

Распространение низкочастотных импульсных сигналов в океане

В. Н. Голубев,^{*} И. П. Смирнов[†]

Федеральный исследовательский центр ИПФ РАН,
Нижний Новгород Россия, 603950, Нижний Новгород, Ульянова, д. 46
(Статья поступила 30.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Приводятся результаты экспериментальных исследований по распространению низкочастотных импульсных сигналов в глубоководном районе Мирового океана. Основное внимание уделено особенностям распространения низкочастотного сигнала в условиях волновода открытого ко дну, в котором принятый сигнал представляет собой последовательность отражений от дна и поверхности океана. В приближении геометрической акустики произведён расчёт пространственно-временной структуры импульсных сигналов и интенсивности отражений различной кратности, формирующих эту структуру. При выбранной модели среды получено удовлетворительное совпадение эксперимента с расчётом, обосновывающее применимость геометрической акустики в инфразвуковом диапазоне частот.

PACS: 43.30.+m

УДК: 534.23

Ключевые слова: импульсный сигнал, пространственно-временная структура, интенсивность, приближение геометрической акустики.

ВВЕДЕНИЕ

Известна определяющая роль донных отражений в формировании звукового поля точечного источника в зонах акустической тени. Так для глубоководных районов Аравийского моря, Бенгальского залива Индийского океана отмечено распространение импульсных сигналов, сформированных донно-поверхностными отражениями на расстояния до нескольких сотен километров. Принимаемый сигнал представляет собой последовательность донных отражений и количество их достигает нескольких десятков для районов океана с глубиной 3–4 км [1–3]. В многочисленных экспериментах, проведённых Институтом прикладной физики в Мировом океане показано, что при зональной структуре поля в инфразвуковом диапазоне частот возможен приём сигналов в области тени для звуковых частот. Малое их затухание делает возможным реализацию трасс передачи информации на большие расстояния. При этом представляет интерес прогнозирование поля, формируемого донными отражениями и его временная структура в зонах акустической тени. В настоящем докладе приведены результаты экспериментальных исследований распространения низкочастотных импульсов в условиях глубоководного волновода, открытого ко дну на расстоянии 220 км. Предложена модель распространения импульсного сигнала в рамках лучевого приближения, позволяющая прогнозировать акустическое поле в волноводах данного типа и произведена оценка акустических характеристик отражающей границы.

1. ОПИСАНИЕ ПРОВЕДЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

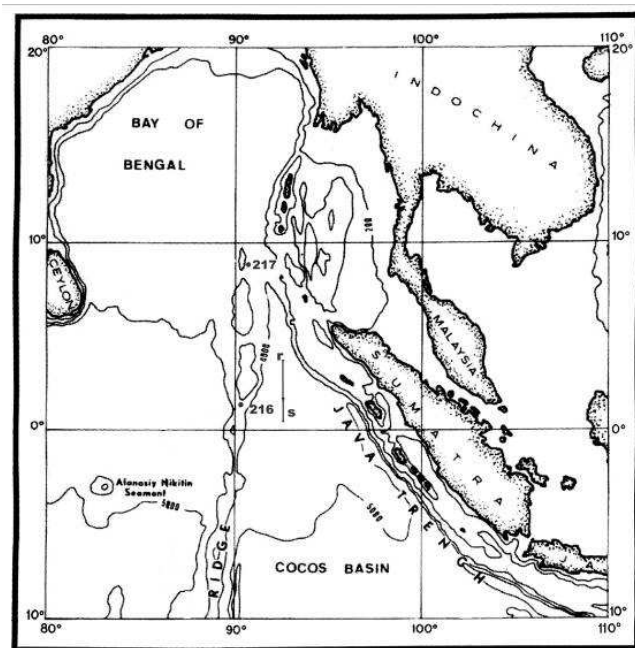


Рис. 1: Район проведения работ, s — источник сигнала, g — точка приема

В совместной экспедиции ИПФ РАН и СКБ САМИ ДВНЦ РАН были проведены опыты по распространению низкочастотных импульсов в экваториальной зоне Индийского океана в районе с глубинами 4150–4350 м между Зондской островной дугой и сопряженным с ней Зондским желобом и Восточно-Индийским подводным хребтом (рис. 1).

В качестве источника низкочастотных импульсов был использован стандартный пневматический излучатель (пневмопушка), применяемый при сейсмических

^{*}E-mail: golubev@ipfran.ru

[†]E-mail: smip@ipfran.ru

исследованиях, с объемом камеры 15 дм³ при давлении 10 мПа. Излучатель буксировался по прямолинейной траектории с постоянной скоростью 3.3 м/с на глубине 15 м, период излучения 60 с, соответственно интервал между соседними импульсами составил 200 м. Прием сигналов осуществлялся на одиночный гидрофон авто-

номной донной станции (АДС) на расстоянии 5 м от дна, регистратор обеспечивал полосу 5–50 Гц. Вертикальный профиль скорости звука в точке установки АДС (начало трассы) и батиметрия по трассе приведены на рис. 2.

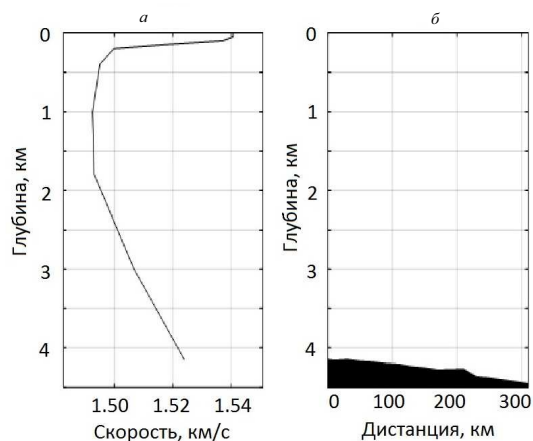


Рис. 2: Профиль скорости звука — *а*, глубина океана по трассе излучателя — *б*

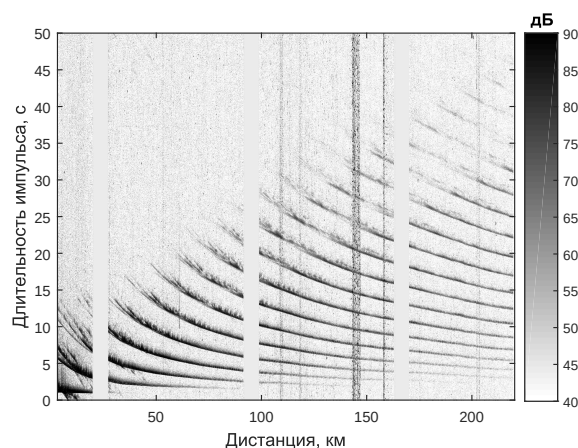


Рис. 3: Экспериментальная ПВС импульсных сигналов, Индийский океан

Обработка принятого сигнала включала получение экспериментальной пространственно–временной структуры (ПВС) принятых сигналов на интервале от 3.2 до 200 км в координатах «длительность импульса–дистанция». Пространственно–временная структура построена посредством временного стробирования принятых импульсов таким образом, чтобы начало строба соответствовало реальному времени прихода импульса за вычетом времени распространения сигнала по водному лучу (рис. 3). Такой метод представления импульсных сигналов наглядно демонстрирует как времена прихода многократных отражений, так и интенсивность их при изменении дистанции. Реализованная таким способом обработка позволяет выделить отражение выбранной кратности с целью получения зависимости уровня его от расстояния. Для наглядности начало импульсов на ПВС рис. 3 смещено на 1 с вверх по шкале времени. На представленном рисунке наблюдается подъем интенсивности отражений при их появлении в сигнале, затем следует спад ее при удалении от источника излучения. Водный импульс пропадает на расстоянии 30 км, однократное отражение — на 90 км, двукратное отражение — на 130 км и т. д.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассматривались две альтернативные модели волноводного канала (рис. 4). В первой (рис. 4, *а*) волновод имел постоянную глубину $H = 4.15$ км; на границе дна скорость звука и плотность менялись скачками; дно представлялось однородным полупространством с плотностью $\rho = 1400$ кг/м³ и скоростью $c = 2000$ м/с. Во второй (рис. 4, *б*) глубина волновода была $H = 4.5$ км, скачок скорости звука на границе дна отсутствовал.

Расчеты ПВС и интенсивностей принимаемых сигналов производились лучевым методом [4]. В обеих моделях получено хорошее совпадение расчетных ПВС с экспериментальной для импульсов, кратности донных отражений которых ≤ 10 (рис. 5, *а, б*). Для вычисления интенсивности применялось частично когерентное суммирование, когда лучи с одинаковым числом отражений от дна (кратностью) суммировались когерентно, а полученные суммы складывались некогерентно. Для нахождения интенсивности импульсов кратности $k = 0, 1, \dots$ суммировались лучи, имеющие близкие времена прихода с идентификаторами (числом точек поворота со знаком угла выхода из источника) $-2k, -2k-1, 2k+1, 2(k+1)$.

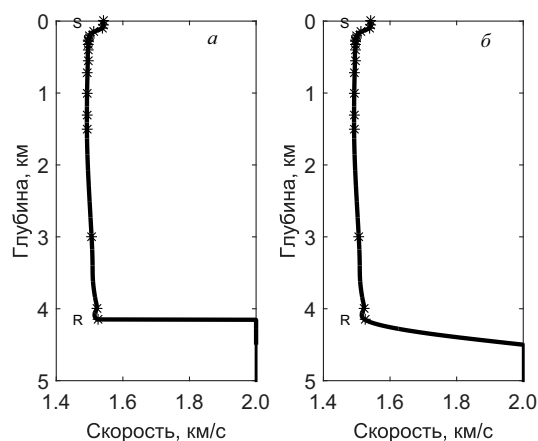


Рис. 4: Профили скоростей звука в двух моделях волновода

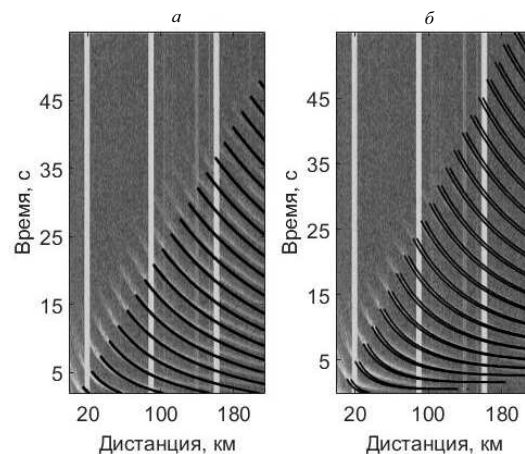
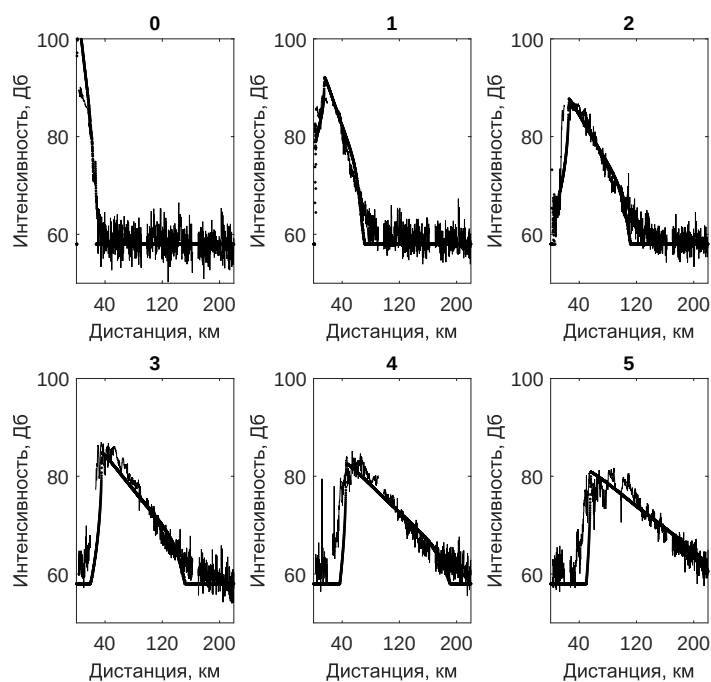


Рис. 5: Совмещения экспериментального ПВС с расчетными

Рис. 6: Распределения интенсивностей сигналов различной кратности донных отражений $k = 0, \dots, 5$: жирная линия — расчет в рамках модели 1, тонкая линия — эксперимент

Результаты совмещений экспериментальных и расчетных интенсивностей приведены на рис. 6. Жирными линиями представлена интенсивность, рассчитанная для модели 1. Видно, что эти кривые хорошо описывают плавное нарастание интенсивности на интервале расстояний, где происходит переход к полному внутреннему отражению.

В рамках модели 2 изменения интенсивностей в указанных областях происходят скачком. В прочих областях расчетные интенсивности для разных моделей могут отличаться друг от друга и от экспериментальной на 5–8 Дб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обеих предложенных для интерпретации экспериментальных результатов моделях волновода удается достигнуть удовлетворительного согласия расчетных и экспериментальных данных. Обе модели достаточно

хорошо описывают ПВС принимаемых сигналов и зависимости их интенсивностей от дистанции. При этом поведение интенсивностей на границах областей возникновения сигналов заданной кратности реалистичней описывается в рамках первой модели.

-
- [1] Голубев В.Н. Сборник трудов XIX сессии РАО. Н. Новгород, 2007. С. 243.
[2] Студеничник Н.В. Акуст. журн. 2002. **48**, № 4. С. 539.
[3] Орлов Е.Ф., Шаронов Г.А. Интерференция звуковых волн

- в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998.
[4] Смирнов И.П. Радиофизика. 2013. **56**, № 2. С. 85.

Low frequency pulses propagation in the Ocean

V. N. Golubev^a, I. P. Smirnov^b

¹*Federal research center Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*
E-mail: ^agolubev@ipfran.ru, ^bsmip@ipfran.ru

Experimental data of low frequency pulse signals propagation in a region of Pacific Ocean are represented. Calculations of the signal space-temporal structure and intensities of bottom reflections were performed in the geometric acoustical approach. For two models of the waveguide satisfactory accordance between experimental and theoretical results were received. This allows to estimate the characteristics of the bound and the effective waveguide depth for the range of frequencies in 5-40 Hz.

PACS: 43.30.+m.

Keywords: pulse signal, space-temporal structure, intensity, deep ocean channel, geometric acoustics approach.

Received 30 June 2017.

Сведения об авторах

1. Голубев Владимир Николаевич — зав. лабораторией; тел.: (831) 436-35-91, e-mail: golubev@ipfran.ru.
 2. Смирнов Иван Паисиевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (831) 416-06-29, e-mail: smip@ipfran.ru.
-