирового океана и насколько важным является выбор и построение правдоподобной и адекватной реальным условиям модели дна и всего волновода в целом, обеспечивающей объяснение закономерностей экспериментов в широком диапазоне частот и прогнозирование звуковых полей и работоспособность гидроакустических средств в различных регионах океана. Как видно, при построении модели волновода, и дна в особенности, необходимо учитывать слоистость дна, наличие продольных и поперечных волн с потерями, градиенты скорости звука и плотности в слоях, а главное, зависимость скорости звука и коэффициента поглощения в слоях от частоты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 01-02-16636).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
2. *Бреховских Л.М. и др.* Акустика океана. М., 1974. 696 с.
3. *Charles W.* Holland and Peter Neuman. Sub-bottom Scattering: A modeling approach // J. Acoust. Soc. Am. 1998. V. 104. № 3 Pt. September. P. 1363–1373.

Studies of the Ocean-Bottom Reflection Coefficient at Angles of Total Internal Reflection

N. V. Studenichnik

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia

e-mail: bvp@akin.ru

Abstract—For practical-purpose studies in underwater acoustics, a new method is proposed to determine the bottom reflection coefficient on the basis of multiple bottom–surface reflections. The method allows one to obtain the angular dependence of the bottom reflection coefficient at grazing angles from several degrees to several tens of degrees in the audio and infrasonic frequency bands. The sound field structure is studied in deep-water regions of the Black (2000 m) and Arabian (4000 m) seas at frequencies within 10–400 Hz. For the regions under investigation, the frequency-angular dependence of the reflection coefficient is obtained with the use of the proposed method,. The data for the Black Sea are compared with those provided by the conventional method based on the use of single and double bottom and bottom–surface reflections. Experimental data on the values and variations of the bottom reflection coefficient are presented for different deep-water and shallow-water regions of the World Ocean. The presence of shear waves in the bottom sediments is revealed, and the effect of these waves on the frequency-angular dependence of the reflection coefficient is demonstrated.