УДК 534.34; 534.231

© *А. И. Белов, Г. Н. Кузнецов*
Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва
skbmortex@mail.ru

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН МЕЛКОГО МОРЯ

Оценка передаточной функции волновода необходима для измерения с заданной точностью приведенной шумности морских объектов и выполнения согласованной фильтрации принятых сигналов для оценки глубины и дальности до объекта в пассивном режиме. В статье анализируются разработанные методики, обсуждается возможность использования различных технических средств для акустической калибровки локальных зон мелкого моря и получения адекватных моделей грунта с оценкой их параметров в зонах расположения приемных антенн, в районе движения или буксировки источника, а также вдоль трассы распространения сигналов. Полученная информация совместно с результатами оценки вертикального распределения скорости звука позволяет дать аналитическое описание передаточной функции волновода в зависимости от расстояния, рабочей частоты, глубин расположения излучателей и приемников. Приводятся результаты сравнения различных методик и экспериментальной оценки параметров модели грунта в однородном и неоднородном волноводах. Обосновываются преимущества применения метода Вигнера для оценки параметров нормальных волн. Выполняется сравнение различных моделей и оценивается их адекватность путем расчета корреляционных соотношений между экспериментальными и теоретическими зависимостями звукового поля, а также путем оценки приведенной шумности с использованием абсолютно калиброванного излучателя, шумность которого была известна. Даются практические рекомендации и обосновываются методы прогноза (предсказания) интерференционной структуры поля и обеспечения состоятельных оценок приведенной шумности.

Ключевые слова: мелкое море, нормальные волны, буксируемые источники тональных и импульсных сигналов, метод Вигнера, зоны интерференционных максимумов, модели и параметры грунта.

A. I. Belov, G. N. Kuznetsov
Wave Research Center at Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
skbmortex@mail.ru

METHODS AND RESULTS OF ACOUSTIC CALIBRATION OF SHALLOW SEA LOCAL ZONES

The estimation of the waveguide transfer function is required to measure the mentioned noise level of marine objects with a given accuracy and to perform matched filtering of the received signals for assessment of the depth and distance to the object in passive mode. The paper analyzes and discusses the methodology developed by the use of various technical means for acoustic calibration of local zones of shallow water and getting adequate models of ground with parameter estimation in the areas of the receiving antenna, in the area of traffic or towing of the source, as well as along the path of signals propagation. The information received, together with an evaluation of the vertical distribution of sound velocity allows us to give an analytical description of the waveguide transfer function according to the distance, the operating frequency, the depth of the transmitter and receiver. The results of comparison of different methods and of experimental estimation of the model parameters of the ground in homogeneous and inhomogeneous waveguides are presented. The advantage of applying the Wigner method to estimate the parameters of normal waves is proved. A comparison of different models is performed, their adequacy is estimated by calculating the correlation ratio between the experimental and theoretical dependences of sound field, as well as by assessing the noise

with absolutely calibrated source noise which was known. Practical recommendations are given, the methods of the interference field structure prediction and of providing the consistent estimates of the noise of the source are justified.

Key words: shallow sea, the normal waves, towed sources tonal and pulse signals, the method of Wigner, area interference maxima, models and parameters of ground.

Для настройки рабочих характеристик измерительных гидроакустических систем или систем обнаружения, выполняющих согласованную фильтрацию, для пересчета приведенной шумности и прогноза гидроакустических полей с использованием передаточной функции волновода (ПФВ) необходима информация о вертикальном профиле скорости звука и параметрах морского дна [1–6]. Первая — вследствие накапливающихся эффектов — особенно важна для высоких частот и больших расстояний, вторая необходима, особенно для низких частот, как для ближней, так и для дальней зоны.

В работах [7–9] отмечается, что для эффективного решения поставленных задач необходимо выполнять оперативное исследование различных гидрофизических полей. Рекомендуется для прогноза скрытности учитывать или измерять характеристики локальных зон морской среды. Отмечается, что использование конкретных гидрофизических характеристик морской среды обеспечивает для выбранного района верификацию оперативной модели передаточной функции волновода. Отсюда следует, что для построения рабочей модели ПФВ и прогноза пространственно-частотных характеристик звукового поля необходимо выполнять оценку акустических параметров модели дна непосредственно в выбранном районе. Решение этой задачи выполняется различными методами и техническими средствами. Можно показать, что классические методы геофизики, такие как метод отраженных волн, метод преломленных волн и различные их модификации, не дают необходимых для гидрофизики и гидроакустики точностей оценки акустических параметров дна. Как правило, значения скорости продольных волн в верхней части донных отложений, полученные разными авторами методом преломленных волн, определяются с погрешностью более 100–150 м/с [10, 11], что неприемлемо. С 1970–80-х гг. в СССР, в России и за рубежом реконструкция акустической модели дна и построение функциональных зависимостей, определяющих пространственно-частотные характеристики поля в волноводе, производятся на основе решения обратной задачи. Для этого выполняется минимизация различных разностных функционалов, в которые входят рассчитанные и экспериментально измеренные в различных точках и на различных частотах характеристики звукового поля [2–6].

Несмотря на то, что теория и практика решения упомянутой выше обратной задачи еще находятся «в развитии», можно отметить, что общие принципы и подходы решения задачи реконструкции модели сформулированы. Их назначение — сделать «математически некорректную» задачу «физически корректной». Для этого обратная акустическая задача должна решаться с использованием в качестве нулевого приближения некоторых достоверных характеристик, например, геолого-геофизических характеристик грунта или характеристик мод, экспериментально измеренных «прямыми» методами в районе экспериментов. Вычисленные параметры модели не должны противоречить известным геологическим данным и регрессионным соотношениям между скоростью продольных волн и плотностью грунта, скоростями продольных и поперечных волн и т. д. [1, 11, 12].

При решении обратной задачи должен также реализовываться «принцип простой модели», чтобы число оцениваемых параметров было минимально возможным. Отсюда, в частности, следует, что используемые для расчетов модели ПФВ должны иметь дискретное и ограниченное число параметров. Такими свойствами на низких частотах обладает модель поля в маломодовом приближении [2, 5, 6, 13].

Далее, для простоты и краткости — задача идентификации в рамках принятой модели параметров модели грунта с использованием массива экспериментальных данных для обоснования модели ПФВ будет называться акустической калибровкой (АК) волновода. Соответственно, с учётом требований различных практических задач будем различать АК зоны установки приемных антенн, АК трассы распространения сигналов от источников к приемникам и АК зоны установки или буксировки излучателей.

Выбор зон и задач акустической калибровки. В развитие [2, 5, 6, 14, 15] рассмотрим варианты АК трех перечисленных зон. Такое представление, как мы считаем, не закрывает проблему, но позволяет выделить некоторые важные технические приложения. Предложенная классификация вариантов АК достаточно условная, так как перечисленные варианты АК иногда трудно разделить, и они могут использоваться совместно и одновременно, дополняя друг друга.

Акустическая калибровка зоны установки приемных антенн необходима для построения модели ПФВ и обеспечения когерентного суммирования антенной сигналов, принимаемых пространственно разнесенными гидрофонами. Это позволяет сформировать направленный и помехоустойчивый отклик. Известны различные методы АК зоны установки антенн. В основном, они используют разрешение нормальных волн от широкополосных импульсов, излученных на большом расстоянии [2, 14, 15]. Ниже рассматривается именно такой способ АК зоны установки вертикальной антенны (ВА).

Акустическая калибровка трассы распространения сигналов, основанная на оценке характеристик грунта вдоль трассы, может использоваться для районирования морей и формирования баз геоакустических данных [11, 16]. Это обеспечивает эффективный прогноз дальности обнаружения, точности пеленгования и оценки приведенных уровней сигнала (шумности) на малых и больших дальностях. Решение этой задачи также необходимо для высокоточной оценки геометрии пространственно развитых стационарных измерительных антенн и позиционирования в волноводе движущегося источника, шумность которого оценивается (задача «акустической дальнометрии» [17]).

В случае использования активной гидролокации знание ПФВ вдоль трассы распространения повышает точность оценки дистанции до отражателя и его глубины. Как следствие, уменьшается погрешность оценки отражательной способности объекта наблюдения. Ниже для определения усредненных вдоль трассы распространения характеристик мод и слоев грунта (АК трассы) используются измеренные зависимости от частоты группового времени запаздывания импульсных сигналов [2, 5, 14, 15].

Акустическая калибровка зоны расположения и буксировки излучателей использует, как правило, общепринятый метод синтезирования апертуры, основанный на буксировке в выбранном районе тональных излучателей [6, 15, 18]. Результаты синтезирования могут использоваться для оценки приведенной шумности источников.

Результаты АК в такой постановке могут также применяться для решения задачи акустической маломодовой томографии, основанной на возбуждении в волноводе одной или нескольких мод с известными номерами и характеристиками [19]. Для этой цели используются вертикальные гирлянды излучателей, перекрывающие толщу волновода. Однако для введения необходимого амплитудно-фазового распределения следует учесть граничные условия, т. е. характеристики модели дна непосредственно в зоне расположения излучающих антенн [20].

В целом можно отметить, что рассчитанные в рамках решения обратной задачи параметры модели грунта после их подстановки в аналитические выражения для ПФВ в модовом или лучевом представлении [2, 13] позволяют более эффективно решать целый ряд перечисленных выше гидрофизических и гидроакустических задач.

Оценка локальных параметров акустической модели грунта в различных зонах. Выше отмечалось, что для акустической калибровки грунта и реконструкции модели ПФВ могут быть использованы как импульсные, так и тональные излучатели. Предполагается, что излучатель буксируется в ближней или дальней зоне относительно приемных горизонтальных или вертикальных антенн (рис. 1). При подготовке экспериментов производится измерение профиля скорости звука — по возможности, в различных точках волновода и неоднократно.

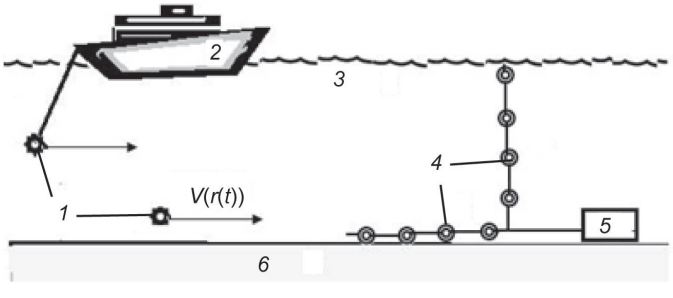

Рис. 1. Обобщенная схема расположения технических средств для акустической калибровки волновода.
1 — излучатели; 2 — судно-носитель; 3 — свободная поверхность; 4 — вертикальная или горизонтальная приемная антенна; 5 — аппаратурный блок приема и передачи информации; 6 — многослойный грунт.

Координаты приемников определяются в результате калибровки антенн — одновременно оценивается геометрия расположения приемных элементов, и измеряются разности фаз между приемными каналами. При необходимости абсолютных измерений выполняется оценка отношения модуля коэффициентов усиления всех приемных каналов относительно одного канала с известной абсолютной чувствительностью. Выполняется также позиционирование излучателя относительно приёмников. Эксперименты проводятся в системе единого времени.

Ниже рассматриваются результаты акустической калибровки двух различных районов мелкого моря. Первый характеризуется сложной структурой водных масс и неоднородным распределением скорости звука по глубине, относительно большой глубиной и переменной вдоль трассы буксировки излучателя толщиной подстилающих слоев грунта. Второй — в период экспериментов — характеризуется отсутствием зависимости скорости звука от глубины, а также постоянной глубиной волновода вдоль трассы буксировки и плоскослоистым грунтом.

Акустическая калибровка среднеглубинного волновода со сложной структурой водных масс. Эксперименты проводились вдали от берегов с использованием двух судов. С одного судна осуществлялось излучение тональных или импульсных звуковых сигналов, а на другом выполнялся их прием и регистрация. Расстояние между судами определялось с помощью судовых РЛС. Излучение и прием сигналов производились в системе единого времени. Дно в районе исследований, по данным эхолота, было плоским и горизонтальным. Средняя глубина моря H_0 составляла 242 м. Вертикальное распределение скорости звука в водном слое во время экспериментальных работ характеризовалось ярко выраженным придонным звуковым каналом и верхним перемешанным слоем толщиной 25–30 м. На первом этапе исследований были выполнены две серии широкополосных импульсов на расстояниях 16700 и 18600 м от точки приема. Глубина излучения составляла 40 м. Прием сигналов осуществлялся на несколько одиночных ненаправленных гидрофонов (ГФ), разнесенных по глубине.

Использование импульсных ЛЧМ-сигналов. Для обработки зарегистрированных сигналов использовалось преобразование Вигнера [21], которое для аналитического сигнала определяется как двумерная функция времени и мгновенной частоты. Основное преимущество использования этого преобразования для локализации сигнала на плоскости «время–частота» по сравнению с классической сонограммой состоит в том, что для него фундаментальным сигналом является не только гармонический сигнал, но и сигнал с ЛЧМ.

Измеренные экспериментально, обработанные по преобразованию Вигнера (рис. 2) и теоретические зависимости [13] групповых скоростей мод V использовались для разработки акустической модели морского дна.

Оптимизация процедуры поиска характеристик модели дна выполнялась минимизацией функционала $L = \sum_{f_V} \sum_{n_V} (V^e - V^c)^2$, где f_V, n_V — значения частот и количество мод на этих частотах, для которых были получены оценки групповых скоростей. Индексами e и c обозначены, соответственно, экспериментальные оценки и рассчитанные значения групповых скоростей мод.

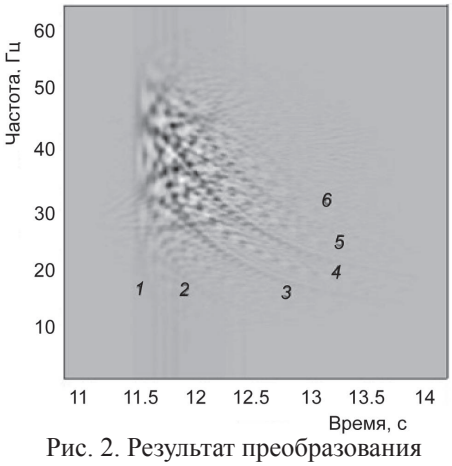

Рис. 2. Результат преобразования по методу Вигнера.
Цифрами обозначены номера мод.

Минимизация выполнялась путем многомерной оптимизации методом Нелдера-Мида (симплекс метод) [22]. В результате оптимизации с использованием различных моделей дна установлено, что зарегистрированные на низких частотах экспериментальные данные хорошо описываются относительно простой моделью, представляющей собой два однородных жидких слоя, лежащих на жидком полупространстве. Верхний — водный слой — имеет толщину H_0 = 242 м, второй жидкий слой (грунта) имеет толщину 38 м, плотность — 1810 кг/м , скорость продольных волн — 1643 м/с. Плотность жидкого полупространства — 2215 кг/м^3, скорость продольных волн — 2260 м/с. На рис. 3 видно хорошее согласие экспериментальных и рассчитанных значений групповых скоростей. Цифрами обозначены номера мод. Кружки соответствуют расстоянию до приемной системы 18600 м, а точки — расстоянию 16700 м.

Для дополнительного обоснования адекватности разработанной модели дна использовались сигналы импульсного источника, принятые на расстоянии 3400 м. Столь малое расстояние было выбрано с целью попытки выделить грунтовые волны. На рис. 4 приведена усредненная огибающая зарегистрированных сигналов. Видны два прихода грунтовых волн (предвестников [23]), опережающих сигнал, распространяющийся по водному слою. Лучевой расчет с использованием разработанной модели дна по схеме, показанной на рис. 5, дал следующие времена прихода двух грунтовых волн: 1.723 и 2.139 с, которые хорошо соответствуют экспериментальным данным. На рис. 6 представлены результаты расчета по формулам, приведенным в [13], полного интегрального представления звукового поля, но с полученной моделью грунта. Из рис. 6 следует, что расчетным путем также обнаруживаются два прихода волн, опережающие водный сигнал. При этом их положение хорошо соответствует экспериментальным данным.

Таким образом, несмотря на сложную стратификацию водного слоя, удалось с использованием низкочастотных импульсных сигналов и широкополосной обработки выполнить АК трассы и построить усредненную модель грунта вдоль трассы распространения сигналов достаточно большой протяженности. Согласие характеристик мод, измеренных при различных расстояниях до источника, свидетельствуют об однородности волновода в выбранном районе моря.

Использование тональных низкочастотных сигналов. На втором этапе экспериментальных работ в этом районе по нескольким измерительным трассам была выполнена буксировка тонального излучателя с частотой 10 Гц — на удаление и сближение с лежащим в дрейфе приемным судном. Длина измерительных трасс не превышала 20 км. Излучатель буксировался на глубине 40 м. Целью экспериментальных работ было измерение зависимости уровня звуковых полей от расстояния и оценка фазовых скоростей мод, формирующих эти поля. Измеренные зависимости уровня интерференционных максимумов звуковых полей использовались также для оценки коэффициентов поглощения волн в слое и полупространстве.

Измерение фазовых скоростей мод осуществлялось методом синтезирования апертуры, в основе которого лежит узкополосная пространственно-временная фильтрация сигнала от тонального излучателя, движущегося с постоянной скоростью в радиальном направлении относительно точки приема. В результате обработки волновых спектров на всех трассах выделены

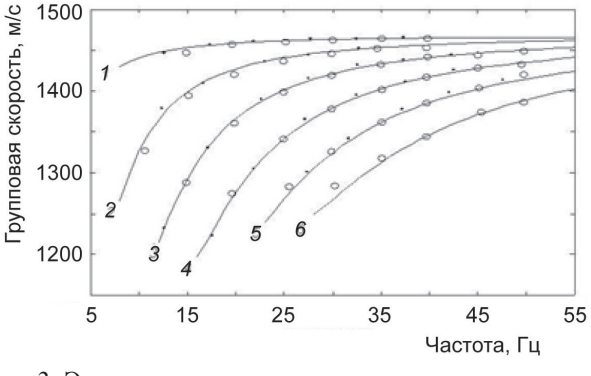

Рис. 3. Экспериментальные и рассчитанные групповые скорости мод в зависимости от частоты сигнала при расстояниях 16700 м (точки) и 18600 м (кружки). Номера мод обозначены цифрами.

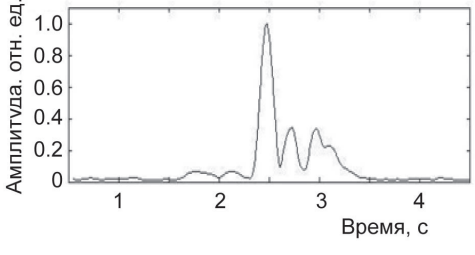

Рис. 4. Усредненная огибающая экспериментально зарегистрированных импульсных сигналов.

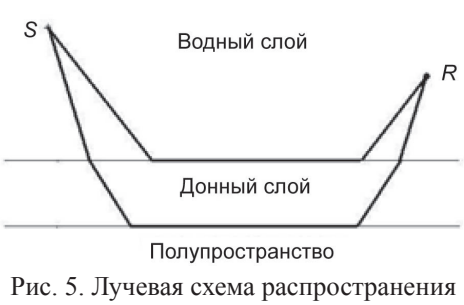

Рис. 5. Лучевая схема распространения придонных волн.
S — излучатель; *R* — приемник.

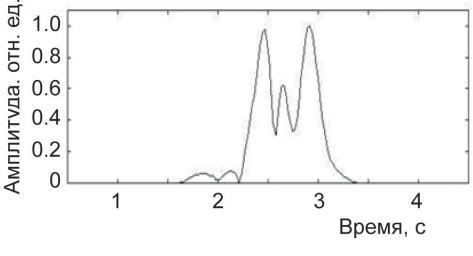

Рис. 6. Огибающая импульсного сигнала, рассчитанная для ближней зоны с использованием интегрального представления.

три моды с фазовыми скоростями (1505.2 ± 38.9), (1705.2 ± 49.6) и (2189.3 ± 84.7) м/с. Анализ показал, что результаты АК трассы, выполненной с использованием тональных сигналов, хорошо согласуются с экспериментальными оценками фазовых скоростей мод, полученными по импульсным сигналам.

Для проверки однородности волновода и уточнения модели дна на протяженных трассах выполнено сравнение рассчитанных и измеренных интерференционных зависимостей уровня звукового поля *I* от расстояния *r*. Глубина места под судном-буксировщиком измерялась эхолотом. Небольшие изменения глубины места вдоль трасс распространения при вычислениях учитывались в рамках метода поперечных сечений в адиабатическом приближении [5, 13]. Установлено, что для адекватного описания измеренных на протяженных трассах звуковых полей в модели дна достаточно варьировать всего один параметр — толщину жидкого слоя, лежащего на полупространстве. На рис. 7, *а* выполнено сопоставление измеренной и рассчитанной зависимостей звукового поля от расстояния. В данной зоне глубина места вдоль трассы распространения составляла 240 ± 4 м/с. Звуковое поле для этой глубины приема (48 м) и излучения (40 м) формируется в основном второй и третьей модами. Для улучшения совпадения положения и величин интерференционных максимумов ввели зависимость толщины верхнего жидкого слоя дна от расстояния. На первых 12 000 м она была равна 34 м, а затем линейно уменьшалась до 30 м.

Для подтверждения данной гипотезы и проверки адекватности разработанной модели дна использовался сигнал, принятый на глубине 145 м (рис. 7, *б*). На этой глубине звуковое поле формируется первой и третьей модами. Видно, что для заданных глубин излучения и приема разработанная с учетом вариации толщины жидкого слоя модель грунта хорошо описывает даже более высокочастотную интерференцию звукового поля. Для всего района работ площадью 20×20 км диапазон изменения толщины верхнего слоя дна, определенный по результатам анализа сигналов на разных трассах буксировки и распространения, составил 30–40 м. Следовательно, по разработанной методике в заданном районе возможна оценка локальных характеристик верхнего жидкого слоя дна для каждой конкретной трассы распространения сигнала.

При использовании модели «два жидких слоя, лежащих на упругом полупространстве» при скорости поперечных волн 400 м/с значение декремента затухания продольных волн в жидком слое грунта равно 3.14×10^{-2}, а в упругом полупространстве — 6.3×10^{-3}, что согласуется с ранее полученными для аналогичного района данными [23].

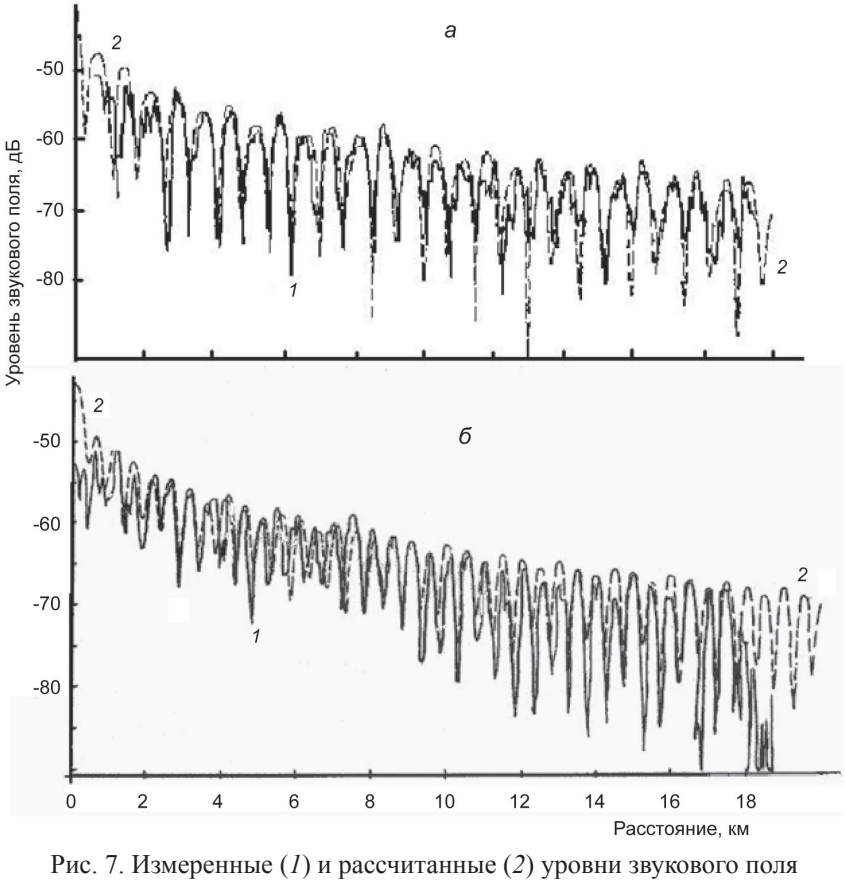

Рис. 7. Измеренные (*1*) и рассчитанные (*2*) уровни звукового поля на глубине приема 48 м (*а*) и 145 м (*б*).

Таким образом, разработанная модель ПФВ, основанная на идентификации модели грунта (два жидких слоя, лежащих на жидком полупространстве), позволяет для выбранного района рассчитать усредненные частотные зависимости групповых скоростей мод, принятых в точке расположения приемной вертикальной антенны (рис. 3). Полученная модель также позволяет рассчитать с высокой точностью интерференционные зависимости — на разных глубинах, но в рамках одной модели (рис. 7).

Акустическая калибровка мелководного волновода с однородным водным слоем. Методика экспериментов заключалась в следующем. С приемного судна опускалась вертикальная антенна (ВА), состоящая из 11 эквидистантно расположенных ГФ. Расстояние между ГФ — 4 м. Глубина верхнего и нижнего ГФ контролировалась датчиками глубины. Второе судно на расстоянии около 10–12 км буксировало пневмоисточник, который излучал широкополосные импульсы. Кроме того, на меньших расстояниях от вертикальной антенны второе судно выполнило две прямолинейные радиальные буксировки низкочастотного тонального электродинамического излучателя с частотой излучения 48 Гц. Расстояние между судами определялось с помощью двух навигационных систем GPS. Глубина волновода H_0 оценивалась в реальном времени эхолотом и была равна 63 ± 1 м. Измеренная средняя скорость звука в водном слое c = 1502 м/с.

На первом этапе АК выполнялась экспертная оценка параметров волновода. Полученные первичные параметры модели дна используются как начальные приближения для последующей оптимизации с использованием измеренной интерференционной структуры звукового поля. Такой подход, хотя и не снимает все проблемы поиска глобального минимума, позволяет разместить начальную точку оптимизации в его достаточно близкой окрестности.

Использование сигналов буксируемого пневмоисточника. На рис. 8 показаны принятые вертикальной антенной сигналы от пневмоисточника в широкой полосе частот. Фильтрация отдельных мод осуществлялась стандартным способом [15] с использованием прямого и обратного преобразования Фурье. На рис. 9 представлены сигналы мод, возбуждаемых пневмоисточником на глубине излучения 30 и 20 м. Центральная частота фильтра — 100 Гц. Видно, что для глубины излучения 30 м распределение амплитуды и фазы второго прихода по глубине соответствуют третьей моде. Для глубины излучения 20 м эти распределения соответствуют второй моде. Расчеты, выполненные в рамках полученной модели (таблица, столбец *а*), подтвердили (рис. 10), что в точках излучения на глубинах 30 и 20 м формируются «нули» вертикального распределения амплитуды, соответственно, второй и третьей моды. Эти зависимости аппроксимировались методом наименьших квадратов функциями вида $A\sin(\sqrt{\omega^2/c^2-\xi^2}z)$ Здесь ω — центральная круговая частота используемого для выделения моды спектрального окна, z — глубина ГФ, A — константа, ξ — искомое продольное волновое число моды. На рис. 10 точками приведено вертикальное распределение амплитуд первых трех мод для частоты 100 Гц.

Измеренные продольные волновые числа сигналов, возбужденных пневмоисточником, явились исходными (нулевым приближением) для построения акустической модели грунта и ПФВ непосредственно в районе установки антенны. Модель дна задавалась в виде системы из M однородных жидких поглощающих слоев, лежащих на жидком или упругом поглощающем полупространстве. В слоях заданы толщины h_m, плотности ρ_m, скорости продольных волн c_m и коэффициенты потерь η_m. В полупространстве заданы плотность ρ_{M+1}, скорости продольных c_L и поперечных c_T волн, коэффициенты потерь η_L, η_T.

Оптимизированные значения толщины водного слоя H и перечисленных параметров модели грунта получены с помощью процедуры, основанной на методе «направленного отжига» [24].

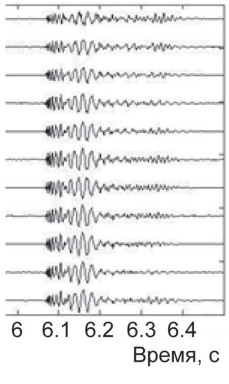

Рис. 8. Широкополосные импульсы, принятые гидрофонами приемной системы.

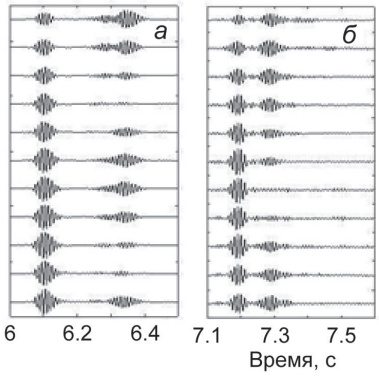

Рис. 9. Приходы мод на частоте 100 Гц.
Глубина излучения 20 м (*а*), 30 м (*б*).

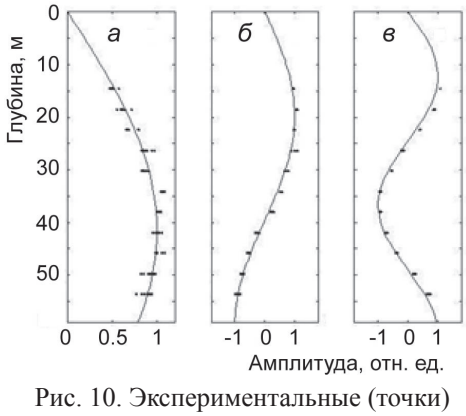

Рис. 10. Экспериментальные (точки) и теоретические (линии) зависимости амплитуды трех мод от глубины.
а, *б* и *в* — 1, 2 и 3-я моды соответственно.

В качестве подлежащего минимизации функционала использовалось известное нижнее граничное условие краевой задачи Штурма [13] $L = \sum_f \sum_n (\gamma \cos(\gamma H) + g(\xi)\sin(\gamma H))^2$, где $\gamma = \sqrt{\omega^2 / c^2 - \xi^2}$, H — глубина слоя воды. Суммирование производится по всем частотам, на которых были выделены моды, и по всем модам для каждой частоты. Функция g вычисляется как нулевой член рекуррентной последовательности $g_{m-1} = \frac{\rho_{m-1}}{\rho_m}\alpha_m \frac{g_m + \alpha_m \hbar(\alpha_m h_m)}{\alpha_m + g_m \hbar(\alpha_m h_m)}$, $\alpha_m = \sqrt{\xi^2 - k_m^2}, k_m = (\omega / c_m)(1 + i\eta_m)$. В качестве начального члена последовательности использовался адмитанс жидкого или упругого полупространства [13].

В результате выполненной оптимизации установлена возможность аппроксимации поверхностных слоев грунта моделью — два жидких слоя, лежащих на жидком полупространстве (таблица, столбец *а*). Первый слой в таблице — слой воды. Для него уточнялась только эквивалентная толщина. Скорость звука — измеренная величина. Второй слой — жидкий слой грунта с указанными в таблице (столбец *а*) параметрами, характеризующими модель волновода непосредственно в зоне установки вертикальной антенны.

Для оценки характеристик грунта в зоне расположения излучателей использованы интерференционные кривые, зарегистрированные ВА при буксировке тонального источника на частоте 48 Гц. Уточненные параметры модели грунта получены с использованием выбранных функционалов невязки.

Например, можно использовать простейший функционал в виде $L = \sum (p_k^i - p_k^j)^2$, где p^i_k и p^j_k — соответственно измеренные и рассчитанные амплитуды звукового давления в k-той точке трассы. Особенностью этого функционала, представляющего метод наименьших квадратов, является равномерность усреднения по всем точкам трассы буксировки излучателя. То есть, он с одинаковым весом учитывает как точки с большими амплитудами, так и с малыми. Это является большим недостатком функционала, поскольку сигналы в зонах интерференционных минимумов неустойчивы к изменениям свойств волновода и координатам корреспондирующих точек. В то же время поле в зонах интерференционных максимумов достаточно стабильно. Поэтому измерение величин сигналов целесообразно производить именно в зонах максимумов звукового поля. Функционал вида $L = 1 - \sum_k p_k^i p_k^j \Big/ \left[\left(\sum_k p_k^{i2}\right)\left(\sum_k p_k^{j2}\right)\right]^{1/2}$, второй член которого является коэффициентом корреляции (предсказания) между измеренными и рассчитанными величинами, учитывает результаты измерений с разным весом. Чем больше амплитуда звукового поля, тем больше вес. Однако и этот функционал не следует использовать, так как он не учитывает ослабления регулярной составляющей звукового поля, обусловленного цилиндрическим расхождением и поглощением звука в грунте.

Рекомендуется использовать для реконструкции модели грунта функционал в виде

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

где d_k — значение некоторой функции в k-й точке, учитывающей пространственное ослабление среднего уровня поля. Для небольших дистанций до излучателя, в первом приближении, в качестве такой функции может использоваться измеряемое расстояние между корреспондирующими точками. Однако целесообразнее использовать зависимость средней энергии поля от расстояния, которая вычисляется путем энергетического суммирования мод (без учета фаз). Именно такая процедура использована далее.

Использование буксируемого низкочастотного излучателя. В результате выполненной по методу Нелдера-Мида [22] оптимизации с использованием интерференции тонального сигнала получены две модели грунта. При оптимизации в качестве нулевого приближения использовались характеристики модели грунта, измеренные по импульсным сигналам в непосредственной близости от вертикальной антенны (таблица, столбец *а*). Результаты расчетов представлены в таблице, столбцы *б* и *в*.

Параметры грунта	Импульсный источник			Тональный источник						
	Жидкое полупространство						Упругое полупространство			
	а			*б*			*в*			
Номер слоя	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
Толщина, м	63.1	9.7	–	63.2	7.7	–	63.2	7.7	152.2	–
Плотность, кг/м^3	1000	1400	1975	1000	1520	1970	1000	1520	1970	2410
Скорость продольных волн, м/с	1502	1602.1	1721.3	1502	1608.4	1699.4	1502	1608.4	1699.4	2890.2
Скорость поперечных волн, м/с	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1447.6

На рис. 11 с использованием модели из таблицы (столбец *б*) для частоты 48 Гц и трех из одиннадцати глубин приема приведено сопоставление экспериментальных данных (сплошные кривые) и результатов расчетов (пунктир). Глубина излучения в данном опыте составляла 25.6 м. Видно, что на расстояниях свыше 500 м от точки приема рассчитанное звуковое поле формируется двумя модами и хорошо согласуется с экспериментальными данными. Однако вблизи приемной системы в экспериментальных данных отчетливо видна высокочастотная пространственная вариация уровня звукового поля. Для ее описания рассмотрена модель в виде системы из трех жидких слоев, лежащих на упругом полупространстве. Введение сдвиговой упругости необходимо в связи с тем, что моды, ответственные за появление высокочастотных флуктуаций, имеют очень большое пространственное затухание. Такие большие величины затухания обычно вызваны оттоком акустической энергии в дно для возбуждения поперечных волн.

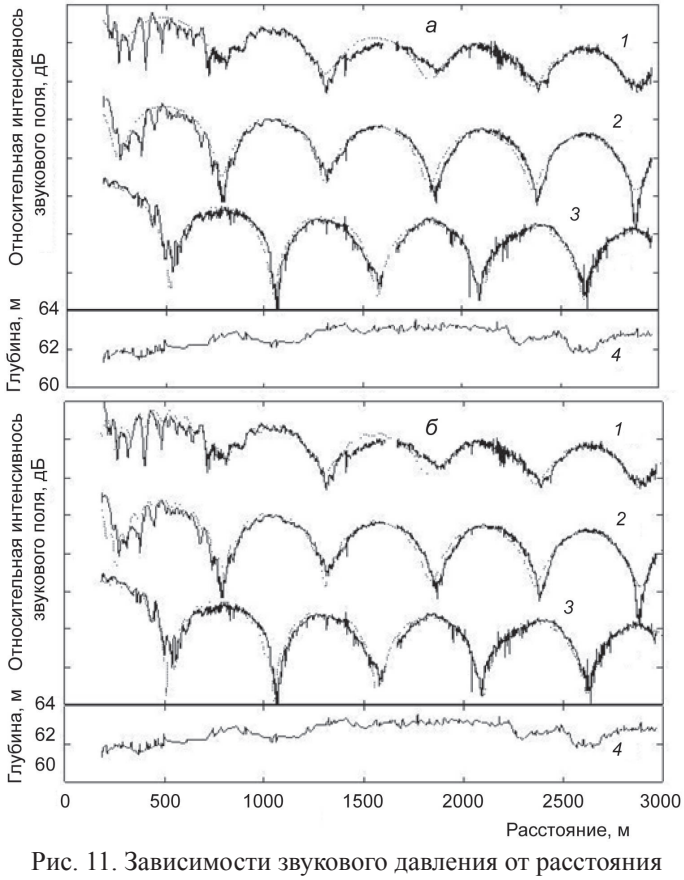

Рис. 11. Зависимости звукового давления от расстояния на различных глубинах (*а*) и относительной интенсивности звукового поля от расстояния; модель – упругое полупространство (*б*).
1 – z = 12 м, *2* – z = 31.5 м, *3* — z = 51 м, *4* — показания эхолота вдоль измерительной трассы.

Для сохранения сходимости расчетных и экспериментальных данных на больших расстояниях варьировались только толщина нижнего жидкого слоя и значения плотности и скоростей продольных и поперечных волн в полупространстве (таблица, столбец *в*). Как показал расчет, количество мод заметно возросло, но затухание мод высоких номеров превышает 3–5 дБ/км. Видно, что в рассчитанном поле появились высокочастотные вариации, которые на малых расстояниях от приемника хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями. Величина коэффициента корреляции между измеренной и рассчитанной зависимостями амплитуды давления от расстояния лежит в пределах 0.98–0.99 для всех глубин приема. Это свидетельствует о возможности предсказания интерференционной структуры и звукового давления с высокой точностью.

На рис. 12 показаны полученные в этом же районе по сигналам от пневмоисточника экспериментальные оценки фазовых скоростей мод и их среднеквадратичные отклонения. Сплошными и

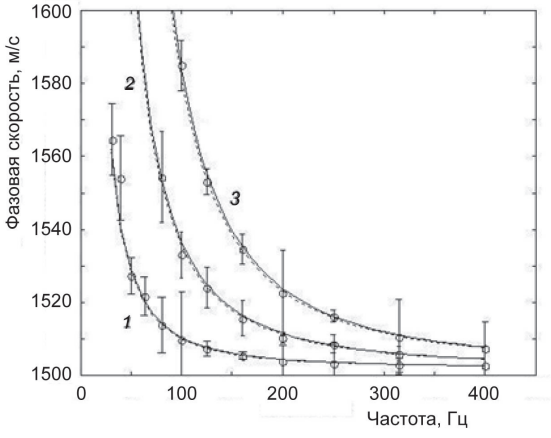

Рис. 12. Зависимости фазовых скоростей первых трех мод от частоты (теория и эксперимент). Цифры у кривых обозначают номер моды.

пунктирными линиями на рисунке изображены зависимости фазовых скоростей мод от частоты для моделей волновода из таблицы (столбцы *а* и *в*). Цифры у кривых обозначают номер моды. Видно, что зависимости фазовых скоростей первых трех мод от частоты, рассчитанные с использованием двух различных моделей, практически совпадают и хорошо описывают экспериментальные данные. Это подтверждает однородность локальной модели грунта в районе экспериментов и высокую точность решения обратной задачи при акустической калибровке волновода.

***

Разработанные и исследованные экспериментально методы акустической калибровки различных зон волновода позволяют выполнить оценку локальных характеристик грунта в выбранном районе. Модель грунта используется для верификации модели передаточной функции волновода, необходимой для решения различных задач оперативной океанологии и гидрофизики.

Использование импульсных широкополосных или полигармонических высококогерентных сигналов позволяет получить сопоставимые точности АК районов установки антенн, зон буксировки излучателей и трасс распространения сигналов. При совместном использовании излучателей различного типа и различных алгоритмов обработки полученные данные могут применяться для проверки адекватности и полноты модели грунта, дополняя друг друга.

При АК протяженных трасс с переменной глубиной волновода для обеспечения адекватности модели волновода необходимо в рамках адиабатического приближения учитывать вариацию глубины моря. Путем перебора или визуальной подгонки можно проверить гипотезу о постоянной или переменной толщине слоев грунта, и, при необходимости, уточнить толщину слоев сличением с экспериментальными данными.

Вертикальную стратификацию водных масс и влияние вертикального профиля скорости звука необходимо учитывать при АК трасс распространения звука большой протяженности. Учет энергии, которая расходуется на возбуждение поперечных волн в упругом полупространстве, позволяет получить адекватные значения декремента затухания звука в слоях грунта и в полупространстве. При учете этих факторов в плоскослоистом волноводе возможно создание адекватных моделей грунта, достаточно точно описывающих и интерференционную структуру, и величину затухания (ослабления) сигнала при увеличении расстояния.

Преобразование Вигнера может с успехом применяться при обработке импульсных, особенно ЛЧМ-сигналов, для выделения мод и оценки их параметров.

На больших расстояниях при $r > (8–10)H_0$ модели грунта, используемые для описания ПФВ на низких частотах, могут быть достаточно просты. В однородных районах мелкого моря, за исключением зон выхода коренных пород, на частотах ниже 50–100 Гц достаточно одного или двух жидких слоев, лежащих на жидком полупространстве. На малых расстояниях при $r < (5–6)H_0$ для описания передаточной функции и интерпретации интерференционной структуры необходимо использовать усложненную модель дна в виде многослойного жидкого грунта, лежащего на упругом полупространстве.

Разработанные методы и полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности достаточно точного описания локальной модели грунта и передаточной функции волновода, что позволяет ставить и решать различные задачи оперативной океанологии, гидрофизики и гидроакустики в исследованных районах.

References

1. *Urick R. J.* Principles of underwater sound. *N. Y., McGraw-Hill,* 1975. 445 p.
2. *Katsnel'son B.G., Petnikov V.G.* Acoustics shallow sea. *Moscow, Nauka,* 1997. 181 p. (in Russian).
3. *Tolstoy A., Diachok O., Frazer L. N.* Acoustic tomography via matched field processing. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1991, 89, 1119—1127.

4. *Baggeroer A. B., Kuperman W. A.* Matched field processing in ocean acoustics. In: Acoustic signal processing for ocean exploration / Eds. by J. M. F. Moura, I. M. G. Lourtie. *Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers,* 1992. P. 79—114.
5. *Belov A. I., Komarov A. G.* An acoustic model of the shallow sea bottom from geological-geophysical studies and acoustic propagation experiments. *Acoust. Phys.* 1998, 44, 3, 260—264.
6. *Belov A. I.* On the possibility of determining the acoustic parameters of sediment characteristics of normal waves in the water layer. *Okeanologiya.* 1995, 35, 4, 629—631. (in Russian).
7. *Volzhenskii M. N., Rodionov A. A., Semenov E. V., Filatov N. N., Zimin A. V., Bulatov M. B.* Experience Verification of operational models for the monitoring of hydrophysical fields of the white sea in 2004—2008. *Fundam. prikl. gidrofiz.* 2009, 3, 5, 33—41. (in Russian).
8. *Rodionov A. A., Semenov E. V., Zimin A. V.* Development of monitoring and forecasting of hydrophysical fields of the marine environment in the interests of secrecy and protection of Navy ships. *Fundam. prikl. gidrofiz.* 2012, 5, 2, 89—109. (in Russian).
9. *Kovalenko V. V., Korchak V. Yu., Chulkov V. L.* The concept and key technology of underwater observation in a network-centric warfare. *Fundam. prikl. gidrofiz.* 2011, 4, 3, 49—64. (in Russian).
10. *Hatton L., Worthington M. H., Makin J.* Seismic Data Processing: Theory and Practice. *Oxford,* 1986. 192 p.
11. Seismic exploration: Geophysics Directory. *Moscow, Nedra,* 1990. 336 p. (in Russian).
12. *Gardner G. H. F., Gardner L. W., Gregory A. R.* Formation velocity and density — the diagnostic basics stratigraphic traps. *Geophysics.* 1974, 39, 770—780.
13. *Brekhovskikh L. M., Lysanov Yu. P.* Theoretical foundations of ocean acoustics. *Moscow, Nedra,* 2007. 369 p. (in Russian).
14. *Belov A. I., Kuznetsov G. N.* Study of local acoustic characteristics of the bottom of a shallow sea. *Sbornik trudov XIII sessii RAO.* Moscow, Geos, 2003, 4, 40—43. (in Russian).
15. *Belov A. I., Kuznetsov G. N.* Methods and results of identification of acoustic models installation areas receiving systems, signal propagation paths and areas of location of emitters. *Sbornik trudov XXIY sessii RAO I Sessii Nauchnogo soveta RAN po akustike.* Saratov. Moscow, Geos, 2011, 2, 319—326. (in Russian).
16. *Nikiforov S. L., Popov V. A., Popov O. E., Seleznev I. A.* The concept of creating a single data base geo-acoustic seabed technology and geo-acoustic modeling. *Fundam. prikl. gidrofiz.* 2010, 3, 9, 49—61. (in Russian).
17. *Ageev M. D., Kasatkin B. A., Kiselev L. V. i dr.* Automatic underwater vehicles. *Leningrad, Sudostroenie,* 1981. 223 p. (in Russian).
18. *Borodin V. V., Kuznetsov G. N.* Reconstruction of the parameters of multilayer shallow sea bottom. *Sbornik trudov shkoly-seminara akad. L. M. Brekhovskikh.* Moskva, Geos, 1998, 91–96. (in Russian).
19. *Goncharov V. V., Kurtepov V. M., Khil'ko A. I. i dr.* Ocean acoustic tomography. *IPF RAN. Nizhniy Novgorod,* 1997. 256 p. (in Russian).
20. *Belov A. I., Kuznetsov G. N.* Characteristics of normal waves exited by vertical arrays in shallow sea. *Physics of Wave Phenomena.* 2006, 14, 3, 66—74.
21. *Poletti M. A.* Linearly Swept Measurents, Time-Delay Spectrometry, and Wigner Distribution. *J. Audio Enj. Soc.* 1988, 36, 6, 457—468.
22. *Nelder J. A., Mead R.* A simplex method for function minimization. *Computer J.* 1965, 7, 308—313.
23. *Ageeva N. S., Krupin V. D., Perelygin V. P., Studenichnik N. V.* Building geoacoustical model bottom in shallow water. *Acoust. Phys.* 1994, 40, 2, 181—188.
24. *Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M.* Optimization by simulated annealing. *Science.* 1983, 220, 671—680.

Статья поступила в редакцию 20.03.2014 г.