

УДК 534.34

## ОЦЕНКА ШУМНОСТИ ДВИЖУЩИХСЯ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОРСКОГО ДНА

© 2013 г. А. И. Белов, Г. Н. Кузнецов

Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
119991 Москва, ул. Вавилова 38

E-mail: skbmortex@mail.ru

Поступила в редакцию 26.04.2013 г.

Рассмотрены методы определения передаточной функции волновода, влияющей на точность оценки приведенной к свободному пространству шумности источников в мелком море. С использованием разработанной модели грунта и абсолютно калиброванных излучателей выполнен прогноз звукового давления, пересчитанного в точку излучения, с погрешностью не более 2.5–3 дБ. Установлено повышение точности прогноза пересчитанных к свободному пространству величин при использовании звукового давления, измеренного в зонах интерференционных максимумов.

*Ключевые слова:* оценка пересчитанных в точку излучения звуковых давлений, оценка параметров модели многослойного грунта, модель передаточной функции волновода.

DOI: 10.7868/S0320791913060014

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оценка приведенных к свободному пространству значений шумности источников должна производиться с использованием передаточной функции волновода (ПФВ), полученной на основе идентификации модели грунта. Это устраняет смещения оценок при пересчете из точек приема в точку излучения, обеспечивает накопление мощности сигнала с учетом интерференции и повышает помехоустойчивость измерений. Но для реализации таких алгоритмов обработки с учетом ПФВ необходимо учитывать различные влияющие факторы [1]. Среди них важнейшими являются: позиционирование и абсолютная калибровка приемных каналов измерительной антенны; оценка координат буксируемого или самодвижущегося источника; использование для пересчета в точку излучения адекватной акустической модели источника и, наконец, одна из самых сложных задач – учет ПФВ [2].

Для удобства пересчета ПФВ должна быть записана в виде параметрической модели, поскольку в этом случае для произвольной и изменяющейся геометрии можно аналитически учесть реальные условия – расстояния  $r$ , частоту звука  $f$ , глубину волновода  $h$ , глубины расположения источника  $z_0$  и приемников  $z$ , характеристики грунта в районе измерений и т.д. [2–4]. Ниже для построения ПФВ и предсказания характеристик излучаемых сигналов рассматривается задача идентификации параметров моделей многослойного дна для различных районов мелкого моря. Для доказательства адекватности разработанной модели ПФВ реальным

условиям выполняется аттестация модели. Для аттестации модели и обоснования точности пересчета измеренного на расстоянии  $r$  звукового давления в точку излучения, т.е. приведения к свободному пространству, пересчитанные значения сравниваются со звуковым давлением, пересчитанным к расстоянию 1 м при абсолютной калибровке буксируемых низкочастотных излучателей. Кроме того создаются обобщенные модели грунта и, соответственно, ПФВ – единые для достаточно широкого диапазона частот и больших площадей или протяженных трасс буксировки. Это позволяет предположить, что модель ПФВ достаточно точно аппроксимирует реальные характеристики волновода, а рассчитанные параметры грунта соответствуют действительным характеристикам. Одновременно единая модель радикально упрощает пересчет поля на различных частотах из точек приема в точки излучения, в которых размещается движущийся источник.

Последние десятилетия реконструкция акустической модели дна и построение ПФВ, определяющей пространственно-частотные характеристики поля в волноводе, проводятся на основе решения обратной задачи, в рамках которой выполняется минимизация функционалов невязки, сформированных с использованием принятой теоретической модели и экспериментально измеренных в различных точках и на различных частотах характеристик звукового поля [5–9]. При таком подходе, по существу, должна производиться проверка гипотезы, что принятая для оптимизации модель поля не противоречит с заданной ве-

роятностью реальным характеристикам поля в волноводе.

Несмотря на то, что теория и практика решения упомянутой обратной задачи еще находятся в развитии, можно отметить, что общие принципы и подходы реконструкции модели сформулированы. Их назначение – путем управления и ограничений сделать математически некорректную задачу физически корректной. Для этого в качестве нулевого приближения используют известные геолого-геофизические характеристики волновода или результаты прямых измерений в районе экспериментов [6, 7, 9]. Должен также выполняться принцип “простой модели”, чтобы число оцениваемых параметров модели было минимально возможным. Отсюда, в частности, следует, что модели поля, используемые для расчетов, должны иметь дискретное описание и ограниченное число параметров. Такими свойствами обладает, например, поле в маломодовом приближении.

Для решения задачи о реконструкции модели дна разработаны различные методы и используются как импульсные, так и непрерывные, например, полигармонические сигналы. Далее для краткости и простоты задачу идентификации модели грунта и реконструкции многопараметрической модели ПФВ будем называть акустической калибровкой (АК) волновода. При этом будем разделять АК района установки антенн, АК трасс распространения сигналов и АК района установки или буксировки излучателей.

## 2. ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

АК района установки приемных антенн обеспечивает построение модели ПФВ в этой зоне, когерентное суммирование сигналов, принятых гидрофонами (ГФ), и формирование антенной направленного отклика с высоким коэффициентом осевой концентрации. АК трассы распространения сигналов предназначена для построения модели ПФВ, позиционирования приемников в составе измерительных антенн и оценки координат движущихся источников звука, т.е. решения задач акустической дальнометрии [10]. АК зоны буксировки источников обеспечивает построение модели ПФВ в зоне, примыкающей к излучателю. Перечисленные задачи требуют применения различных методик и технических средств. На практике, в условиях однородного по пространству волновода и малых расстояний (до 1000 м), достаточно выполнить АК любой из зон и использовать полученную модель ПФВ для позиционирования и расчета приведенной к свободному пространству шумности. Использование ПФВ повышает помехоустойчивость изме-

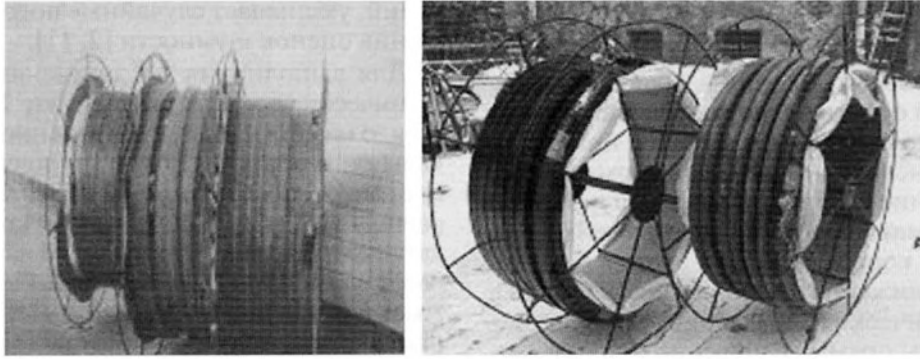
рений, уменьшает случайные погрешности и смещения оценок шумности [2, 11].

Для выполнения АК применялись следующие технические средства и методики. Приемное судно стояло на двух якорях с выпущенной за борт вертикальной антенной (ВА), состоящей из 11 эквидистантно расположенных ГФ. Расстояние между ГФ равно 4 м. Глубина нижнего ГФ контролировалась датчиком глубины. Второе судно на первом этапе на расстоянии 10–12 км буксировало по различным траекториям пневмоисточник (ПИ), который периодически излучал широкополосные импульсы. На втором этапе экспериментов судно-излучатель производило прямолинейные радиальные буксировки излучающих комплексов, включающих несколько тональных низкочастотных излучателей, установленных на одной буксируемой раме. Импульсные или высоко когерентные тональные сигналы, принятые ВА, вводились в бортовую ЭВМ. Расстояние между судами определялось с использованием двух систем спутниковой навигации GPS. Глубина моря под днищем каждого судна измерялась эхолотами в реальном времени. Эксперименты проводились в морском заливе Тихоокеанского шельфа с удалением от берегов на расстояние не менее 20 км. Район выбран с такими характеристиками, чтобы волновод на площади  $3 \times 5$  км<sup>2</sup> вдоль трассы буксировки тональных источников имел постоянную среднюю глубину  $63 \pm 1.5$  м. Но на большем расстоянии от приемной антенны (9–12 км), где буксировался ПИ, глубины вдоль трассы буксировки и трассы распространения импульсных сигналов изменялись более, чем в два раза. Измерение вертикального распределения скорости звука показало, что для выбранного времени года водный слой является практически однородным со средней скоростью звука  $c = 1502$  м/с.

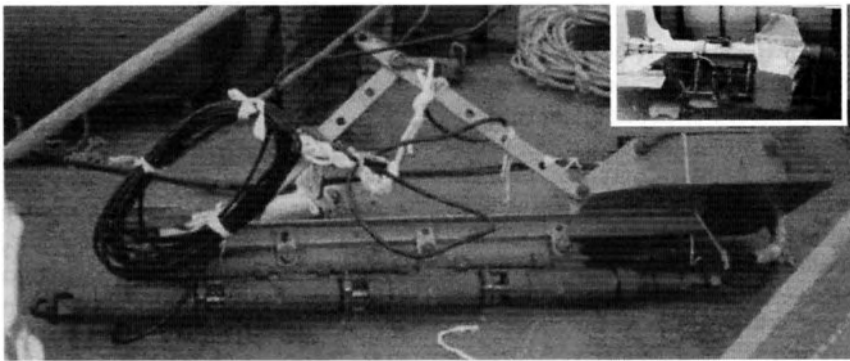
На рис. 1 представлены фотографии эластичных цельнозалитых многоканальных приемных антенн, использованных в экспериментах. Их достоинством является надежность, широкополосность, ремонтоспособность и удобство в эксплуатации.

На рис. 2 приведена фотография использованного в эксперименте четырехкамерного буксируемого ПИ, который излучает мощные короткие импульсы. Его конструкция с крыловидным заглубителем и датчиком глубины обеспечивает устойчивую буксировку на заданном горизонте. Основная частота пульсаций газового пузыря, образованного ПИ, может варьироваться изменением давления сжатого воздуха и глубины буксировки. Управление работой ПИ производится от электрического и гидравлического пультов.

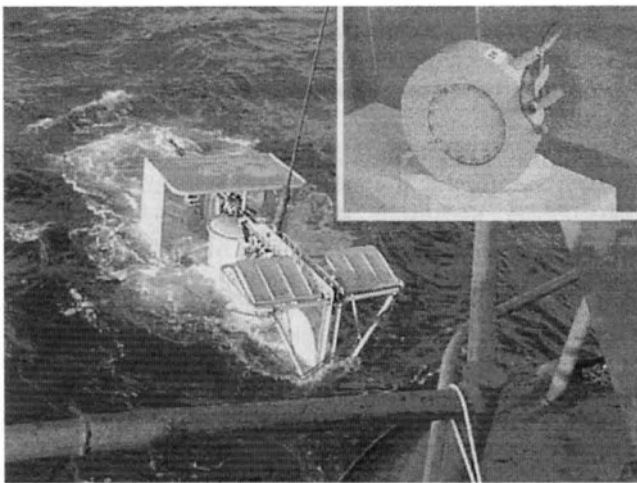
На рис. 3 изображен буксируемый излучающий комплекс, на раме которого компактно установлены три электромагнитных излучателя с резонансными частотами 117, 320 и 570 Гц и пьезо-



**Рис. 1.** Широкополосные многоканальные цельнозаливные антенны длиной от 30 до 200 м с числом приемных элементов от 11 до 64. Антенны изготовлены на основе полимеризации полиуретана или каучука. Диапазон рабочих частот 10–10000 Гц. В антенны встроены предварительные усилители, расположенные рядом с приемными элементами.



**Рис. 2.** Широкополосный четырехкамерный пневмоисточник с рамой для крепления и стабилизатором, обеспечивающим заглублиение и устойчивость буксировки. Размеры  $1.2 \times 0.6 \times 0.5 \text{ м}^3$ . Вес 20 кг. Диапазон рабочих частот 10–1500 Гц. Звуковое давление на 1 м – 2.5 атм. Справа сверху изображен однокамерный пневмоисточник с аналогичными характеристиками.



**Рис. 3.** Буксируемый комплекс с тремя электромагнитными и одним пьезокерамическим излучателями. Справа сверху излучатель с частотой  $f = 117 \text{ Гц}$ .

керамический излучатель с рабочей полосой частот 2.5–9.5 кГц. В другом, аналогичном буксируемом комплексе (рис. 4), установлены четыре идентичных, включенных параллельно и синхронно работающих электродинамических излучателя с резонансной частотой 48 Гц. Установлен также и широкополосный пьезокерамический излучатель. Характеристики этих буксируемых излучающих комплексов подробно рассмотрены в [12]. Экспериментально и расчетным путем доказано, что в качестве модели этих излучателей может быть использована модель монополя. Это позволило выполнить на рабочих частотах оценку приведенной к расстоянию  $r = 1 \text{ м}$  абсолютной величины звукового давления, поочередно излучаемого каждым излучателем. Широкополосные импульсы пьезокерамического излучателя использовались для позиционирования по акустическому полю каждого приемника, входящего в состав приемных антенн, относительно буксиру-

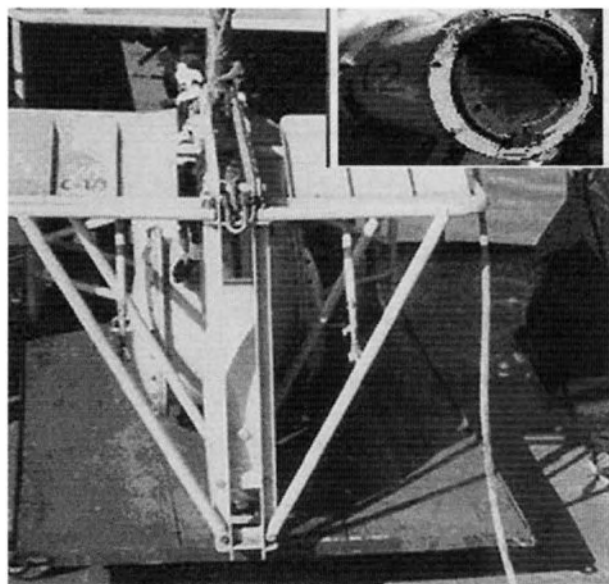


Рис. 4. Буксируемый комплекс с четырьмя электродинамическими и одним пьезокерамическим излучателями. Справа сверху излучатель с частотой  $f = 48$  Гц.

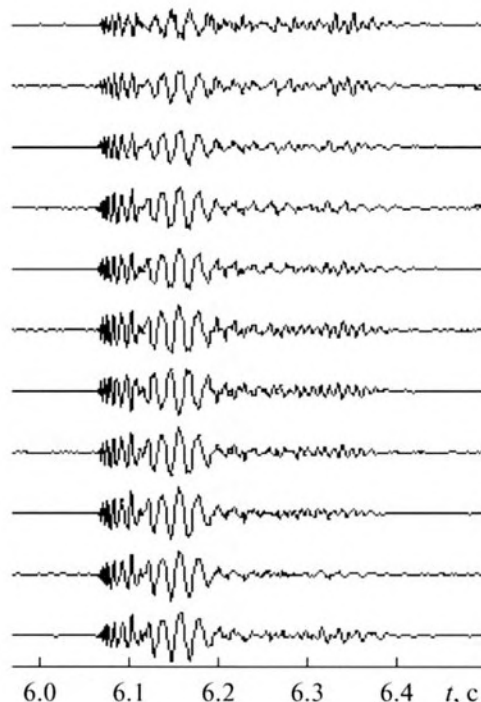


Рис. 5. Широкополосные импульсы от ПИ, принятые гидрофонами приемной вертикальной антенны.

емого комплекса. Это дополняло данные, полученные с использованием GPS.

### 3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ГРУНТА ИМПУЛЬСНЫМИ СИГНАЛАМИ

Для оценки параметров модели грунта в трех перечисленных районах использовался метод согласованного поля, основанный на минимизации функционала невязки между измеренными и рассчитанными в рамках выбранной модели ПФВ характеристиками звуковых полей. Характеристики модели волновода входят в функционал невязки в качестве искоемых параметров модели. Для поиска минимума функционала невязки применялся метод многомерной оптимизации [13]. Для повышения точности оценки параметров грунта применялась двухэтапная процедура АК волновода [8, 9]. На первом этапе выполнена экспертная (предварительная) оценка параметров модели дна с использованием результатов прямых измерений групповых или фазовых скоростей нормальных волн, возбуждаемых ПИ. Полученные на этом этапе параметры модели дна на втором этапе использовались как начальные приближения для последующей оптимизации параметров модели грунта. Такой подход, хотя и не снимает все проблемы поиска глобального экстремума, но позволяет поместить начальную точку оптимизации в близкой окрестности от истинных значений.

#### 3.1. Предварительная акустическая калибровка зоны установки антенны и трассы распространения с использованием импульсных сигналов

Определим продольные волновые числа мод непосредственно в месте установки вертикальной приемной системы. Для этого учтем, что продольные волновые числа принятых мод и вертикальные распределения их амплитуд в основном определяются свойствами грунта в точке приема и на участках с плавно изменяющейся глубиной волновода применимо адиабатическое приближение. Поэтому, если в точке приема измерить амплитуды и фазы мод на разных глубинах и рассчитать с учетом вертикального профиля скорости звука зависимость амплитуды каждой моды от глубины, можно подобрать такие продольные волновые числа, при которых теоретическая зависимость амплитуды моды от глубины будет наилучшим образом описывать экспериментальные данные. Это позволило использовать результаты буксировки ПИ даже в неоднородном по глубине волноводе. На рис. 5 показаны принятые с расстояния около 10 км импульсы ПИ на 11 разнесенных по вертикали ГФ в широкой полосе частот. Видно, что в волноводе из-за межмодовой и внутримодовой дисперсии произошло затягивание импульсов и разнесение по времени составляющих на разных частотах.

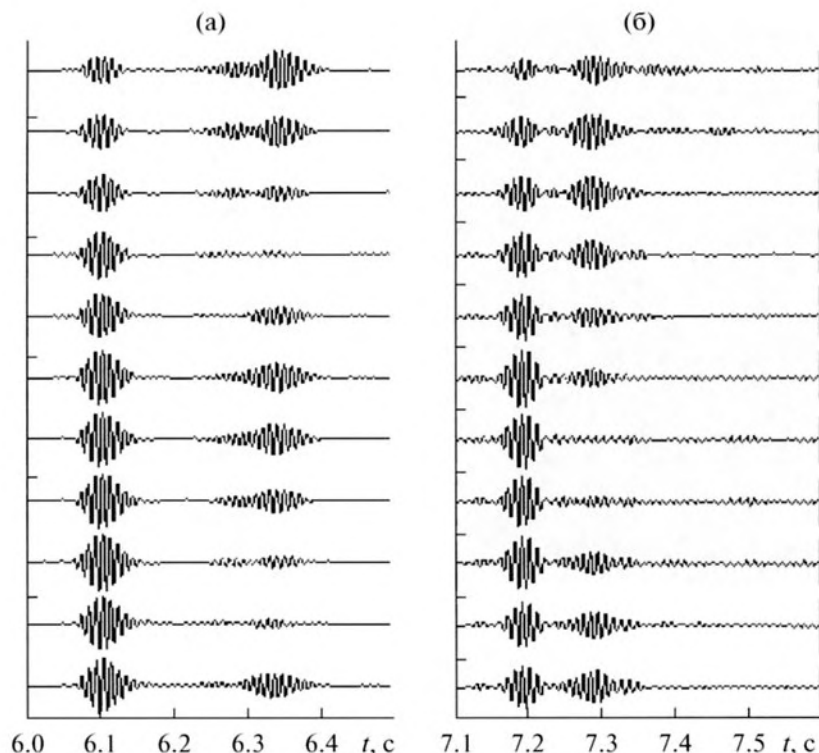


Рис. 6. Приходы мод, выделенные на частоте 100 Гц: глубина излучения 30 м (а), глубина излучения 20 м (б).

Фильтрация отдельных мод осуществлялась стандартным способом. Вначале вычислялся спектр принятого сигнала, который нормировался на спектр сигнала, зарегистрированного контрольным ГФ, расположенным вблизи ПИ. Затем с помощью окна Хемминга из нормированного спектра вырезалась требуемая полоса частот, и, наконец, выполнялось обратное преобразование Фурье. На рис. 6 представлены сигналы принятых мод при их возбуждении на глубине излучения 30 м (рис. 6а) и 20 м (рис. 6б). Центральная частота фильтра – 100 Гц, рабочая полоса – 1/3 октавы. Глубина расположения верхнего ГФ (верхние импульсы) равнялась 14.7 м, а нижнего – 53.7 м. Видно, что для каждой глубины излучения в принятых сигналах уверенно выделяются приходы только двух мод. Для глубины излучения 20 м распределение по глубине амплитуды и фазы второго прихода соответствуют второй моде. Для глубины излучения 30 м эти распределения соответствуют третьей моде.

Расчеты подтвердили (рис. 7), что при излучении на глубинах 20 и 30 м формируются нули вертикального распределения амплитуд, соответствующие третьей и второй модам. Вертикальные распределения амплитуд мод аппроксимировались методом наименьших квадратов функциями вида  $A \sin(\sqrt{\omega^2/c^2 - \xi^2} z)$ . Здесь  $\omega$  – центральная круговая частота используемого для выделения

моды спектрального окна,  $z$  – глубина гидрофона,  $A$  – константа,  $\xi$  – искомого продольное волновое число моды. Точками и сплошными линиями на рис. 7 для частоты 100 Гц показаны измеренные вдоль апертуры ВА распределения первых трех мод и зависимости от глубины амплитуды мод, вычисленные с использованием измеренных продольных волновых чисел и модели дна.

Полученные экспериментальные значения распределения амплитуд и продольных волновых чисел использовались для предварительной оценки параметров грунта вдоль трассы распространения сигналов в рамках модели Пекериса [1, 3, 4]. Однако оказалось, что вычисленная в рамках этой модели глубина водного слоя равна 67 м, что является нереальным, поскольку существенно превышает измеренную эхолотом среднюю глубину волновода 62 м. Этот результат прямо указывает на необходимость усложнения модели и введения жидких слоев.

### 3.2. Уточненная акустическая калибровка зоны установки антенны с использованием импульсных сигналов

Для оценки параметров модели грунта в зоне установки ВА применялись импульсные сигналы от ПИ и обобщенная физическая модель морского дна в виде системы из  $M$  однородных жидких поглощающих слоев, лежащих на жидком или

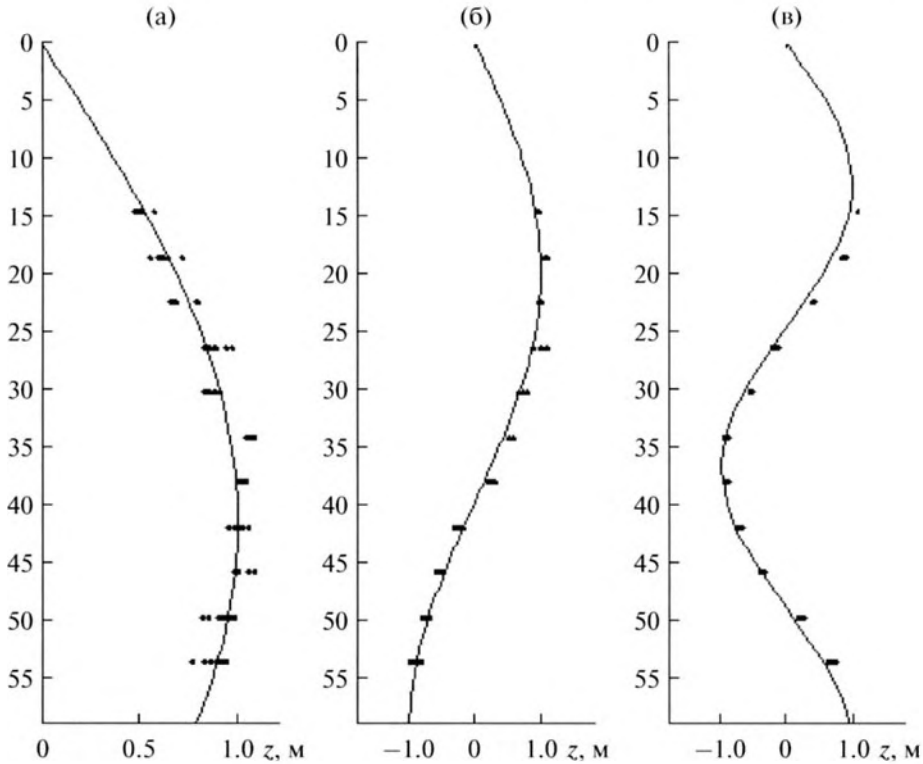


Рис. 7. Экспериментальные и теоретические зависимости от глубины амплитуды трех мод для частоты 100 Гц: 1-я мода (а), 2-я мода (б), 3-я мода (в).

упругом поглощающем полупространстве. В слоях заданы толщины  $h_m$ , плотности  $\rho_m$ , скорости продольных волн  $c_m$  и коэффициенты затухания  $\eta_m$ . В полупространстве заданы плотность  $\rho_{M+1}$ , скорости продольных  $c_L$  и поперечных  $c_T$  волн, коэффициенты потерь  $\eta_L, \eta_T$ . Поиск оптимизированных значений перечисленных параметров, а также уточнение толщины водного слоя  $H$ , – основа решения обратной задачи и построения модели ПФВ. Задача решалась с использованием многомерной оптимизационной процедуры, основанной на методе “направленного отжига” [14]. В качестве подлежащего минимизации функционала использовалось известное нижнее граничное условие краевой задачи Штурма [3, 4]:

$$L = \sum_f \sum_n (\gamma \cos(\gamma H) + g(\xi) \sin(\gamma H))^2, \quad (1)$$

где  $\gamma = \sqrt{\omega^2/c^2 - \xi^2}$ . Суммирование в (1) производится по всем частотам, на которых были выделены моды, и по всем модам для каждой частоты. Функция  $g$  вычисляется как нулевой член следующей рекуррентной последовательности

$$g_{m-1} = \frac{\rho_{m-1} \alpha_m g_m + \alpha_m \text{th}(\alpha_m h_m)}{\rho_m \alpha_m + g_m \text{th}(\alpha_m h_m)},$$

$$\alpha_m = \sqrt{\xi^2 - k_m^2}, \quad k_m = (\omega/c_m)(1 + i\eta_m).$$

Начальным членом последовательности является адмитанс жидкого

$$g_M = \frac{\rho_M}{\rho_{M+1}} \sqrt{\xi^2 - k_L^2}$$

или упругого полупространства

$$g_M = \frac{\rho_M}{\rho_{M+1}} k_T^4 \frac{\sqrt{\xi^2 - k_L^2}}{(2\xi^2 - k_T^2)^2 - 4\xi^2 [(\xi^2 - k_L)(\xi^2 - k_T^2)]^{1/2}},$$

$$k_L = (\omega/c_L)(1 + i\eta_L), \quad k_T = (\omega/c_T)(1 + i\eta_T).$$

Использование указанных функционалов для минимизации формулы (1) позволяет избежать необходимости промежуточной оценки продольных волновых чисел мод, что при выполнении оптимизационной процедуры сокращает объем вычислений.

Чтобы не усложнять модель ПФВ, на первом этапе исследована модель волновода в виде водного слоя и одного жидкого слоя грунта, лежащего на жидком полупространстве. В результате выполненной оптимизации с использованием импульсных сигналов от ПИ определены основные параметры упрощенной модели непосредственно в зоне установки ВА (табл. 1). Первый столбец в таблице соответствует водному слою. Для него уточнялась только эквивалентная (средняя) толщина водного слоя  $H$ . Плотность воды полагалась равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ , а скорость звука принята рав-

Таблица 1

Параметры грунта	Импульсный источник. Жидкие слои на жидком полупространстве		
	1 (вода)	2 (грунт)	3
Номер слоя	1 (вода)	2 (грунт)	3
Толщина, м	63.1	9.7	полупространство
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	1409	1978
Скорость продольных волн, м/с	1502	1602.1	1712.3
Скорость поперечных волн, м/с	—	—	—

ной величине, которая была непосредственно измерена во время экспериментов. Во втором и третьем столбцах приведены вычисленные параметры жидкого слоя и жидкого полупространства.

$$Q = 1 - \frac{\sum_k (p_k^e p_k^c) / d_k}{\left[ \left( \sum_k p_k^{e2} / d_k \right) \left( \sum_k p_k^{c2} / d_k \right) \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

#### 4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ГРУНТА ТОНАЛЬНЫМИ СИГНАЛАМИ

Рассмотрим далее интерференционную структуру звукового поля (рис. 8 и 9), полученную на приемниках ВА с использованием буксировки тональных излучателей на частотах 48, 117, 320 и 570 Гц. Для реконструкции акустических параметров модели дна с использованием симплекс-метода Нелдера—Мида [15] выполнялась минимизация функционала невязки в виде (2):

где  $d_k$  — некоторая характеристика поля в  $k$ -ой точке, учитывающая пространственное ослабление среднего уровня поля. Значения  $Q$  суммировались для всех частот и глубин приема. Для небольших дистанций до излучателя в качестве такой характеристики может использоваться расстояние между корреспондирующими точками. Однако целесообразнее использовать зависимость средней энергии поля от расстояния, которое вычисляется путем энергетического суммирования мод (без

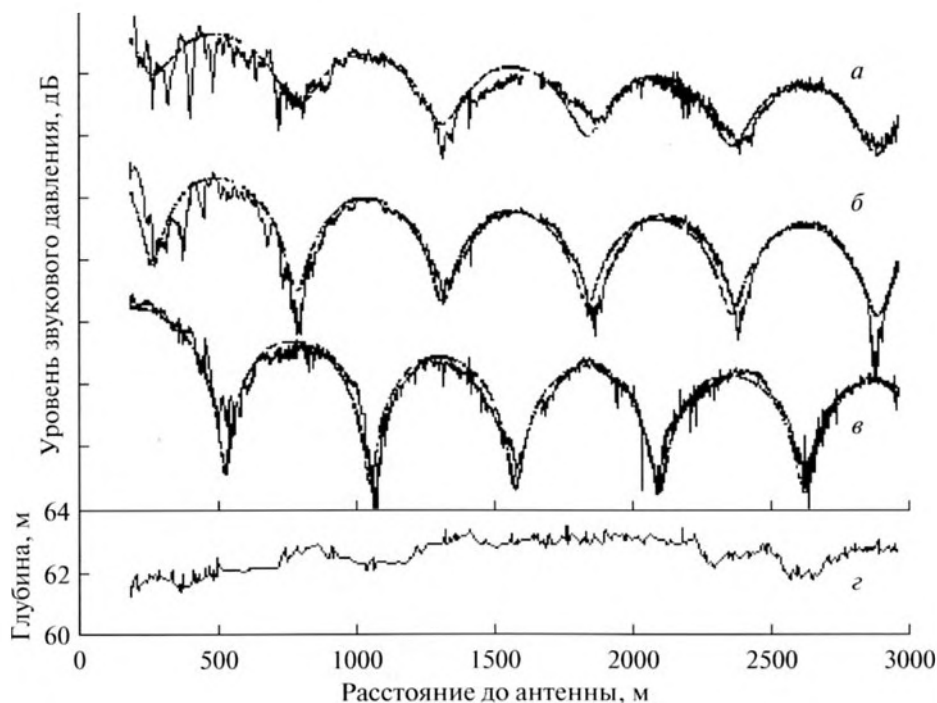


Рис. 8. Зависимости уровня относительной интенсивности звукового поля от расстояния:  $z = 12$  м (а),  $z = 31.5$  м (б),  $z = 51$  м (в), показания эхолота вдоль измерительной трассы (г). Частота 48 Гц. Модель ПФВ с жидким полупространством (табл. 2).

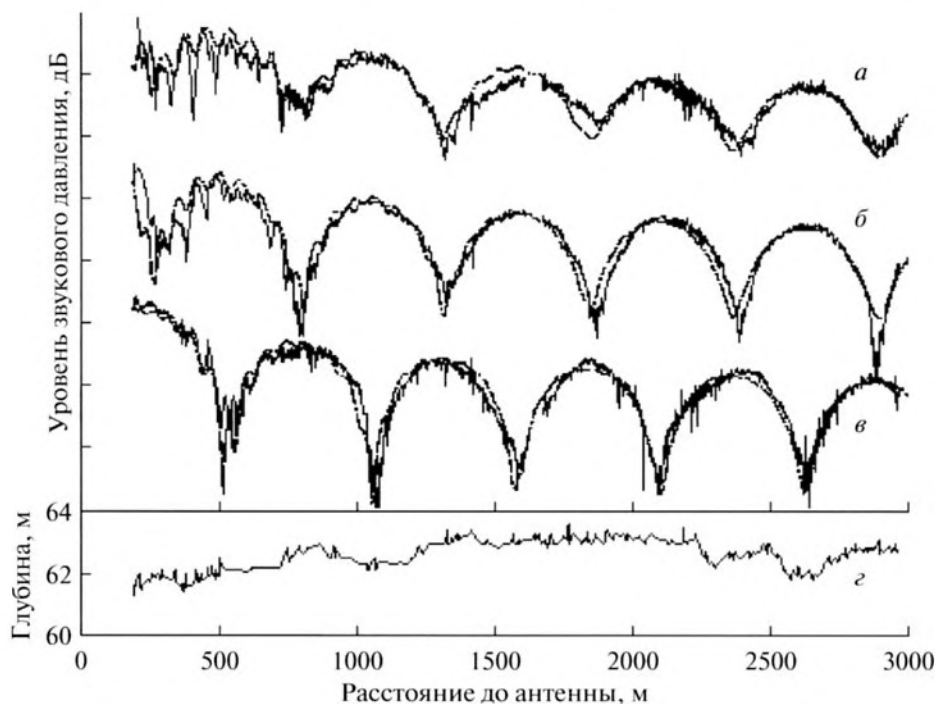


Рис. 9. Зависимости уровня относительной интенсивности звукового поля от расстояния при использовании модели упругого полупространства (табл. 3):  $z = 12$  м (а),  $z = 31.5$  м (б),  $z = 51$  м (в), показания эхолота вдоль измерительной трассы (z). Частота 48 Гц.

учета фаз). Именно такая процедура используется далее.

Поскольку расстояние между зоной буксировки тональных высококогерентных излучателей и местом расположения вертикальной приемной антенны невелико, а волновод в зоне буксировки имеет практически постоянную глубину, то можно предположить, что характеристики грунта в зоне установки ВА и в зоне буксировки излучателей близки по своим параметрам. Поэтому характеристики грунта в зоне расположения антенны (табл. 1) взяты в качестве начального приближения для повышения устойчивости последующей оптимизационной оценки параметров грунта вдоль трасс буксировки излучателей.

#### 4.1. Анализ экспериментальных данных, полученных на частоте 48 Гц

На рис. 8 и 9 приведены экспериментальные зависимости (сплошные линии) и величины звукового давления, вычисленные с использованием разработанной модели ПФВ (пунктирные линии). Произведен пересчет звукового давления от буксируемого излучателя в точки расположения приемников ВА. Представлены результаты пересчета звукового давления на различных расстояниях для трех из 11 глубин приема  $z$ . На остальных глубинах получены аналогичные результаты. Глубина излучения в эксперименте составляла  $z_0 = 23.6$  м.

Кривые *a–в* сдвинуты на 25 дБ относительно друг друга. Одно деление по вертикальной оси соответствует 10 дБ. Модельные значения амплитуды звукового давления вычислялись с использованием ПФВ, построенной по методу нормальных волн [3, 4]. Функционал  $L$ , согласно (1), вычислялся на первом этапе с использованием модели с жидким полупространством. В результате выполненной оптимизации с использованием интерференции сигналов на частоте 48 Гц получены параметры модели волновода, представленные в табл. 2.

Сравнение данных из табл. 1 и 2 позволяет сделать вывод, что различие параметров модели грунта, полученных в одном районе с использованием импульсных или тональных источников и различных методов обработки, невелико. Из рис. 8 видно, что результаты прогноза в рамках полученной модели ПФВ (табл. 2) на расстояниях свыше 500 м от точки приема хорошо согласуются с экспериментальными данными. Рассчитанное для выбранных глубин буксировки излучателя звуковое поле формируется на частоте 48 Гц двумя модами. Однако вблизи приемной системы в экспериментальных данных отчетливо просматривается сравнительно высокочастотная пространственная вариация уровня звукового поля. Можно предположить, что это связано с влиянием мод высоких номеров, которые образуются при наличии упругой отражающей границы, расположен-



Таблица 2

Параметры ПФВ	Один жидкий слой грунта, жидкое полупространство		
Номер слоя	1 (вода)	2 (грунт)	3
Толщина, м	63.2	7.7	—
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	1520	1970
Скорость продольных волн, м/с	1502	1608.4	1698.4
Скорость поперечных волн, м/с	—	—	—

Таблица 3

Параметры ПФВ	Два жидких слоя грунта, упругое полупространство			
Номер слоя	1 (вода)	2 (грунт)	3 (грунт)	4
Толщина, м	63.2	7.7	152.2	—
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000	1520	1970	2410
Скорость продольных волн, м/с	1502	1608.4	1698.4	2890.2
Скорость поперечных волн, м/с	—	—	—	1447.6

ной в толще морского дна. Такая граница представляется естественной в связи с присутствием в грунте коренных пород. Необходимость введения сдвиговой упругости обосновывается и тем, что высокочастотные вариации имеют большое пространственное затухание и наблюдаются только на малых расстояниях (до 1 км). Такие большие величины затухания мод высоких номеров, как правило, вызваны оттоком акустической энергии в дно для возбуждения поперечных волн. Это потребовало рассмотреть модель в виде системы из трех жидких слоев, лежащих на упругом полупространстве. Для сохранения сходимости расчетных и экспериментальных данных на больших расстояниях параметры водного и верхнего жидкого слоев были зафиксированы. Кроме того, акустические параметры полупространства, приведенные в табл. 2, были использованы для описания нижнего донного жидкого слоя и также зафиксированы. Таким образом, варьировались только толщина нижнего жидкого слоя и значения плотности грунта и скоростей продольных и поперечных волн в полупространстве. В результате проведенной оптимизации были получены параметры модели дна, представленные в табл. 3.

Как показал расчет волновых спектров, выполненный с использованием этой модели, количество мод возросло, но затухание мод высоких номеров превышает 3–5 дБ/км. Сопоставление экспериментальных (сплошные линии) и рассчитанных (пунктир) зависимостей с использованием данных из табл. 3 показано на рис. 9. Видно, что при использовании более сложной модели в модельной интерференционной структуре также появились высокочастотные вариации, вызванные интерференцией сильно затухающих мод.

Положение и прогноз величин мелкомасштабных максимумов качественно согласуется с аналогичными максимумами в экспериментальных данных, то есть пересчитанные в точку излучения величины измеренных звуковых давлений дают несмещенные и достаточно точные значения, в том числе на малых расстояниях.

#### 4.2. Анализ экспериментальных данных, полученных на частоте 117 Гц

Рассмотрим результаты буксировки излучателя с частотой 117 Гц на глубине 20 м. Эксперимент проводился во время интенсивного отливного течения. Приемное судно стояло на двух разнесенных якорях. Мощное отливное течение деформировало приемную антенну и, несмотря на подвязку тяжелого груза, антенна отклонялась от вертикали. Ее вынесло к поверхности моря так, что нижний гидрофон оказался на глубине 34 м (вместо 53–55 м). Кроме того, по данным датчика глубины, появились относительно медленные перемещения приемной антенны по вертикали с амплитудой до 2–3 м. Средняя глубина водного слоя, по данным эхолота, уменьшилась из-за отлива на 1.5–2 м.

На рис. 10 приведено сравнение данных эксперимента (сплошные линии) и результатов расчетов (пунктирные кривые). Причем для проверки адекватности ранее разработанной модели (три жидких слоя, лежащих на упругом полупространстве) расчеты произведены с использованием параметров модели грунта, полученной при буксировке излучателей, работающих на частоте 48 Гц (табл. 3). Для оптимизации параметров на среднюю глубину водного слоя с учетом отлива было поставлено ограничение: средняя глубина долж-

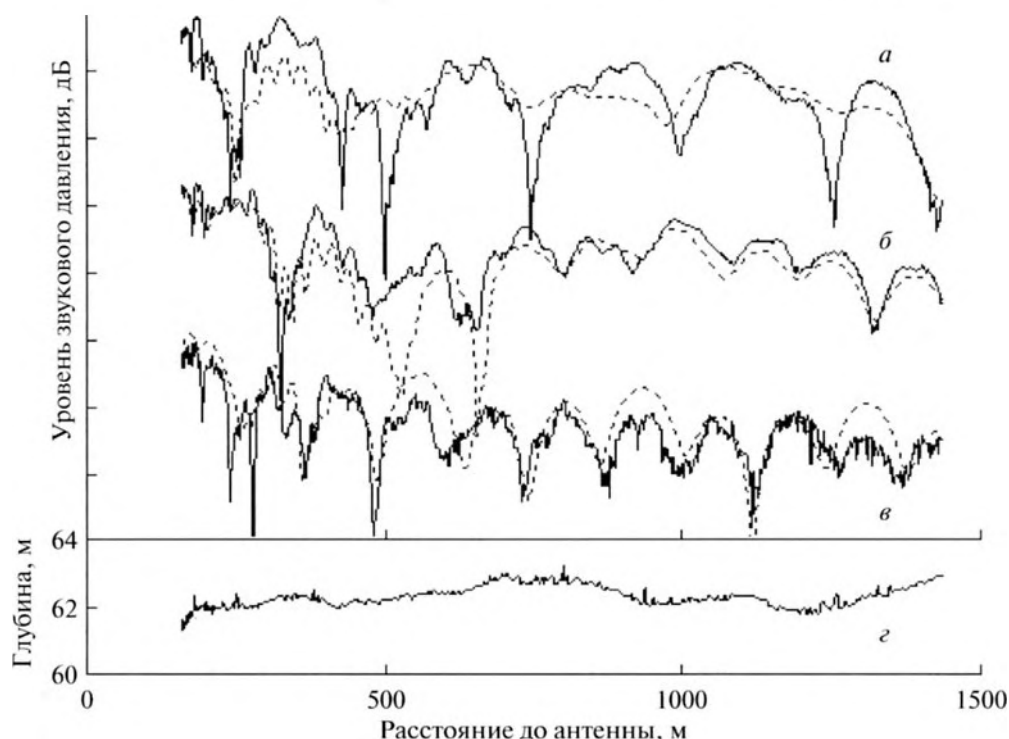


Рис. 10. Зависимости относительной интенсивности звукового поля от расстояния:  $z = 13$  м (а),  $z = 23$  м (б),  $z = 34$  м (в), показания эхолота вдоль измерительной трассы (з),  $f = 117$  Гц.

на быть меньше на 1.5 м, чтобы соответствовать результатам измерений глубины эхолотом. При расчетах также использовались формулы (1) и (2). Можно отметить удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных для глубоководного ГФ (кривая в), глубина которого определена достаточно точно с использованием датчика глубины. Для ГФ, расположенных на меньшей глубине, совпадение несколько хуже (кривые а и б). Это можно объяснить следующим образом. Вблизи поверхности моря существенно возрастает относительный вклад в звуковое поле мод высоких номеров. Вертикальное распределение амплитуды этих мод имеет малый масштаб по глубине. Поэтому неточности оценки глубины ГФ и вариации во времени глубины их расположения из-за качки судна будут сильнее всего сказываться на сигналах, зарегистрированных вблизи поверхности моря. В частности, из-за перемещения по вертикали происходит замыкание интерференционных минимумов. Но даже и для малых глубин сигналы в зонах интерференционных максимумов существенно устойчивее и лучше согласуются с расчетными значениями. В середине волновода (глубина гидрофона 34 м) основную роль при формировании поля играют моды низких номеров, амплитуда которых значительно устойчивее к вариациям глубины приема. Как следствие, улучшается согласие экспериментальных и расчетных данных.

Таким образом модель ПФВ, полученная по сигналам буксируемого тонального излучателя с частотой 48 Гц, удовлетворительно предсказывает интерференцию звукового поля и на частоте 117 Гц. Близкие результаты получены и для сигналов, излученных на частоте 320 Гц. Но для частоты 570 Гц структура поля и величины сигналов, рассчитанные с использованием разработанной модели ПФВ (табл. 2 и 3), существенно отличаются от экспериментальных данных. Следовательно, для частот выше 400 Гц модель или параметры модели необходимо уточнять. Для подтверждения этого вывода – возможности применения разработанной модели на частотах до 300–400 Гц – рассмотрим частотные зависимости фазовых скоростей первых трех мод. На рис. 11 показаны измеренные по импульсным сигналам от ПИ оценки фазовых скоростей мод и их среднеквадратичные отклонения. Сплошными линиями на рисунке изображены зависимости фазовых скоростей мод от частоты, вычисленные для модели волновода, параметры которой приведены в табл. 2, а пунктиром – для модели, параметры которой представлены в табл. 3. Цифры у кривых обозначают номер моды. Из рис. 11 следует, что зависимости от частоты фазовых скоростей первых трех мод, рассчитанные с использованием двух моделей, почти не различаются и хорошо описывают экспериментальные данные в широкой полосе частот. Видно также, что параметры грунта, вычис-

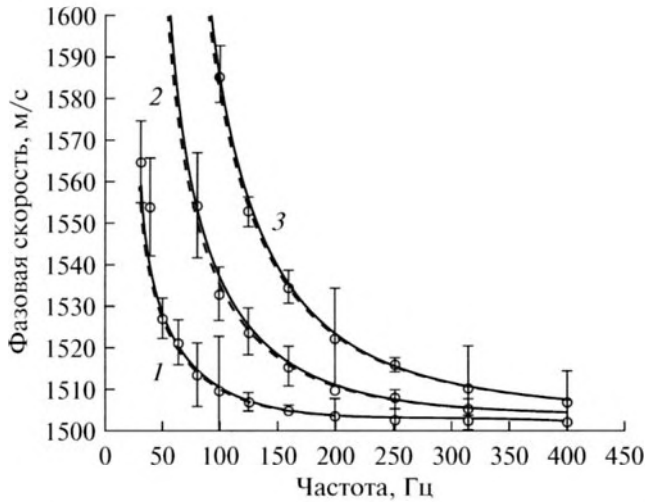


Рис. 11. Зависимости фазовых скоростей первых трех мод от частоты.

ленные в рамках одной и той же достаточно простой модели ПФВ (табл. 1 и 2), на расстояниях более 500 м дают сопоставимые результаты как для импульсных, так и для тональных сигналов. Это позволяет сделать вывод о возможности построения адекватных моделей грунта и ПФВ в мелком море при использовании различных технических средств и различных методов.

### 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИВЕДЕННОГО К СВОБОДНОМУ ПРОСТРАНСТВУ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

При пересчете в точку излучения величины звукового давления, зарегистрированного удаленными на расстояние  $r$  гидрофонами, следует учитывать модель источника, в частности, его направленность в горизонтальной и вертикальной плоскости [16, 17]. Необходимо также различать процедуру пересчета узкополосных сигналов или сигналов в широкой полосе частот. Для широкополосных сигналов с полосой обработки  $\Delta F \gg \Delta f_{kl}$ , где  $\Delta f_{kl}$  — разность частот между двумя соседними интерференционными максимумами, можно не учитывать пространственно-частотную интерференцию и пользоваться только усредненными законами спада для регулярной компоненты поля [17–19]. Такая ситуация наблюдается, например, при обработке сигналов с полосой анализа  $1/3$  октавы. Для узкополосного сигнала при  $\Delta F \ll \Delta f_{kl}$  и, тем более, для высококогерентных дискретных составляющих необходимо использовать полную модель поля, включающую регулярную и осциллирующую части, образованные в результате когерентного суммирования нормальных волн [20].

На рис. 7–11 показано, что можно достаточно точно прогнозировать параметры нормальных

волн и пространственную интерференцию с использованием разработанной модели грунта и построенной на ее основе модели ПФВ. Установлено, что усложнение модели (введение упругого полупространства), по крайней мере, для данного района мелкого моря повышает точность описания поля только на малых расстояниях — до 500 м (рис. 8, 9). На больших расстояниях структура поля определяется в основном модами первых номеров, характеристики которых удовлетворительно описываются моделью с одним или двумя жидкими слоями грунта и жидким полупространством.

Экспериментально подтверждена пространственная однородность волновода и адекватность параметров модели реальным характеристикам волновода. Это позволило выполнить высокоточный прогноз интерференционной структуры поля с использованием единой модели ПФВ на разных частотах и на различных расстояниях, по крайней мере, на площади  $3 \times 5 \text{ км}^2$ . Адекватность модели грунта и ПФВ подтверждается также тем, что величина коэффициента пространственной корреляции, точнее, коэффициента предсказания [21] между измеренной и рассчитанной интерференционными зависимостями звукового давления от расстояния для частоты 48 Гц находится в пределах 0.98–0.99 для всех одиннадцати глубин приема. Коэффициент предсказания для рассчитанных зависимостей на частоте 117 Гц, несмотря на сложные условия проведения экспериментов (при отливе и качке), лежит в пределах 0.87–0.96 для разных горизонтов приема. С уменьшением глубины приема коэффициент предсказания уменьшается.

Высокий коэффициент предсказания свидетельствует о достаточно точном прогнозе интерференционной структуры, что является обязательным при пересчете в точку излучения узкополосных сигналов. Вместе с тем, только высокой корреляции и точности описания интерференции недостаточно — необходимо доказать несмещенность усредненных по дистанции оценок. Для этого в экспериментах использованы:

- абсолютно калиброванные сквозные приемные тракты антенн;
- высокоточная система позиционирования приемной антенны и источника;
- абсолютно калиброванные излучатели с аттестованной моделью и характеристиками, соответствующими модели рабочего эталона;
- разработанная в настоящей работе адекватная модель ПФВ.

При подготовке экспериментов приемные каналы вертикальной антенны были откалиброваны в гидроакустическом бассейне с погрешностью не более 1.5 дБ. Позиционирование приемников относительно буксируемого излучателя обеспечивалось с погрешностью не более 5 м. Ха-

характеристики модели грунта и, соответственно, модели ПФВ определены в зоне установки приемной антенны, вдоль трассы распространения сигналов и в зоне буксировки излучателей. Результаты АК различных зон хорошо согласуются, что позволяет использовать разработанную модель ПФВ для пересчета измеренных величин звукового давления в точку излучения.

Отметим, что излучатели, приведенные на рис. 3 и 4, были откалиброваны в море с использованием шести абсолютно калиброванных приемников, которые регистрировали звуковое давление по шести направлениям, сдвинутым друг относительно друга на угол  $\pi/2$ . Методика и результаты калибровки излучателей подробно изложены в [12]. Установлено, что при выбранных режимах излучения средние значения и среднеквадратические отклонения звукового давления, приведенные к расстоянию 1 м от фазового центра излучателей, равны: для частоты 48 Гц —  $P_1 = 1101 \pm 178$  Па, для частоты 117 Гц —  $P_1 = 2778 \pm 320$  Па. Кроме того, установлено, что на 90% уровне значимости модели излучателей не противоречат гипотезе о монополюсном характере излучения (это полностью согласуется с конструкцией излучателей). Именно такая модель излучателя применялась при построении модели ПФВ и при пересчете звукового давления из точек излучения в точки приема с использованием интерференционных зависимостей, представленных на рис. 8–10. Установлено путем усреднения сигналов на интервале расстояний от 200 до 3000 м (для частоты 48 Гц) и от 200 до 1450 м (для частоты 117 Гц), что пересчитанные к 1 м величины принятых сигналов равны: для частоты 48 Гц —  $P_1 = 1004 \pm 201$  Па, для частоты 117 Гц —  $P_1 = 2587 \pm 353$  Па.

При формировании выборки для пересчета в точки излучения крайне важно, какие участки интерференционных кривых использовались для пересчета. При использовании произвольных точек с равными интервалами через 50 м, взятыми, в том числе, в точках с минимальными значениями интерферирующего сигнала, приведенные выше средние значения отличаются от результатов, полученных при абсолютной калибровке образцовых излучателей, на 15–30%. Но среднеквадратические отклонения имеют величину до 35%. Если использовать для пересчета звукового давления точки, выбранные только в зонах интерференционных максимумов, то различие средних значений практически сохраняется, но среднеквадратические отклонения уменьшаются почти в полтора раза. Отсюда следует важный вывод — при пересчете звуковых давлений из точек приема в точки излучения, по возможности, следует выбирать величины, зарегистрированные в зонах интерференционных максимумов. Это обеспечивает большую устойчивость результатов пересчета к вероятным

изменениям характеристик волновода во времени или по пространству. Одновременно увеличивается отношение сигнал/помеха и уменьшается влияние аддитивных помех. Моделирование указанной процедуры подтверждает выводы, полученные из анализа экспериментальных данных.

## 6. ВЫВОДЫ

Экспериментально показана реальная возможность оценки с малой погрешностью (не более 2.5–3 дБ) низкочастотного звукового давления, приведенного к свободному пространству и расстоянию 1 м. Измерения произведены на расстояниях до 2–3 км. Для обоснования точности пересчета использованы абсолютно калиброванные приемники и буксируемые излучатели, высокоточная система позиционирования. Адекватная модель ПФВ получена в результате акустической калибровки волновода.

В зависимости от требований, предъявляемых различными прикладными задачами, условий и методик выполнения измерений, в частности, дальности до источника шума, уровень которого оценивается, следует выполнять АК волновода в различных зонах. Предлагается различать АК зоны установки антенн, АК трассы распространения сигнала и АК района установки или буксировки излучателей. Современные методы, алгоритмы и технические средства позволяют решать эти задачи независимо или совместно. В последнем случае при решении обратной оптимизационной задачи упрощается процедура выбора начального приближения и методы дополняют друг друга. Если измерения выполняются в однородном волноводе и на малых расстояниях, то любой из рассмотренных методов может быть использован для получения адекватной модели ПФВ.

Для акустической калибровки перечисленных районов можно использовать как широкополосные импульсные, так и высококогерентные тональные источники. При использовании различных технических средств необходимы различающиеся методики экспериментов и алгоритмы обработки.

В мелком море моды высоких номеров, как правило, достаточно быстро затухают. И на расстояниях, превышающих 500–1000 м, в однородных по глубине районах на частотах ниже 50–100 Гц можно пользоваться простыми моделями с одним или двумя жидкими слоями грунта, лежащими на жидком полупространстве. Для более точного описания интерференции на малых расстояниях или в зонах выхода коренных пород необходимо учитывать моды высоких номеров, проникающие в глубинные слои жесткого грунта. Для этого необходимо вводить в модель упругое полупространство.

Рассчитанные в результате акустической калибровки волновода характеристики звукового поля хорошо согласуются с экспериментальными данными для различных глубин приема и излучения сигналов на различных участках трассы и в широкой полосе частот. Это позволяет для однородного волновода сделать вывод о достаточной точности вычисления параметров модели и об адекватности полученной модели реальным свойствам грунта в районе экспериментов.

Результаты аттестации ПФВ в мелком море позволяют сделать вывод о реальной возможности их использования для оценки приведенной шумности источников. Оценка приведенной шумности с использованием модели ПФВ повышает помехоустойчивость и точность пересчета измеренных величин, а также устраняет смещения значений приведенной шумности. Характеристики ПФВ можно использовать как при пересчете сигналов от многоэлементной измерительной антенны, так и при групповой обработке сигналов, принятых разнесенными в пространстве одиночными ГФ.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую благодарность академику Ф.В. Бункину за внимание к работе и ценные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
2. Glebova G.M., Kuznetsov G.N. Noise immunity of various receiving antenna arrays in shallow sea // *Phys. Wave Phenom.* 2001. V. 9. № 2. P. 115–123.
3. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 369 с.
4. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 181 с.
5. Choi J.W., Dahl P.H. Measurement and simulation of the channel intensity impulse response for the site in the East China Sea // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. V. 119. № 5. P. 2677–2685.
6. Tolstoy A., Diachok O., Frazer L.N. Acoustic tomography via matched field processing // *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. V. 89. P. 1119–1127.
7. Григорьев В.А., Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Определение поглощающих и рассеивающих свойств дна в мелком море по спектрам широкополосных сигналов // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. № 3. С. 330–335.
8. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Исследование локальных акустических характеристик дна мелкого моря // Сб. тр. XIII сессии РАО. М.: ГЕОС, 2003. Т. 4. С. 40–43.
9. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Методы и результаты идентификации акустических моделей районов установки приемных систем, трасс распространения сигналов и зон расположения излучателей // Сб. тр. XXIV сессии РАО. М.: ГЕОС, 2011. Т. 2. С. 319–326.
10. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселёв Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 223 с.
11. Glebova G.M., Kuznetsov G.N. Estimating parameters of signal sources and characteristics of noise field by using spatially separated vector-scalar modules // *The Formation of acoustical fields in oceanic waveguides, reconstruction of inhomogeneities in shallow water.* N. Novgorod: Inst. Appl. Phys., 1998. V. 1. P. 109–121.
12. Белов А.И., Боголюбов Б.Н., Кузнецов Г.Н. Калибровка низкочастотного излучающего комплекса в условиях мелкого моря // Тр. VI межд. научн.-техн. конф. “Современные методы и средства океанологических исследований”. М.: ИО РАН, 2000. С. 139–147.
13. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M. Optimization by simulated annealing // *Science.* 1983. V. 220. P. 671–680.
14. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 211 с.
15. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // *J. Computer.* 1965. V. 7. P. 308–313.
16. Быковцев Г.И., Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Акустическое поле направленного источника в океанических волноводах // *ДАН СССР.* 1985. Т. 280. № 1. С. 57–59.
17. Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Аппроксимирующие модели регулярной составляющей инфразвукового поля мультипольных источников в плоском волноводе // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 3. С. 378–390.
18. Грачев Г.А. Особенности затухания сигналов в мелком море // *Акуст. журн.* 1983. Т. 29. № 2. С. 275–277.
19. Гиндлер И.В., Петников В.Г. Затухание звука в многолучевом волноводе при различных горизонтах излучения и приема // *Акуст. журн.* 1987. Т. 33. № 2. С. 355–356.
20. Грачев Г.А., Кузнецов Г.Н. Ослабление интерференционных максимумов акустического поля в мелком море // *Акуст. журн.* 1985. Т. 31. № 5. С. 675–678.
21. Кравцов Ю.А., Ниязов Б.А., Петников В.Г. О степени детерминированности волновых полей в многолучевых волноводах со случайными неоднородностями // *Акуст. журн.* 1986. Т. 32. № 6. С. 823–826.