#### УДК 550.83:534.64

# КОГЕРЕНТНОЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОДЕЛИ СЛОИСТОГО МОРСКОГО ДНА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

В. В. Уваров<sup>1</sup>, В. И. Калинина<sup>1</sup>, А. А. Хилько<sup>2</sup>\*, В. В. Курин<sup>2</sup>, А. И. Хилько<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН;

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В лабораторных условиях проведена экспериментальная верификация разработанных алгоритмов реконструкции геоакустических параметров донных слоёв при их когерентном зондировании. В алгоритмах используются параметрические модели формирования сигналов, отражённых от слоистого полупространства. Для решения поставленной задачи на кафедре акустики ННГУ им. Н. И. Лобачевского была создана экспериментальная установка для измерения параметров зондирующих акустических импульсов, отражённых от набора помещённых в бассейн с водой упругих слоёв. Разработаны устройства для формирования, излучения и приёма звуковых импульсов, отражённых от слоистой системы. Исследована структура реверберационных помех в измерительном бассейне. Получены экспериментальные оценки параметров модели слоистого дна при оптимизированных параметрах зондирующих сигналов.

# введение

Эффективное сейсмоакустическое зондирование морского дна, удовлетворяющее экологическим требованиям, может быть осуществлено когерентными сейсмоакустическими источниками, которые, при относительно малой мощности излучения, обеспечивают высокую точность и глубину зондирования за счёт когерентного накопления сигналов [1, 2]. Использование измеренных характеристик отражённых от донных слоёв сжатых и отфильтрованных когерентных сейсмоакустических импульсов позволяет оценить параметры упругих донных слоёв, такие как их толщина, плотность, скорость продольных и поперечных волн, а также их декременты затухания в слоях. Такого рода реконструкция морского дна в общем случае является некорректной обратной задачей и может быть сведена к оценке значений параметров донных слоёв методом статистической проверки гипотез, в качестве которых выступают модели слоистого пространства [3–5]. Максимизация эффективности реконструкции параметров донных слоёв определяется как оптимизацией решающих правил, так и адекватностью модели формирования полезных сигналов. Правильность используемой модели может обеспечить регуляризацию задачи и требуемую устойчивость алгоритма оценки.

При решении обсуждаемой обратной задачи следует использовать модели, учитывающие интенсивные компоненты поля, которые содержат необходимую информацию о донных слоях и при этом могут быть измерены с требуемой точностью. Обычно при решении практических задач морского сейсмоакустического зондирования буксируемые излучающие и приёмные элементы располагаются на достаточно большом волновом расстоянии от дна. В таких условиях для реконструкции параметров дна при использовании когерентных сейсмоакустических источников в качестве модели формирования сейсмоакустических сигналов можно использовать лучевые методы и формулы Цёппритца [3, 4].

На каждой из границ между упругими слоями отражаются и преломляются как монотипные, так и обменные продольные и поперечные волны [4]. Даже в случае построения модели

<sup>\*</sup> anton.khilko@gmail.com

формирования отражённых от слоистого морского дна сейсмоакустических сигналов, проверка эффективности методов решения обратной задачи в морских условиях будет затруднена из-за недостатка априорной информации о параметрах дна, а также сложности проведения натурных измерений с требуемой точностью.

В данной работе исследовались возможности когерентного сейсмоакустического зондирования морского дна. В контролируемых лабораторных условиях проведена экспериментальная верификация разработанных алгоритмов реконструкции геоакустических параметров донных слоёв при их когерентном зондировании с использованием параметрических моделей формирования сигналов, отражённых от слоистого полупространства. Измерения в таких условиях позволяют оценить эффективность реконструкции параметров донных слоёв методом послойного восстановления [6–8].

### 1. СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Разработанный для решения рассматриваемой задачи измерительный комплекс позволяет осуществить измерения при контролируемых условиях проведения эксперимента, что, как уже отмечалось, трудно обеспечить при проведении измерений в природных морских условиях. Общие характеристики разработанного комплекса физического моделирования (частотный диапазон измерений, мощность источника, размеры бассейна) оценивались на основе расчётов с помощью численных моделей распространения и рассеяния акустических сигналов в слоистых волноводах [3, 6].

Параметры бассейна, модели дна, приёмных и излучающих элементов подбирались с учётом требований масштабного моделирования условий натурного эксперимента по когерентному сейсмоакустическому зондированию морского дна [1, 2]. Задачей измерительного комплекса являлось исследование возможностей реконструкции акустических характеристик донных слоёв (толщины, плотности, скорости акустических волн, и декрементов их затухания) с использованием метода проверки статистических гипотез. Измерительный комплекс (см. рис. 1) включал в себя следующие элементы: регистратор принятых сигналов (1), усилитель (2), ванну из нержавеющей стали с размерами  $2,97 \times 0,80 \times 0,71$  м (3), водный слой с толщиной 33 см (4), набор пластин из оргстекла, резины, стали и других материалов (5), координатное устройство (6), каретки гидрофона (7) и излучателя (8), генератор сигналов (9), усилитель мощности (10), излучатель (11), гидрофон (12), аналогоцифровой (13) и цифроаналоговый преобразователь (14).

Подсистемой излучения формировались акустические импульсы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в различных полосах частот в интервале от 25 кГц до 300 кГц с длительностью от  $10^{-3}$  до 0,1 с. Источник акустических сигналов и приёмная система располагались на глубинах  $z_{\rm S}$ и  $z_{\rm R}$  в интервале от 30 до 2 см от поверхности жидкости. Горизонтальное расстояние между приёмником и излучателем  $x_{\rm R}$  изменялось в диапазоне от 10 до 1 200 мм. Трассы измерения обычно располагались при  $y_{\rm R} = y_0$ , где  $y_0$  соответствует средней точке между боковыми стенками бассейна. Точность позиционирования приёмно-излучающей системы в пределах экспериментальной ванны составляла не менее 0,1 мм по всем координатам.

Измерения параметров акустических сигналов проводились в лабораторной ванне ограниченных размеров, т. е. при наличии реверберационных помех, формируемых за счёт многократных переотражений и рассеяния сигналов дном, стенками бассейна и поверхностью жидкости. Для проведения измерений с приемлемой точностью необходимо обеспечить подавление таких помех. В рамках представленного моделирования решение такой задачи основывается на ослаблении отражённых от стенок акустических сигналов за счёт их покрытия поглощающим слоем резины, временного стробирования принятых импульсных сигналов и использования в экспериментах



Рис. 1. Блок-схема комплекса лабораторных измерений отражённых от слоистого дна акустических сигналов



Рис. 2. Нормированная интенсивность излучения I при возбуждении ЛЧМ-импульсов в полосе от 150 до 250 кГц в поперечном (по оси  $y_{\rm R}$ ), и вертикальном (по оси  $z_{\rm R}$ ) направлении, измеренная на расстоянии  $x_{\rm R} = 10$  мм от излучателя после сжатия импульсов (ось  $\tau$ )

излучателей с узкой диаграммой направленности. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости нормированной интенсивности излучения от времени в поперечном и вертикальном сечении при возбуждении ЛЧМ-импульсов. Эти зависимости были получены с помощью линейно перемещающегося приёмника в плоскостях, параллельных плоскостям апертуры излучателя, который имел форму прямоугольного параллелепипеда. Эти зависимости характеризуют направленные свойства излучателя, поскольку характеристику направленности приёмника на исследуемых частотах можно считать изотропной. Градациями серого цвета на рис. 2 отображён нормированный на максимальную интенсивность уровень излучения. При измерениях характеристик направленности (см. рис. 2) использовались ЛЧМ-импульсы с длительностью  $\tau = 150$  мкс в полосе частот  $150 \div 250$  кГц. Применение в экспериментах такого излучателя позволило ослабить уровень формируемых при отражении от боковых стенок реверберационных помех в рабочем интервале задержек на  $15 \div 20$  дБ. На рис. 3 приведены результаты измерений акустических сигналов для модели, в которой морское дно задавалось в виде слоя плексигласа с толщиной h = 0,037 м, плотностью  $\rho = 1\,190$  кг/м<sup>3</sup>, скоростью продольных волн  $v_P = 2\,570$  м/с, скоростью поперечных волн

В. В. Уваров, В. И. Калинина, А. А. Хилько и др.

924



Рис. 3. Результаты измерений: осциллограммы при  $x_{\rm R} = 20$  см (a) (здесь A — амплитуда сигнала), интенсивность сигналов на выходе согласованного фильтра при  $x_{\rm R} = 30$  см (b) и в плоскости  $(z, \tau)$  при  $x_{\rm R} = 10$  см (b)

 $v_{\rm S} = 1\,121$  м/с и соответствующими декрементами затуханий  $\delta_{\rm P} = 0,01$  дБ/м и  $\delta_{\rm S} = 0,05$  дБ/м. Плексиглас располагался в воде на глубине H = 33 см. Ниже плексигласа находился слой воды, моделирующий газонасыщенный слой осадков, который покоился на плите из нержавеющей стали. Излучались ЛЧМ-импульсы с длительностью 1 мс в полосе частот  $150 \div 250$  кГц. Источник располагался на глубине  $z_{\rm S} = 16,5$  см. Приёмник находился на глубине  $z_{\rm R} = 25$  см и различных удалениях от излучателя. При приёме выполнялась согласованная фильтрация (сжатие) ЛЧМ-импульса.

На рис. За приведена типичная осциллограмма акустического сигнала, на рис. Зб показаны принимаемые сигналы после прохождения согласованного фильтра. Из результатов измерений (рис. 36), в согласии с численными оценками, следует, что наибольшим по величине являлся импульс, распространяющийся по водной траектории (прямой импульс), обозначенный на рис. 3a, б цифрой 1. В интервале задержек порядка 740 мкс располагался импульс, отражённый от поверхности водного слоя (он обозначен цифрой 2). Импульсы, отражённые от верхней и нижней границы плексигласа (3, 4), наблюдаются в интервале задержек вблизи 800 мкс. Далее в интервале бо́льших задержек располагаются импульсы, отражённые от границ стали. По мере удаления приёмника от источника задержки различных компонент импульсных сигналов меняются по-разному в соответствии с отличиями траекторий их распространения, так что в плоскости дистанция—задержка они легко различимы. Результаты измерений импульсных сигналов, иллюстрирующие указанные явления, показаны на рис. Зв. В этих измерениях источник располагался на глубине  $z_{\rm R} = 13$  см, приёмник находился на удалении  $x_{\rm R} = 10$  см от источника, его глубина  $z_{\rm S}$ изменялась в интервале от 16 до 10 см. Как и в предыдущих случаях, наиболее интенсивными при этом являлись водная компонента (прямой луч) и компонента, отражённая от поверхности воды. В интервале задержек от 300 до 700 мкс наблюдались отражённые от слоистого дна акустические импульсы, а также реверберационные помехи (см. рис. 3e).

Из представленной на рис. 3*6* пространственно-временной зависимости видно, что точность измерения, необходимая для апробирования метода реконструкции параметров дна, в существенной степени ограничена реверберационными помехами, связанными с ограниченностью объёма экспериментальной ванны. При анализе возможностей реконструкции параметров дна в экспериментальной установке, кроме реверберационных помех, были выявлены и другие шумы, негативно влияющие на результаты этой реконструкции. К ним относятся механические шумы, свя-

занные с вибрацией позиционирующих устройств во время перемещения, электрические шумы в исследуемом диапазоне частот, связанные с работой электроприводов системы позиционирования, а также шумы приёмно-измерительной аппаратуры.

Для увеличения отношения сигнал/шум (ОСШ) были предприняты меры для подавления шумов. В частности, механические и сейсмические шумы расположены в низкочастотной области спектра, и их влияние было минимизировано фильтрацией принимаемых сигналов, а также выбором времени проведения экспериментов, когда транспортный поток был незначителен (вечернее и ночное время). Шумы приёмно-измерительной аппаратуры были незначительны, поскольку в экспериментах использовались измерительные и регистрирующие устройства с динамическим диапазоном не менее 130 дБ. В рассматриваемых условиях основные проблемы создавали электрические шумы электроприводов установки. Как показали эксперименты, измерения в статике (при отключённых приводах) значительно улучшают ОСШ (примерно на  $25 \div 30$  дБ). В силу этого все дальнейшие измерения проводились в статике. В результате интегральный уровень помех, связанных с электрическими наводками различной природы, был подавлен на  $45 \div 50$  дБ. Усреднение параметров измеряемых импульсов по нескольким реализациям позволило дополнительно ослабить шумы на  $3 \div 5$  дБ. Проведённые оценки показали, что при достигнутых ОСШ опшбки при измерениях задержек и амплитуд импульсов не превышали 3%. Погрешность измерения задержек не превосходила величину порядка  $10^{-6}$  с.

Основные усилия при измерениях были направлены на увеличение отношения уровней полезных сигналов к уровням реверберационных помех. Этого можно добиться максимальным накоплением полезных сигналов, что, в свою очередь, может быть достигнуто использованием всех отличий сигналов от реверберационной помехи. Такие отличия проявляются в пространственной, временной и частотной областях. Как уже указывалось, наиболее эффективным методом ослабления мультипликативных реверберационных помех является временное стробирование импульсов. При заданной геометрии расположения и форме излучателя и приёмника, а также для рассматриваемой модели слоистого дна реверберационные помехи от боковых стенок были достаточно ослаблены. В частности, это было достигнуто в интервале задержек, где располагаются полезные отражённые от дна сигналы (для случая, показанного на рис. 3, это диапазон задержек в интервале значений 750÷950 мкс). При используемых полосах частот зондирующих импульсов можно рассчитывать на выделение порядка 102 элементов разрешения в наблюдаемом интервале задержек.

Как следует из предварительных измерений, основными реверберационными помехами при измерении отражённых от слоистого дна сигналов являются водный луч и луч, отражённый от поверхности жидкости (см. рис. 3). Из анализа пространственно-временны́х распределений видно, что указанные компоненты акустического поля, как и компоненты, отражённые от слоистого дна, располагаются вдоль отличающихся друг от друга кривых (см. рис. 36). При этом области задержек и координат расположения приёмников, в которых наблюдаются и мешающие сигналы (например, водные волноводные компоненты), и полезные, локализованы. В большинстве же пространственно-временны́х областей такие сигналы не пересекаются. Это позволяет, суммируя различные акустические компоненты, изменять отношения их уровней. При этом уровень поверхностной компоненты может возрасти на 12 дБ по сравнению с мешающей водной компонентой. Аналогичным образом можно просуммировать и полезные отражённые от слоистого дна сигналы. Масштабы когерентности помех, чаще всего, не превышают пространственных размеров отдельных элементов разрешения измерительного комплекса.

В целом, за счёт подавления электромагнитных помех, усреднения шумов, а также частотного накопления при согласованной фильтрации и пространственного накопления вдоль траекторий, ОСШ удалось повысить на 35÷40 дБ. Разброс эффективности улучшения ОСШ определяется

изменчивостью структуры сигналов, помех и шумов. Так, в областях, где полезные сигналы пересекаются с водным и поверхностным реверберационными лучами, ОСШ заметно уменьшается. Учитывая это, при проведении экспериментов были предприняты меры по уменьшению зон пересечения сигналов и помех путём использования зондирующих ЛЧМ-импульсов с огибающей функцией со специальной сглаженной формой. Это существенно ослабило уровень боковых лепестков и сузило размеры областей с повышенным уровнем помех.

## 2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ СЛОЁВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Целью данного исследования является реконструкция значений параметров слоистого дна по измерениям отражённых от него акустических импульсов при наличии шумов и помех. К оцениваемым параметрам относятся толщины плотности слоёв, скорости продольных и поперечных упругих волн и декременты их затухания. Методом решения такой стохастической обратной задачи является проверка гипотез о значениях параметров [6–8]. Гипотезы, решающие правила и статистические критерии определяют метод реконструкции и формируются с использованием априорной информации. Метод реконструкции оптимизируется так, чтобы обеспечить требуемую достоверность оценок параметров. Более устойчивый метод реконструкции обеспечивает достижение заданной достоверности при бо́льших уровнях шумов и помех. Выбор метода реконструкции в используемой лабораторной установке является важным этапом исследования и должен проводиться с учётом специфики условий измерения.

#### 2.1. Анализ известных алгоритмов реконструкции слоистого дна

Реконструкция параметров слоистого дна (инверсия) с использованием дистанционных измерений является в общем случае сложной некорректно поставленной обратной задачей [7–11]. Решение таких задач может осуществляться только при использовании относительно большого объёма априорной информации, в частности касающейся геометрии системы наблюдения, среды, шумов и помех, а также объектов, параметры которых необходимо оценить. В реальных условиях измерения осуществляются с конечной точностью в пределах ограниченных пространственночастотных приёмных апертур. Операция инверсии по отношению к слабым сигналам при наличии больши́х шумов и помех становится некорректной. Это связано с необходимостью существенного усиления зашумлённых сигналов, которое приводит к недопустимым случайным искажениям в восстанавливаемом изображении (совокупности восстанавливаемых параметров). В таких условиях алгоритм инверсии является статистически неустойчивым. Для преодоления указанных трудностей используют методы регуляризации, сводящиеся во многих случаях к отбрасыванию недостоверных данных при инверсии, максимально возможному усилению полезных сигналов, а также нормализации шумов и помех.

Наиболее близкой задачей к анализируемой в данной работе является сейсмическое зондирование земной толщи, при котором широко используются методы динамической сейсмической инверсии [9–13]. В большинстве случаев сейсмическая инверсия сводится к минимизации невязки измеренных и синтезированных полей, а в качестве невязки (целевой функции) выступают функции в виде квадрата разности полей (см. например, [9, 11] и цитируемые там работы). При этом решением являются значения параметров модели дна, при которых обеспечивается минимизация целевой функции. В сейсморазведке в качестве начальных значений при поиске решений часто используются данные скважинных измерений. На их основании строятся исходные опорные модели, отклонения от которых оцениваются с помощью методов сейсмической инверсии. Динамиче-

ские методы решения обратных сейсмических задач характеризуются трудностями, связанными с оптимальной регуляризацией данных измерений, разработкой адекватных моделей и целевых функций, неоднозначностью решений и неустойчивостью алгоритмов [12, 13]. Заданная достоверность решения для каждого из алгоритмов инверсии может быть обеспечена только в случае, когда полезные сигналы достаточно велики. При фиксированной мощности сейсмического источника указанное требование ограничивает глубину реконструкции структуры земной толщи. В данном исследовании возможностей реконструкции строения слоистого дна будем использовать методы сейсмической инверсии с учётом их адаптации к лабораторным условиям.

#### 2.2. Алгоритм реконструкции параметров донных слоёв в лабораторной установке



Рис. 4. Блок-схема алгоритма оценки параметров слоистого дна при измерениях в лабораторных условиях

В рассматриваемых экспериментах для реконструкции параметров донных слоёв использовался алгоритм, блок-схема которого показана на рис. 4. В соответствии с этим алгоритмом на первом этапе блоком I возбуждается зондирующий сложно модулированный акустический импульс с оптимальной длительностью и частотным интервалом. Характеристики импульса определяются априорной информацией в виде параметрических моделей (модель системы измерения и среды М1, модель формирования отражённых от слоистого дна сигналов M2, модель шумов и помех М3). На следующем этапе отражённый от слоистого дна акустический сигнал регистрируется в пределах конечной апертуры блоком R, преобразуется в цифровой сигнал и поступает на блок S, выполняющий регуляризацию, т. е., накопление полезных сигналов  $S(x_{\rm R}, \tau)$  и ослабление шумов  $N(x_{\rm R}, \tau)$ . Подготовленный таким образом сигнал  $S(x_{\rm R}, \tau) + N(x_{\rm R}, \tau)$  поступает на блок  $L_2$ , который сравнивает измеренные данные с гипотезой  $G(x_{\rm R}, \tau)$ . Гипотеза формируется на основе априорной информации в виде моделей.

В общем случае решающее правило  $L_2$  должно адаптироваться к статистической структуре

шумов и сигналов. В рассматриваемых в данном исследовании лабораторных измерениях в качестве решающего правила (целевой функции) использовалась  $L_p$ -норма:  $L_p = \{1/\sigma_0 \int_0^{\sigma_0} || [S(\sigma) + N(\sigma)] - G(\sigma) ||^p d\sigma\}^{1/p}$ , где  $\sigma$  — плоскость  $(x_R, \tau)$ ,  $\sigma_0$  — область измерений по координате и задержке. Исходя из предположения о нормальном распределении шумов и помех при измерениях [14] считалось, что p = 2. Далее, блоком SC выполняется операция принятия решения с использованием статистического критерия, в качестве которого использовался критерий Неймана—Пирсона [8]. При составлении гипотезы важным этапом является выбор порога, который задаётся априорной информацией о шумах и помехах (блок M3). Результаты принятия решения визуализировались с помощью экрана S. Гипотезы о значениях наблюдаемых параметров  $\theta = \{h_i, \rho_i, v_{Pi}, v_{Si}, \delta_{Pi}, \delta_{Si}\}, i = 1, \ldots, n$  (здесь n — число слоёв,  $h_i$  — толщина слоя,  $\rho_i$  — плотность слоя,  $v_{Pi}, v_{Si}$  — скорости и  $\delta_{Pi}, \delta_{Si}$  — декременты затухания продольной и поперечной

волны соответственно), в виде распределения сигнала после регуляризации  $G(x_{\rm R}, \tau)$  выбираются блоком HTS, который определяет траекторию поиска решения  $\theta = \theta^*$  в пространстве параметров. Решению соответствует глобальный минимум функции  $L_2(\theta)$ . Эффективность поиска решения, выполняемого перебором гипотез (блок HS), т. е. оптимальная траектория поиска (блок HTS), определяется объёмом априорной информации (блоками M1, M2, M3). В данной работе истинные импедансные характеристики оргстекла и стали при измерениях точно не были известны, и при выборе интервалов поиска решений использовались их значения, взятые из справочника.

#### 2.3. Модель формирования отражённых от слоистого дна сигналов (гипотез)

Априорная информация о геометрии расположения элементов системы наблюдения, параметрах водного слоя и слоистого дна, шумах и помехах, зондирующих импульсах используется в модели формирования отражённых от слоистого дна полезных сигналов, а также в модели шумов и помех (блоки М1, М2, М3 на рис. 4). Все перечисленные параметры связываются физико-математической моделью формирования акустических сигналов и помех в слоистой среде, которая также является априорной информацией в виде закономерностей связи физических величин в такой среде [6]. Эта модель имеет сложную структуру, а её априорный анализ позволяет обеспечить накопление сигналов и найти оптимальную траекторию поиска решения. При формировании каждой из гипотез выдвигаются значения наблюдаемых параметров слоистого дна, которые с помощью модели трансформируются в модель измеряемых сигналов, используемых в решающем правиле в качестве тестовой функции, с которой сравниваются измеренные сигналы. Такие модельные сигналы используются в структуре решающего правила и для достижения максимального усиления полезных сигналов. Расчёт гипотез в виде модельных сигналов для условий лабораторных измерений осуществляется в высокочастотном приближении геометрической акустики с помощью формул Цёппритца в предположении, что донные слои имеют достаточно большую толщину, так что отражённые от их границ импульсы не интерферируют [7, 8].

#### 2.4. Регуляризация измеренных данных

Подавление помех и накопление измеренных в лабораторных условиях отражённых от слоистого дна акустических сигналов выполнялось в частотной области с помощью сжатия сложно модулированных ЛЧМ-импульсов, а также путём их накопления вдоль траекторий в плоскости  $(x_{\rm B}, \tau)$ , параметры которых определялись гипотезами (блок HTS на рис. 4). На рис. 5*a* представлено распределение измеренных амплитуд сигналов, нормированных на максимальное значение, после согласованной фильтрации принимаемых импульсов. Измерения проводились для случая, когда  $z_{\rm S} = z_{\rm R} = 32$  см. Расстояние от источника до приёмника  $x_{\rm R}$  менялось от 10 до 100 см с шагом 2,5 см. В качестве зондирующих использовались ЛЧМ-импульсы с длительностью 1 мс в интервале частот от 25 до 250 кГц. Измерения проводились при остановке приёмника в каждой точке измерения. При этом для каждого положения приёмника вдоль оси задержек формируется распределение отражённых от слоистого дна импульсов, соответствующих одной из границ слоистого дна. Весь массив измеренных данных в плоскости  $(x_{\rm B}, \tau)$  формировался в виде годографа, содержащего волновые компоненты, отражённые как от границ, так и от всех типов неоднородностей. Интерпретация компонент сигнала осуществлялась путём анализа показанных на рис. 56 расчётных годографов, полученных при параметрах слоистого дна, близких к реализованным в лабораторной установке.

Из анализа распределений следует, что верхний фронт измеренных импульсов, в котором задержки импульсов нарастают по мере удаления практически линейно, соответствует водной



Рис. 5. Структура амплитуд сигналов, нормированных на максимальное значение: измеренные значения (a) и значения, полученные при расчёте одной из гипотез при поиске решений (b)

компоненте (прямому лучу). В интервале малых удалений такая компонента приходит первой, поскольку дистанция до приёмника заметно меньше расстояния до нижней границы оргстекла. В этом интервале располагаются и волновые компоненты, отражённые от поверхности слоя оргстекла, которые, в силу геометрии измерений, при увеличении дистанции практически совпадают с водной компонентой. Однако по мере удаления от излучателя, начиная с дистанций порядка 400 мм, водный луч приходит позже компоненты, отражённой от второй границы слоя оргстекла, поскольку скорость продольной волны в оргстекле существенно больше скорости звука в воде. На измеренном годографе такая компонента относительно слабо видна, но она может быть выделена после пространственного накопления.

В интервале задержек порядка 400÷450 мкс, при малых удалениях формируется фронт импульсов, соответствующий поперечной волне, отражённой от второй границы слоя оргстекла. Ниже находятся фронты волн, отражённых от границ слоя стали, а также от дна бассейна. Как следует из представленных в виде годографа экспериментальных данных, в области, расположенной по оси задержек за быстро распространяющимися компонентами, наблюдаются реверберационные помехи. Такие помехи возникают за счёт рассеяния зондирующих импульсов на случайных неоднородностях водного слоя и слоистого дна. При этом отношение полезных сигналов к шумам и помехам по мере нарастания задержек (увеличения глубины зондирования дна) падает, что связано с затуханием сигналов.

Для увеличения отношения уровня измеренных отражённых от дна сигналов к шумам и реверберационным помехам осуществлялось когерентное накопление полезных сигналов вдоль линии расположения импульсов. Это расположение соответствовало каждой границе слоя в плоскости

 $(x_{\rm R}, \tau)$ . В результате обработки (регуляризации) сигналов уровень полезных сигналов стал превышать шумы и помехи в среднем на 30 дБ.

## 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ СЛОЁВ

Оценка параметров донных слоёв, в соответствии с блок-схемой алгоритма (см. рис. 4), выполняется путём статистической проверки гипотез (блок L<sub>2</sub>). В качестве решения принимаются те значения параметров донных слоёв, при которых решающее правило (в нашем случае  $L_2$ -норма) принимает минимальное значение. Поскольку L<sub>2</sub>-норма является случайной величиной, её минимальное значение определяется статистически при удовлетворении заданным статистическим критериям (блок SC). В частности, при использовании критерия Неймана—Пирсона, необходимая вероятность правильного решения (минимального значения  $L_2$ -нормы) достигается при заданной вероятности ложной тревоги. При этом порог, определяющий заданную вероятность ложной тревоги, зависит от статистического распределения шума. Как показал анализ условий измерений, в бассейне основным источником шумов и помех являются мультипликативные реверберационные помехи, вызванные, в основном, шероховатостью всех границ, в том числе границ донных слоёв. При точном повторении положений элементов измерения случайные реализации реверберационных шумов будут повторяться. В этой ситуации сформировать нужный статистический ансамбль случайных реализаций значений L<sub>2</sub>-нормы можно лишь путём вариаций пространственных координат источника и приёмника, что приводит к необходимости большого числа измерений. Для их реализации должна быть более тщательно проработана методика измерений. В рамках данного исследования ограничимся рассмотрением лишь небольшого числа случайных реализаций зависимостей  $L_2$ -нормы от значений параметров наблюдаемых донных слоёв.

Как показывает анализ структуры измеренных, а также рассчитанных сигналов (рис. 5), для реализованной в лабораторной установке модели донных слоёв возможно выделение сигналов, определяющих параметры верхнего слоя (слоя плексигласа) от остальных сигналов. Это позволяет оценить значения параметров этого слоя путём поиска минимума  $L_2$ -нормы в зависимости от выдвигаемых значений параметров слоя. Однако отражённые от нижней границы плексигласа сигналы будут зависеть и от характеристик нержавеющей стали. На первом этапе инверсии можно в качестве начальных параметров стали использовать справочные значения.

Исследуем зависимость  $L_2$ -нормы от значений параметров слоя плексигласа  $\theta = \{h_1, \rho_1, v_{P1}, v_{S1}, \delta_{P1}, \delta_{S1}\}$ , выбираемых вблизи начальных значений, взятых из справочника. Поскольку первый слой характеризуется шестью параметрами, решение об их значениях соответствует глобальному минимуму в шестимерном пространстве. Для упрощения задачи поиска решения на первом этапе будем анализировать одномерные сечения экстремальной области  $L_2$ -нормы при условии, что остальные параметры принимаются равными значениям, взятым из справочника. На рис. 6 показаны сечения  $L_2$ -нормы в зависимости от параметров  $\rho_1$  и  $v_{P1}$ . Для удобства визуализации структуры сечений будем использовать величину D — «мощность процессора» [7, 8], которая в нашем случае определяется выражением  $D = K |L_2|$ , где  $K = 10^2$ . Поскольку реверберационные пумы неоднородны, случайный разброс уровней помех для области измерений при выбранных параметрах физической модели достигал величин порядка 10÷15 дБ.

Как видно из результатов измерений, самой большой по уровню помехой при измерении сигналов, отражённых от слоистого дна, является водная волна, маскирующая достаточно большими боковыми откликами по оси задержек полезные сигналы, которые располагаются вблизи этой компоненты. В рассматриваемом варианте расположения источника и приёмных элементов отражённая от поверхности дна волновая компонента располагается вблизи водной волны. Это сни-



Рис. 7. Сечения  $L_2$ -нормы в зависимости от параметров  $v_{S1}$  и  $h_1$ 

зило отношение полезных сигналов к шуму и помехе при измерениях отражённой от поверхности плексигласа волны до величины порядка 10 дБ. Из показанных на рис. 6 зависимостей следует, что вблизи минимума зависимости решающей статистики от оцениваемых параметров её значения, которые можно оценочно считать пороговыми, достаточно больши́е. Это связано с больши́м уровнем реверберационных помех, формируемых близко расположенной водной компонентой. На рис. 6 тёмными и светлыми треугольниками показаны два сечения, соответствующие измерениям при смещении траектории, вдоль которой осуществлялись измерения, на один сантиметр, т. е.,  $y_{\rm R}[\rm cm] = y_0[\rm cm] + 1$ . При этом видно, что разброс реализаций решающих статистик не однороден, что связано с существенными вариациями уровней помех по указанным координатам.

На рис. 7 показаны сечения  $L_2$ -нормы в зависимости от параметров  $v_{S1}$  и  $h_1$ . При этом полезный сигнал накапливался когерентно вдоль волновой компоненты, отражённой от нижней границы слоя оргстекла и наблюдаемой в интервале задержек несколько ниже 400 мкс. На этих зависимостях видно, что в данном случае формируется несколько более крутой минимум, а значения D в экстремуме меньше значений, которые наблюдались при оценке параметров по волне, отражённой от верхней границы оргстекла. Это объясняется более низким уровнем реверберационных шумов при таких измерениях. При построении сечений на рис. 7 использовались значения плотности, которые были оценены с использованием измерений параметров продольной волны, отражённой от верхней границы оргстекла. Кроме того отметим, что в качестве второго слоя в измерениях выступал слой воды, параметры которого были известны. Это позволило уточнить используемую при реконструкции модель слоистого дна. Как указывалось выше, при рассмотренной геометрии измерений отражённая от верхней границы акустическая волна располагалась в плоскости ( $x_{\rm R}, \tau$ ) вблизи водной волны, которая её маскировала. Заметим, что при другой геометрии эксперимента, например при измерениях на меньшей глубине, водная волна не будет создавать больши́х помех при измерениях.

Минимумы значений сечений L<sub>2</sub>-нормы позволяют оценить величину параметров. Из полученных результатов следует, что в условиях используемой в данных исследованиях лабораторной

установки точность оценки параметров слоя плексигласа составила для плотности и скорости продольной волны величину порядка  $3 \div 4\%$ , а для скорости поперечной волны и толщины —  $2 \div 3\%$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе в лабораторных условиях исследовались возможности реконструкции геоакустических параметров донных слоёв с использованием параметрических моделей формирования сигналов. Для решения задачи на кафедре акустики ННГУ им. Н. И. Лобачевского была создана экспериментальная установка для измерения параметров зондирующих акустических импульсов, отражённых от набора упругих слоёв, помещённых в бассейн с водой. Разработаны устройства для формирования, излучения и приёма звуковых импульсов, отражённых от слоистой системы. Детально исследована структура реверберационных помех в измерительном бассейне. Показано, что в условиях используемой в исследованиях лабораторной установки точность оценки параметров слоя плексигласа составила для плотности и скорости продольной волны величину порядка  $3\div4\%$ , а для скорости поперечной волны и толщины —  $2\div3\%$ .

Опыт проведения измерений и обработки сигналов в лабораторных условиях позволяет сформулировать рекомендации, которые могут быть учтены при дальнейших исследованиях.

Во-первых, точность реконструкции может быть повышена, если дополнительно ослабить уровень реверберационных помех. Для этой цели следует покрыть стенки бассейна более толстым слоем поглощающей резины. Кроме того, необходимо ослабить уровень случайных неоднородностей границ донных слоёв, например путём шлифовки поверхностей плексигласа и стали. Кроме того, глубину положения излучателя и приёмника необходимо выбирать так, чтобы отражённые от слоистого дна сигналы не маскировались водными компонентами и волнами, отражёнными от поверхности водного слоя. Для более детального анализа точности реконструкции параметров донных слоёв следует исследовать статистическую структуру реверберационных помех в бассейне, и, прежде всего, в интервале значений положений и задержек, в которых осуществляются измерения отражённых от дна сигналов.

Во-вторых, полученные на первом этапе реконструкции оценки плотности, скорости волн в плексигласе, а также толщины плексигласа могут быть использованы для уточнения их значений при использовании результатов измерений характеристик продольной волны, отражённой от нижней границы плексигласа. При этом учитываются и априорные данные о водном слое. После оценок параметров слоя плексигласа можно перейти к следующему этапу реконструкции в рассматриваемом случае реконструкции параметров слоя из стали. После получения оценок параметров нижнего слоя можно вернуться к оценке параметров верхнего слоя с учётом полученных значений параметров нижнего слоя, при этом эти оценки могут быть уточнены. Таким образом, осуществляется итерационный процесс оценки параметров слоёв (послойная реконструкция, [7, 8]).

При реконструкции параметров донных слоёв используются оценки параметров вышележащих слоёв, за счёт чего точность реконструкции с ростом глубины падает [6–8]. Если исходно задать требуемую достоверность оценок, можно оценить предельную глубину, ограничивающую интервал, в пределах которого наблюдение возможно — так называемое поле зрения системы наблюдения. При этом поле зрения будет зависеть от входного отношения сигналов к шуму, т. е. от мощности источника сейсмоакустической подсветки, шероховатости и поглощения в среде, а также аддитивных шумов.

В. В. Уваров, В. И. Калинина, А. А. Хилько и др.

933

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания (проект 3.5672.2017/8.9). Авторы благодарят В. А. Лазарева за помощь в проведении измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Лазарев В. А., Малеханов А. И., Мерклин Л. Р.и др. // Акуст. журн. 2012. Т. 58, № 2. С. 227.
- 2. Лазарев В. А., Малеханов А. И., Мерклин Л. Р. и др. // Океанология. 2013. Т. 53, № 6. С. 843.
- Ivakin A. N. // In Boundary Influences in High Frequency Shallow Water Acoustics. University of Bath, Bath, Somerset, UK, 2008. P. 185. P. 185.
- 4. Ivakin A. N., Sessarego J. // J. Acoust. Soc. Amer. 2007. V. 122. P. EL165.
- 5. Гурбатов С. Н., Егорычев С. А., Курин В. В. и др. Труды Нижегородской акустической научной сессии. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2002. С. 33.
- 6. Романова В. И., Хилько А. И., Смирнов И. П. // Сб. трудов XXV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2, М.: ГЕОС, 2012. С. 280.
- 7. Смирнов И. П., Калинина В. И., Хилько А. И. // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 1. С. 46.
- 8. Смирнов И. П., Калинина В. И., Хилько А. И. // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 2.
- Bai J., David Yingst D. // 84th Annual Int. Meeting, SEG, Denver, Colorado, 26–31 October, 2014, Expanded Abstracts. P. 962.
- 10. Oldendurg D. W., Sheuer T., Levy S. // Geophysics. 1983. V. 48. P. 1318.
- 11. Алексеев А.С. Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М.: Наука, 1967. С. 9.
- 12. Ампилов Ю. П., Барков А. Ю., Яковлев И. В. и др. // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3.
- 13. Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е. // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5.
- 14. Rice J. K., White J. S. // SIAM. Review. 1964. V. 6, No. 3. P. 243.

Поступила в редакцию 3 июля 2017 г.; принята в печать 31 октября 2017 г.

## COHERENT SEISMOACOUSTIC SOUNDING OF THE MODEL OF THE LAYERED SEA BOTTOM UNDER LABORATORY CONDITIONS

V. V. Uvarov, V. I. Kalinina, A. A. Khil'ko, V. V. Kurin, and A. I. Khil'ko

The developed algorithms for reconstructing the geoacoustic parameters of the bottom layers during their coherent sounding are experimentally verified under laboratory conditions. The algorithms use the parametric models of forming the signals reflected from the layered half-space. To solve the problem, an experimental setup for measuring the parameters of the sounding acoustic pulses reflected from a set of elastic layers placed in a water basin is developed at the Department of Acoustics of N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. The devices for forming, radiating, and receiving the acoustic pulses reflected from the layered system are developed. The structure of reverberation interference in the measuring basin is studied. The parameters of the layered-bottom model are experimentally estimated for the optimized parameters of the sounding signals.