

УДК 534.2+534.6

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ДНА В НЕОДНОРОДНОМ ВОЛНОВОДЕ МЕТОДОМ СОГЛАСОВАННОГО ПОЛЯ

Б. В. Кержаков, В. В. Кулинич*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Получены оценки геоакустических параметров слоистого дна в мелководном неоднородном вдоль трассы волноводе с использованием данных натурального эксперимента и метода согласования полей. Исходя из имеющихся априорных геологических и геофизических данных, в качестве исходной геоакустической модели выбран волновод, состоящий из двух слоёв осадков и подстилающего полупространства. При поиске геоакустических параметров, соответствующих глобальному минимуму целевой функции, использовался гибридный алгоритм, представляющий собой комбинацию метода быстрого отжига и метода прямого поиска Хука—Дживса.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с существенным влиянием дна и донных осадков на распространение звука в море большой практический интерес представляют задачи, связанные с исследованием и оценкой их геоакустических характеристик. Эти задачи особенно актуальны в условиях мелкого моря, где их влияние в большинстве случаев является доминирующим фактором.

Актуальность задачи подтверждается большим количеством теоретических и экспериментальных работ, которые посвящены разработке и исследованию методов решения обратных задач, связанных с восстановлением геоакустических характеристик дна и донных осадков. В частности, можно отметить ряд работ, где получили развитие некоторые методы восстановления акустических параметров дна с использованием методов отражённых и преломлённых волн; методов, связанных с данными о потерях звукового поля в донных осадках [1–7]; методов, использующих угловые зависимости и резонансные пространственно-частотные свойства коэффициентов отражения звука от дна [8], а также определение параметров донных осадков на основе измерений горизонтальной и вертикальной интерференционной структуры акустического поля [9, 10].

В настоящее время для оценки геоакустических параметров дна широко используется метод согласованного поля (matched field methods, или matched field processing) [11–13]. Оценка параметров проводится путём согласования экспериментально полученного акустического поля или результатов его обработки, содержащих истинные значения параметров исследуемого волновода, с соответствующими теоретическими зависимостями для модельного волновода, формируемого с учётом имеющейся априорной информации. Согласование проводится на основе целевой функции, определяющей степень отличия (соответствия) экспериментальных и расчётных зависимостей полей, путём вариации величин отыскиваемых параметров в априорно заданной области, содержащей их истинные значения, и определения тех из них, при которых достигается наилучшее согласие экспериментальных зависимостей и теоретических расчётов, соответствующих глобальному экстремуму (минимуму) целевой функции. Задача поиска существенно усложняется при большом числе оцениваемых параметров, что характерно именно при решении обратных задач акустики донных осадков. Целевые функции в этих условиях, как правило, являются функциями овражного типа: они обладают множеством локальных минимумов (экстремумов) и точкой

* kul@hydro.appl.sci-nnov.ru

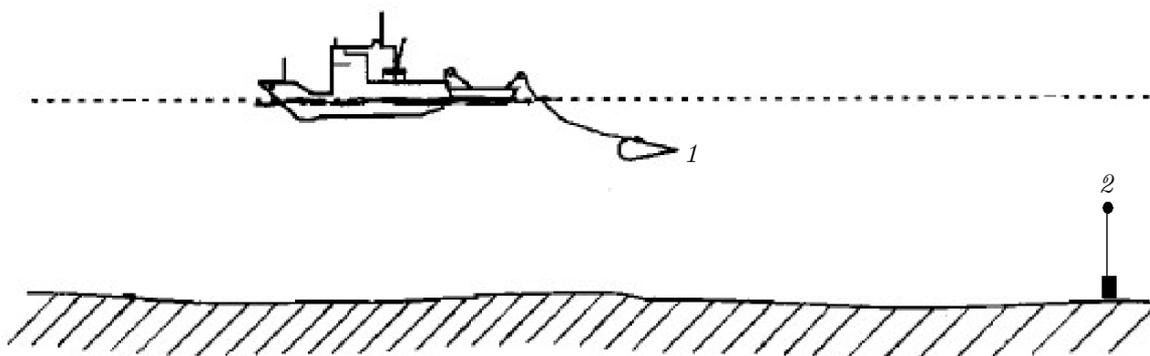


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: 1 — источник, 2 — приёмник

глобального минимума. Для поиска глобального минимума целевой функции в этих условиях используются специальные алгоритмы, позволяющие находить глобальные экстремумы функций многих переменных (см., например, работы [14–16]). Ниже представлены некоторые результаты оценки геоакустических характеристик неоднородного вдоль акустической трассы волновода, глубина и геоакустические параметры донных осадков в котором меняются с дистанцией.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты восстановления геоакустических параметров базируются на данных, которые получены в ходе натурального эксперимента в условиях мелкого моря с использованием исходной модели волновода, основанной на имеющейся априорной информации, полученной из геологических и геофизических исследований. Глубина моря в исследуемом регионе составляла $330 \div 275$ м. Исследования проводились на акустической трассе с протяжённостью около 25 км. Условия распространения звука в районе проведения эксперимента определялись каналом, открытым ко дну, что обуславливало существенное влияние дна и донных осадков на структуру и характеристики звукового поля в нём. Уровень шумов на протяжении всей трассы после предварительной фильтрации был гораздо ниже (примерно на 20 дБ) уровня принимаемых сигналов, и его влияние на оценки параметров волновода не учитывалось.

Эксперимент проводился с использованием буксируемого судном излучающего комплекса, оборудованного тремя низкочастотными ненаправленными источниками, позволяющими одновременно излучать сигналы на трёх частотах $f = 135, 237$ и 537 Гц. Во время эксперимента использовалось непрерывное тональное излучение. Глубина погружения комплекса, уровень излучения на всех трёх частотах, а также скорость движения судна вдоль трассы по возможности поддерживались постоянными. Данные по скорости и текущие координаты судна считывались с корабельной системы и использовались при обработке экспериментальных данных для корректировки масштабов в записях уровней сигналов. Приём и регистрация сигналов осуществлялись одиночным гидрофоном автономной донной станции, расположенной на расстоянии 100 м от дна. Глубина погружения буксируемого излучающего комплекса и скорость буксировки составляли около 50 м и 2,5 м/с соответственно. Геометрия эксперимента схематически показана на рис. 1, а характерный вертикальный профиль скорости звука, измеренный в районе проведения эксперимента, представлен на рис. 2. Предварительная обработка сигналов $P(t, f)$ заключалась в гетеродинировании сигналов на промежуточную частоту f_i с их последующей фильтрацией и выполнении спектрального анализа отфильтрованного сигнала с использованием скользящего фурье-преобразования. Спектральный анализ проводился без весовой обработки при длительно-

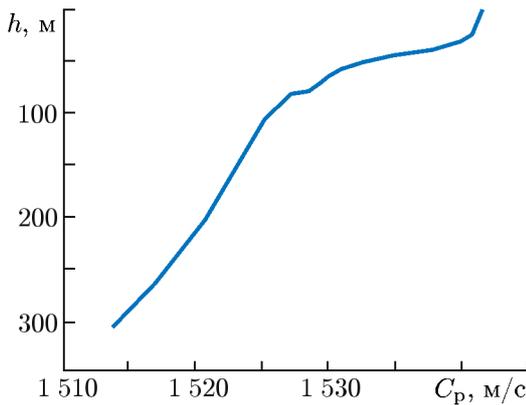


Рис. 2. Вертикальное распределение скорости звука в районе проведения эксперимента

сти каждой реализации $T = 340$ с с шагом $\delta T = 100$ с. В результате преобразования получаем структуру частотно-временного распределения поля принимаемого сигнала $P(t_n, f(t_n), T)$ в дискретных по времени точках трассы $t_n = n \delta T$ и $f(t_n) = \delta f(t_n) + f_i$, где $\delta f(t_n)$ — доплеровский сдвиг частоты, n — номер отсчёта. Далее по максимуму спектра в этих точках определялись текущие значения принимаемого сигнала и проводился переход от временной развёртки к развёртке по дальности с учётом движения судна. Данные о скорости и текущих координатах корабля считывались с корабельной системы. Далее с целью исключения возможных неинформативных флуктуаций сигналов [17] проводилось их усреднение (сглаживание) по дистанции. На рис. 3 приведены зависимости потерь при распространении акустического поля $TL(r)$ на трёх частотах (штриховые кривые), полученные в ходе натурного эксперимента с компенсацией его цилиндрической расходимости (r — горизонтальное расстояние).

2. ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ

При теоретических расчётах акустического поля сигналов в неоднородном вдоль трассы волноводе использовался модовый подход и метод поперечных сечений. Исходная геоакустиче-

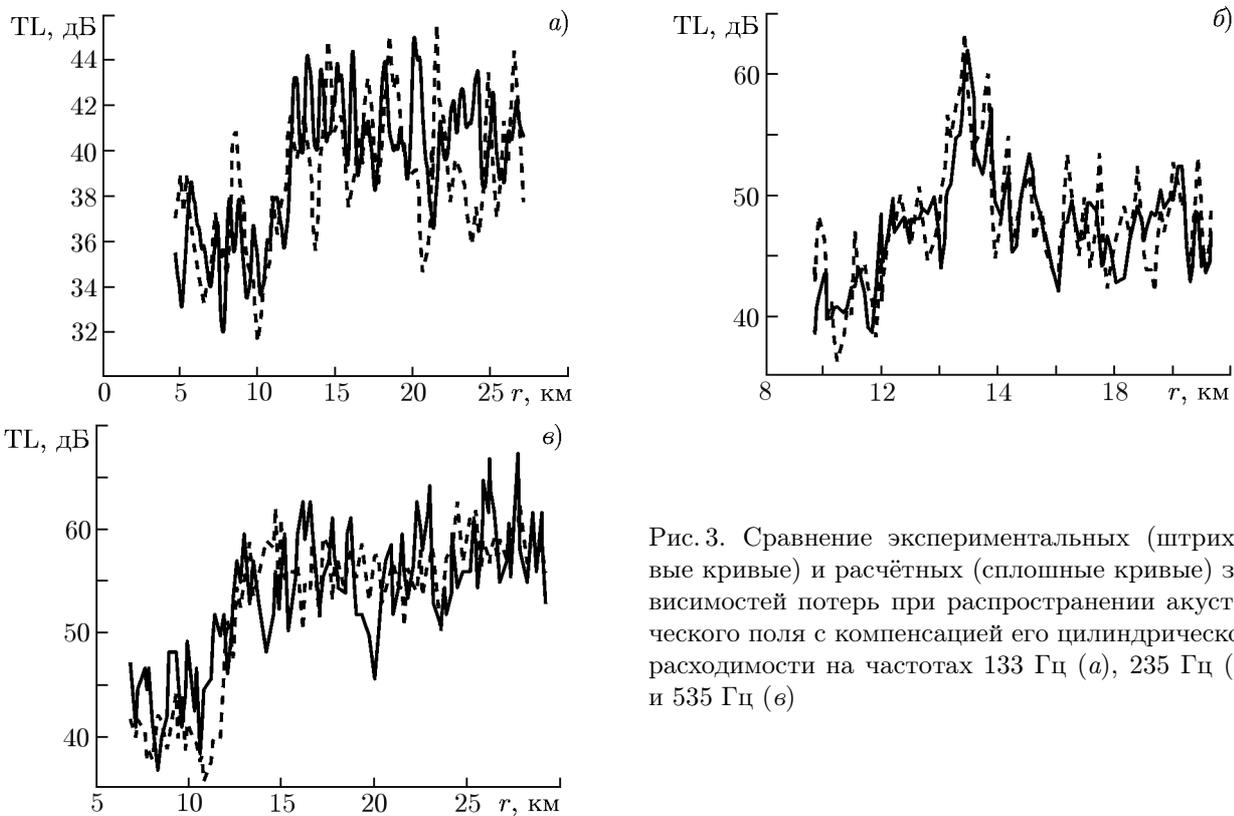


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (штриховые кривые) и расчётных (сплошные кривые) зависимостей потерь при распространении акустического поля с компенсацией его цилиндрической расходимости на частотах 133 Гц (а), 235 Гц (б) и 535 Гц (в)

ская модель дна выбиралась на основе имеющейся априорной информации, касающейся геологических характеристик района. Согласно этим данным осадочный слой имеет общую толщину не менее 150 м и состоит из нижнего мощного слоя карбонатных пород и покрывающих их верхних осадочных слоёв, состоящих, согласно геологическим данным, из биокластических песков и биогенных известковых осадков, различающихся по гранулометрическому составу и покрывающих значительные площади в районе проведения эксперимента. Исходя из этого, в качестве исходной была выбрана двухслойная модель осадков с подстилающим полупространством. Кроме того, исходя из предварительного анализа поведения уровней сигналов и глубины волновода вдоль трассы, последняя разбивалась на отдельные однородные участки, в каждом из которых параметры, подлежащие определению, находились независимо при их равномерном распределении в заданных априори областях. В процессе поиска для каждого участка волновода оценивались следующие параметры: глубины верхних границ 1-го и 2-го слоёв и глубина границы полупространства, скорости продольных волн в слоях и полупространстве, коэффициенты их затухания и значения плотности. Варьировались также протяжённости каждого из участков трассы, а также уточнялась глубина погружения буксируемого судном источника излучения. Общее число подбираемых геоакустических параметров с учётом разбиения трассы на однородные участки составляло 104. После каждой вариации совокупности геоакустических параметров рассчитывались соответствующие этим параметрам реализации акустического поля на участках трассы для каждой из частот излучения при фиксированной глубине приёма. Для всей трассы расчёт акустического поля проводился методом поперечных сечений, в котором звуковое поле на границах участков сшивается в соответствии с условиями непрерывности звукового давления и продольной компоненты вектора колебательной скорости. При формировании целевой функции $J(\mathbf{m}_k, f)$ на частоте f использовались значения нормы разности величин экспериментальных ($P^E(r, f)$) и теоретических ($P^T(r, \mathbf{m}_k, f)$) зависимостей акустического поля вдоль трассы, приведённых к единичной мощности источника излучения, с компенсацией цилиндрической расходимости акустического поля. Здесь \mathbf{m}_k — вектор геоакустических параметров волновода при вариации с номером $k = 1, 2, \dots$. Для уменьшения влияния эффектов овражности целевой функции при поиске параметров обычно используются различные приёмы регуляризации. В нашем случае для этого используется деление нормы разности на коэффициент $R(\mathbf{m}_k, f)$, определяющий статистическую связь экспериментального и теоретического (модельного) акустических полей при вариации параметров модельного волновода в процессе поиска их истинных значений [18]. При этом для оценки параметров использовались целевые функции для каждой из частот в отдельности, а также целевая функция, формируемая с использованием полей на всех частотах одновременно. Для фиксированной частоты излучения f и вариации параметров с номером k целевая функция имеет вид

$$J(\mathbf{m}_k, f) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N [|P^E(r_n, f)| - |P^T(r_n, \mathbf{m}_k, f)|]^2 / N}}{|R(\mathbf{m}_k, f)|},$$

где

$$R(\mathbf{m}_k, f) = \frac{\sum_{n=1}^N [|P^E(r_n, f)| - \langle P^E(f) \rangle] [|P^T(r_n, \mathbf{m}_k, f)| - \langle P^T(\mathbf{m}_k, f) \rangle]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [|P^E(r_n, f)| - \langle P^E(f) \rangle]^2 \sum_{n=1}^N [|P^T(r_n, \mathbf{m}_k, f)| - \langle P^T(\mathbf{m}_k, f) \rangle]^2}}.$$

В свою очередь,

$$\langle P^E(f) \rangle = \sum_{n=1}^N |P^E(r_n, f)| / N, \quad \langle P^T(\mathbf{m}_k, f) \rangle = \sum_{n=1}^N |P^T(r_n, \mathbf{m}_k, f)| / N.$$

Здесь r_n — горизонтальные расстояния от приёмника до источника в дискретных точках трассы ($n = 1, 2, \dots, N$).

При наличии сигналов на нескольких частотах f_l ($l = 1, \dots, L$) целевая функция определяется как среднее значение целевых функций для всех имеющихся частот:

$$J(\mathbf{m}_k) = (1/L) \sum_{l=1}^L J(\mathbf{m}_k, f_l).$$

При поиске глобального минимума целевой функции, соответствующего истинным значениям восстанавливаемых параметров волновода, использовался метод быстрого отжига [14] в сочетании с методом прямого поиска Хуга—Дживса [15].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОДА

Таблица 1. Геоакустические характеристики донных осадков, полученные в ходе восстановления

	h , м	C_p , м/с	ρ , г/см ³	α , дБ/(км Гц)
1.1	302,9	1 513	1,51	0,149
1.2	313,9	1 649	1,60	0,043
1.3	334,5	2 700	2,50	0,020
2.1	301,8	1 579	1,51	0,025
2.2	312,6	1 653	1,60	0,021
2.3	332,4	2 900	2,10	0,020
3.1	302,9	1 796	1,72	0,0132
3.2	312,3	1 822	1,91	0,028
3.3	333,7	2 900	2,10	0,020
4.1	301,4	1 506	1,51	0,034
4.2	308,1	1 472	1,49	0,120
4.3	333,0	2 900	2,10	0,020
5.1	298,2	2 161	2,01	0,025
5.2	311,9	2 183	2,09	0,026
5.3	325,7	3 000	2,15	0,010
6.1	301,4	2 099	1,85	0,028
6.2	313,2	2 159	1,95	0,026
6.3	334,0	3 000	2,10	0,020
7.1	302,2	2 181	2,10	0,023
7.2	313,6	2 087	2,09	0,022
7.3	324,6	3 000	2,10	0,020
8.1	298,9	2 021	1,76	0,012
8.2	312,6	2 053	1,85	0,013
8.3	334,7	3 000	2,10	0,020

Полученные в ходе выполненных исследований оценки геоакустических параметров донных осадков вдоль акустической трассы представлены в табл. 1. Данные приведены для каждого из слоёв дна и подстилающего полупространства в соответствующих им пространственных участках разбиения трассы. В первом столбце таблицы первые цифры указывают номера участков разбиения трассы, вторые — номера слоёв донных осадков. Во втором столбце таблицы приводятся глубины h верхних границ донных слоёв и полупространства на каждом участке трассы, которые, в свою очередь, определяют батиметрию волновода и мощности (толщины) слоёв донных осадков и их изменения вдоль трассы. Остальные столбцы дают акустические характеристики донных осадков — скорости продольных волн C_p , плотности ρ и коэффициенты затухания α . Из полученных данных следует, что глубина волновода вдоль трассы меняется в пределах 299÷307 м, что находится в пределах, характерных для глубин исследуемого региона. Оценки мощности верхних осадочных слоёв, акустические параметры которых вдоль трассы вместе с акустическими характеристиками подстилающего полупространства представлены в табл. 1, лежат в пределах от 6 до 25 м. Найденное в процессе поиска среднее по трассе значение глубины источника составило 52 м.

Оценки соответствуют моменту (ситуации) окончания процедуры поиска, когда относительные изменения целевой функции при последующей вариации параметров в процессе поиска не превосходят 0,1%.

Структура дна, полученная в процессе восстановления геоакустических характеристик донных осадков вдоль акустической трассы, изменение батиметрии волновода, а также мощности и глубины залегания слоёв донных осадков, представлены на рис. 4. В процессе поиска число участков разбиения трассы не менялось и оставалось фиксированным, в то время как длины участков трассы варьировались вместе с другими параметрами при её неизменной общей протяжённости. Длины участков трассы также отображены на рис. 4. Фиксировалось также максимальное число донных слоёв. Для параметров, соответствующих окончанию процедуры поиска, на рис. 3 для сравнения представлены экспериментальные и расчётные зависимости потерь при распространении с компенсацией цилиндрической расходимости акустического поля на частотах 135; 235 и 530 Гц. Как видно из рисунков, экспериментальные и теоретические зависимости потерь при распространении при найденных значениях геоакустических параметров волновода неплохо согласуются для всех используемых в эксперименте частот.

На основе полученных данных были выполнены количественные статистические оценки отклонений экспериментальных акустических полей от теоретических по окончании процедуры поиска. В частности, средние по трассе величины отклонения полей составляют $0,01 \div 0,02$ относительно экспериментальных.

Следует отметить, что на всех частотах на дистанции порядка 10 км от приёмника наблюдается резкое возрастание потерь $TL(r)$. Это связано с тем, что на этих расстояниях дистанции согласно полученным оценкам акустических параметров осадков наблюдается участок дна, где в первом слое осадков скорость звука меньше скорости звука у дна в водном слое.

Также следует отметить, что величины оцениваемых геоакустических параметров в пределах каждого участка можно назвать эффективными, т.к. они соответствуют их усреднённым значениям.

Дополнительным свидетельством эффективности полученных оценок параметров может служить неплохое согласие полученных значений глубин волновода вдоль трассы, представленных на рис. 4, и данных по глубине, заимствованных из базы General Bathymetric Chart of the Ocean (GEBCO), отмеченных на рис. 4 звёздочками.

Полученные оценки акустических параметров осадков вдоль трассы позволяют также связать эти параметры с конкретными типами осадков на основе имеющихся акустико-геологических исследований типов осадков и соответствующих им акустических характеристик в различных регионах мирового океана (см., например, работы [19–21, 23]). С использованием результатов этих исследований был проведён выбор конкретных типов осадочных пород вдоль акустической трассы с учётом априорной геологической информации в районе проведения эксперимента. Он осуществлялся на основе близости значений акустических параметров осадков, найденных в процессе восстановления, и имеющихся данных акустико-геологических исследований.

На рис. 4 распределение типов осадочных пород вдоль акустической трассы показано числами

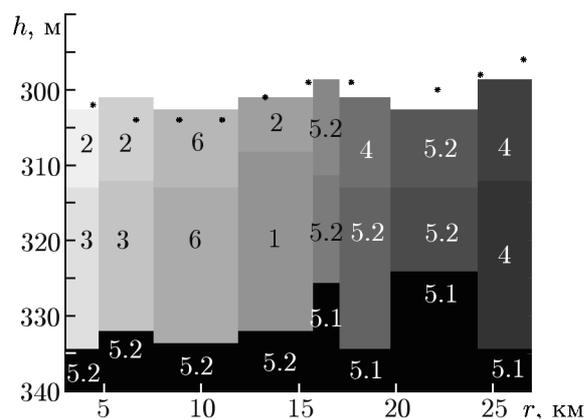


Рис. 4. Тоновая картина структуры дна и донных осадков. Звёздочки соответствуют глубинам из базы данных General Bathymetric Chart of the Ocean

Таблица 2. Типы осадков

Номера типов осадков	Типы осадков	C_p , м/с	ρ , г/см ³	α , дБ/(км Гц)
1	песчано-глинистый ил	1 483	1,512	0,042
2	карбонатные пески	1 510÷1 550	1,54÷1,71	0,039
3	алевритовый песок	1 640	1,8	0,037
4	пористый известняк	2 000	1,6	0,02÷0,03
5.1	меловые осадки	3 000	2,1÷2,2	0,027÷0,08
5.2	меловые осадки	2 000÷2 900	2,0÷2,1	0,2
6	песок с гравием	1 850÷1 900	2,0	0,01

для каждого из участков разбиения трассы. Соответствующие типы осадочных пород представлены в табл. 2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для восстановления геоакустических характеристик слоистого дна в мелководном неоднородном вдоль трассы волноводе использовался метод согласования полей. Целевая функция строилась с использованием нормы разности экспериментальных и теоретических (расчётных) зависимостей звукового поля в низкочастотном диапазоне от 130 до 530 Гц. Для поиска глобального минимума целевой функции применялся гибридный алгоритм, представляющий собой комбинацию метода быстрого отжига и метода прямого поиска Хуга—Дживса. Расчёт акустического поля в неоднородном волноводе проводился с использованием метода поперечных сечений. В результате были определены изменяющиеся вдоль трассы геоакустические характеристики волновода — его глубина, мощности осадочных слоёв вдоль трассы, скорости продольных волн, коэффициенты их затухания в слоях и полупространстве, а также плотности осадков. Полученные параметры обеспечивают неплохое согласие экспериментальных и расчётных данных во всём используемом диапазоне частот. На основе найденных значений акустических параметров слоёв осадков определены их типы. Кроме того, определено среднее значение глубины погружения буксируемой излучающей системы по трассе.

Результаты экспериментальных исследований акустических полей вдоль трассы и найденные оценки геоакустических параметров волновода свидетельствуют о существенной пространственной изменчивости акустических характеристик дна и донных осадков.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035–2014–0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайхарт Г. Ф. Акустика дна океана М.: Мир, 1984. 454 с.
2. Агеева Н. С., Крушин В. Д., Перелыгин В. П., Студеничник Н. В. // Акуст. журн. 1994. Т. 40, № 2. С. 181.
3. Студеничник Н. В. // Акуст. журн. 1996. Т. 42, № 1. С. 134.
4. Белов А. И., Комаров А. Г. // Акуст. журн. 1998. Т. 44, № 3. С. 312.
5. Белов А. И., Кузнецов Г. Н. // Акуст. журн. 2014. Т. 60, № 2. С. 190.
6. Буров В. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С., Щербина А. В. // Акуст. журн. 2015. Т. 61, № 5. С. 583.

7. Абакумова Н. К. // Акуст. журн. 2002. Т. 48, № 3. С. 293.
8. Гувер У. Р., Нагл А., Юбералл Х. Акустика дна океана. М.: Мир, 1984. 454 с.
9. Агеева Н. С., Крупин В. Д. // Акуст. журн. 1980. Т. 26, № 2. С. 161.
10. Казарова А. Ю., Любавин Л. Я., Нечаев А. Г. // Акуст. журн. 1996. Т. 42, № 1. С. 134.
11. Baggeroer A. B., Kuperman W. A., Mikhalevsky P. N. // IEEE J. Ocean. Eng., 1993. V. 18, No. 4. P. 401.
12. Collins M. D., Kuperman W. A. // Inverse Problems. 1994. V. 10, No. 5. P. 1023.
13. Taraudakis M. I., Makrakis G. N. Problems in Underwater Acoustics. New York: Springer-Verlag, 2001. 216 p.
14. Szu H. H., Hartley R. L. // Phys. Lett. A., 1997. No. 122. P. 157.
15. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Академиздатцентр, Наука, 1988. 552 с.
16. Nelder M. B., Mead R. // Computer J., 1965. V. 7. P. 308.
17. Бурлакова И. Б., Саичев А. И., Славинский М. М. // Акуст. журн. 1987. Т. 33, № 3. С. 403.
18. Кержаков Б. В., Кулинич В. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 217.
19. Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хемптона. М.: Мир, 1977. 533 с.
20. Акустика дна океана / Под ред. У. Купермана, Ф. Енсена. М.: Мир, 1984. 454 с.
21. Ильин А. В. // Акустика океана. М.: Наука, 1982. С. 226.
22. Орленок В. В. Морская сейсмоакустика. Калининград: Калининградский ун-т, 1997. 150 с.
23. Емельянов Е. М., Лисицын А. П., Ильин А. В. Типы донных осадков Атлантического океана. Калининград: Калининградская правда, 1975. 579 с.

Поступила в редакцию 10 июля 2018 г.; принята в печать 21 февраля 2019 г.

ESTIMATION OF THE SEABED PARAMETERS IN A NONUNIFORM WAVEGUIDE USING THE MATCHED-FIELD METHOD

B. V. Kerzhakov and V. V. Kulnich

We estimate geoacoustic parameters of a layered bottom in a shallow waveguide, which is nonuniform along the path, using the data of the full-scale experiment and the field-matching method. On the basis of the available *a priori* geological and geophysical data, a waveguide consisting of two sediment layers and the underlying half-space is used as the reference geoacoustic model. When seeking the geoacoustic parameters corresponding to the global minimum of the target function, the hybrid algorithm, which is a combination of the fast-annealing method and the Hook and Jeeves method of direct search is used.