

На правах рукописи



КАЛИНИНА Вера Игоревна

**РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ МОРСКОГО ДНА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОГЕРЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ**

01.04.06 – акустика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель:

Хилько Александр Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Официальные оппоненты:

Петников Валерий Георгиевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН);

Шуруп Андрей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры акустики физического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ).

Ведущая организация:

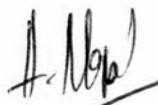
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук» (ИФЗ РАН, г. Москва).

Защита диссертации состоится «25» ноября 2019 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «21» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А.И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

В настоящее время значительная часть морского дна (под которым в дальнейшем будем понимать не только донную поверхность, но и состав донных пород) в относительно мелководных шельфовых районах Мирового океана активно исследуется в интересах сейсморазведки. Практический интерес вызывает поиск новых месторождений как в глубоководных районах морского шельфа, так и в окраинных морях, в частности на арктическом шельфе. Наиболее развитой и широко применяемой является технология, основанная на использовании мощных сейсмоакустических импульсов, излучаемых источниками взрывного типа, главным образом, пневматическими излучателями (пневмопушками), электромагнитными излучателями (бумерами) и электроискровыми разрядниками (спаркерами) [1–7]. Техническая реализация современных методов морской сейсморазведки имеет высокий уровень развития и включает, в том числе, специализированные малошумные суда, которые буксируют излучающие и многоканальные приемные решетки, размер которых может достигать несколько километров. При этом уровень излучения групповых пневмопушек достигает 240–260 дБ/м (относительно 1 мкПа). Однако обратной стороной широкого использования такой технологии является существенное негативное акустическое низкочастотное воздействие на морскую экосистему [8–9], поскольку требования увеличения глубины проникновения зондирующих сигналов в морское дно и пространственного разрешения донной структуры приводят к необходимости повышения мощности зондирующих импульсов. Кроме того, в спектрах их излучений преобладают низкочастотные компоненты (ниже 100 Гц), что ограничивает возможности реконструкции донных неоднородностей с высоким разрешением в диапазоне относительно небольших глубин. Наконец, использование мощных источников взрывного типа связано с необходимостью применения громоздкого оборудования и крупнотоннажных судов, что затрудняет их использование при решении целого ряда важных задач, таких как сейсмоакустическое зондирование мелководных районов, прибрежных акваторий, речных пойм и т. п.

Имеющиеся трудности и противоречия-могли бы быть устранены при использовании методов пространственного и временного накопления отраженных сигналов, что позволило бы ослабить мощность зондирующих импульсов [7]. Однако применение такого рода перспективных технологий накопления ограничивается низкой когерентностью сигналов, возбуждаемых не только пневмопушками, но и другими сейсмоакустическими источниками взрывного типа.

Как показывают оценки и наблюдения, значительный запас углеводородов содержится в морском дне в виде газогидратов, а также в газонасыщенных слоях. Структура таких залежей недостаточно исследована, в том числе из-за того, что имеющиеся методы профилирования морского дна эффектив-

ны при реконструкции донных слоев на относительно больших глубинах. Газогидраты же чаще всего располагаются на сравнительно небольших глубинах (первые сотни метров). Более подробное исследование газонасыщенных слоев и газогидратов важно также и при морских инженерных работах. В частности, при морском бурении и эксплуатации месторождений углеводородов, а также при использовании новых активных методов воздействия на продуктивные донные слои, газонасыщенные слои могут перейти в активное взрывоопасное состояние. Для повышения безопасности инженерных сейсмических работ необходимо использовать относительно маломощные источники, при этом важно не только детально знать структуру дна, но и контролировать динамику ее изменений.

В условиях отмеченных ограничений в использовании традиционных методов зондирования морского дна возникает задача поиска альтернативных путей к разработке методов и средств морской сейсмоакустики. Одним из подходов к решению такой задачи, предложенным в ИПФ РАН [10, 11], является использование когерентных акустических источников, позволяющих выполнять эффективное накопление полезных сигналов во временной и пространственной областях. Такой подход, с общей радиофизической точки зрения, представляется достаточно очевидным, однако, до настоящего времени он не получил значительного развития. В настоящей диссертационной работе представлены результаты дальнейшей разработки методов акустического зондирования морского дна с помощью когерентных широкополосных сложных импульсов (сложномодулированных импульсных сигналов с большим значением базы – произведения частотной полосы сигнала на его длительность).

Важной практической задачей является, помимо реконструкции горизонтов границ раздела донных слоев, реконструкция геоакустических параметров морского дна. К данным параметрам относятся, прежде всего, плотность пород и скорости распространения в них продольных и поперечных волн. Такое расширение объема геофизической информации относительно донных пород, очевидно, существенно расширяет практические возможности морской сейсморазведки в целом. С этой целью активно развиваются и используются на практике алгоритмы сейсмической инверсии [12–18]. По существу, такие алгоритмы направлены на решение обратной задачи сейсмологии, то есть на восстановление упругих параметров геологической среды по зарегистрированному приемниками акустическому волновому полю. Важно, что задача оценки геоакустических параметров осадочных пород слоистого дна является по своей постановке стохастической, поскольку в реальных условиях работы приемно-излучающего комплекса необходимо учитывать прием полезных зондирующих сигналов на фоне всей совокупности шумов и помех. Этот аспект значительно усложняет методы решения и требует детального анализа всех особенностей конкретной задачи, включая статистический анализ отдельных источников шума. В этой связи представляется актуальным даль-

нейшее развитие физических и математических (численных) моделей рассеяния зондирующих сигналов в слоисто-неоднородном морском дне на фоне шумов и реверберационных помех различного типа. Такое развитие моделей, а так же алгоритмы реконструкции должны обеспечивать повышенную устойчивость и точность оценок геоакустических параметров морского дна при решении конкретных задач морской сейсмоакустики.

Цели диссертационной работы

Целью диссертации является разработка физических основ и исследование возможностей реконструкции параметров морского дна при использовании в качестве источников зондирующих сигналов когерентных акустических излучателей, в частности:

- 1) развитие физических и численных моделей формирования когерентных сложных акустических импульсов, рассеянных в упругом слоистом дне, с учетом донной и поверхностной реверберации;
- 2) разработка алгоритмов реконструкции геоакустических параметров морского дна при его зондировании когерентными акустическими импульсами;
- 3) анализ статистических характеристик и устойчивости к шумам и помехам оценок геоакустических параметров пород морского дна путем численного стохастического моделирования и при проведении лабораторных и натуральных экспериментов.

Научная новизна

В диссертации развит перспективный метод реконструкции слоистой структуры морского дна, основанный на использовании когерентных акустических импульсов.

В работе впервые:

- показано, что использование когерентных акустических источников дает возможность реконструкции параметров морского дна при существенном (на несколько порядков) уменьшении амплитуд излучаемых акустических сигналов по сравнению с использованием источников взрывного типа;
- разработана модель формирования акустических импульсов, принимаемых в водном слое в результате рассеяния в упругом слоистом дне, учитывающая случайные неоднородности рельефа дна и наличие ветрового волнения, позволяющая корректно определять пороги уровней шумов при реконструкции параметров дна;
- разработан итерационный алгоритм послойной реконструкции геоакустических параметров морского дна, характеристики которого (дисперсия и сходимости к истинным значениям параметров) исследованы методом стохастического моделирования;

- экспериментально апробирован алгоритм оценки параметров морского дна с использованием когерентных акустических зондирующих импульсов в условиях физического моделирования и в натурных условиях мелководных районов Каспийского и Черного морей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для решения современных задач морской сейсморазведки и учета экологических требований при проведении инженерных работ, альтернативой использованию источников взрывного типа является применение когерентных широкополосных излучателей. Формируемые такими излучателями сигналы при относительно малых амплитудах зондирования позволяют использовать методы когерентного частотного, пространственного и временного накопления, при этом реконструкция структуры и параметров морского дна выполняется с точностью и чувствительностью, не меньшей, чем при использовании более мощных (до нескольких порядков) источников взрывного типа.

2. Разработанные алгоритмы и методы обработки принимаемых когерентных сигналов, включающие релаксационно-итерационный поиск решения с использованием различных функционалов невязки, позволяют повысить точность оценок геоакустических параметров донных слоев при решении практических задач морской сейсмоакустики.

Практическая значимость диссертационной работы

Материалы диссертации могут быть использованы при выполнении геофизических исследований и работ, связанных с морской поисковой и инженерной сейсмоакустикой. Особый интерес результаты диссертации могут представлять при проведении таких работ в условиях повышенных требований по ограничению уровня акустического воздействия на морскую экосистему. В частности, результаты диссертации могут представлять интерес при сейсморазведке в мелководных районах окраинных морей, в шельфовых районах, в том числе в Арктике, а также при контроле состояния морского дна при проведении подводных инженерных работ.

Личный вклад автора

Автор диссертации принимала участие в постановке задач, решаемых в работе, исследованиях, анализе и формулировке результатов. Автором лично был разработан программный комплекс для численных экспериментов по решению прямой и обратной задачи отражения акустических импульсов от слоистого морского дна, исследования влияния помех и шумов, методов оценки параметров морского дна с использованием различных функционалов невязки и их робастности. В эксперименте в Каспийском море автор участвовала в обработке экспериментальных данных. Эксперименты в бассейне и в

Черном море были выполнены при непосредственном участии автора диссертации, обработкой и интерпретацией результатов также занимался автор. Все приведенные в диссертации и вошедшие в работы [A1–A34] результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. В статьях [A6–A11] и трудах конференций [A22–A25, A30–A33] вклад автора был определяющим, остальные публикации были подготовлены автором на паритетных началах.

Достоверность полученных результатов обеспечивается взаимным сотрудничеством результатов теоретических и экспериментальных исследований, использованием общепризнанных теоретических подходов в качестве основы для разработки физико-математических моделей и алгоритмов реконструкции, современных методов численного моделирования и обработки экспериментальных данных. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих российских журналах и многократно докладывались на всероссийских конференциях.

Апробация результатов работы

Результаты работы неоднократно докладывались на всероссийских, региональных и международных конференциях. Были сделаны доклады на научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, каждый год, начиная с 2006 г. по 2019 г. включительно), XIII, XIV, XIV, XVI школах-семинарах им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана» (Москва, 2011, 2013, 2016, 2018 гг.), XIV, XVI, XVII, XX, XXI сессиях Российского акустического общества (РАО) (Москва, 2004, 2005, 2006, 2017, 2018 гг.), Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2011, Москва), 20-й Нижегородской сессии молодых ученых (Арзамас, 2015), XII, XIII, XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (Санкт-Петербург, 2012, 2014, 2016, 2018 гг.), Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных системах» (Н. Новгород, 2011 г.), Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (Москва, 2015 г.), V Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2016)» (Москва, 2016 г.), Научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2017» (Москва, 2017 г.).

Цикл работ автора по разработке высокочастотных акустических систем наблюдения в океане в 2010 г. получил грант по программе Американского акустического общества «Поддержка лучших научных работ молодых ученых». В 2011 г. во время обучения в аспирантуре В.И. Калинина была удостоена стипендии имени академика Г.А. Разуваева. На сессии РАО в 2011 г. доклад В.И. Калининой, включающий результаты диссертационной работы, отмечен грамотой РАО как один из лучших докладов молодых ученых.

Результаты работы обсуждались на научных семинарах ИПФ РАН, ИФЗ РАН, ИОФ РАН.

Работы, результаты которых частично вошли в диссертацию, были поддержаны РФФИ (гранты 09-02-00044, 12-02-005439, 16-29-02081); программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы океанологии: геология, физика, биология, экология», программой ОФН РАН «Фундаментальные основы акустической диагностики природных и искусственных сред», ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт № 02.740.11.0565), программой «Ведущие научные школы» (НШ-339.2014.2), грантом Президента СП-3549.2015.5, грантом от 7 сентября 2016 г. № ГУ/2016 по программе «УМНИК» (Фонд содействия инновациям).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 34 работы, из которых 11 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, 23 работы в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Список литературы состоит из 130 наименований, включая 34 публикации автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 159 страниц и включает 67 рисунков и 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** приведено обоснование актуальности темы настоящего исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, отмечена научная новизна проведенного исследования, его теоретическая и практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, указаны методы исследования и степень достоверности результатов, описаны структура и объем диссертации, а также отмечены публикации и личный вклад автора. Также во **Введении** приведен обзор существующих к настоящему времени методов и средств акустического зондирования морского дна, рассмотрены широко используемые алгоритмы реконструкции морского дна и применяемые способы оптимизации целевой функции. На основании такого обзора описаны проблемы методов инверсии и возможные пути их преодоления.

Глава 1 посвящена развитию модели формирования сложных акустических импульсных сигналов в море в результате рассеяния в слоистом дне, учитывающая случайные неоднородности рельефа дна и наличие ветрового волнения.

В разделе 1.1 описывается используемая в работе схема зондирования морского дна, состоящего из набора упругих слоев, когерентными сложно модулированными импульсами. Гидроакустический волновод представляет собой однородный слой жидкости $0 < z < H$ с плотностью жидкости ρ_0 , скоростью распространения звука c_0 и декрементом затухания δ_0 (рис. 1).

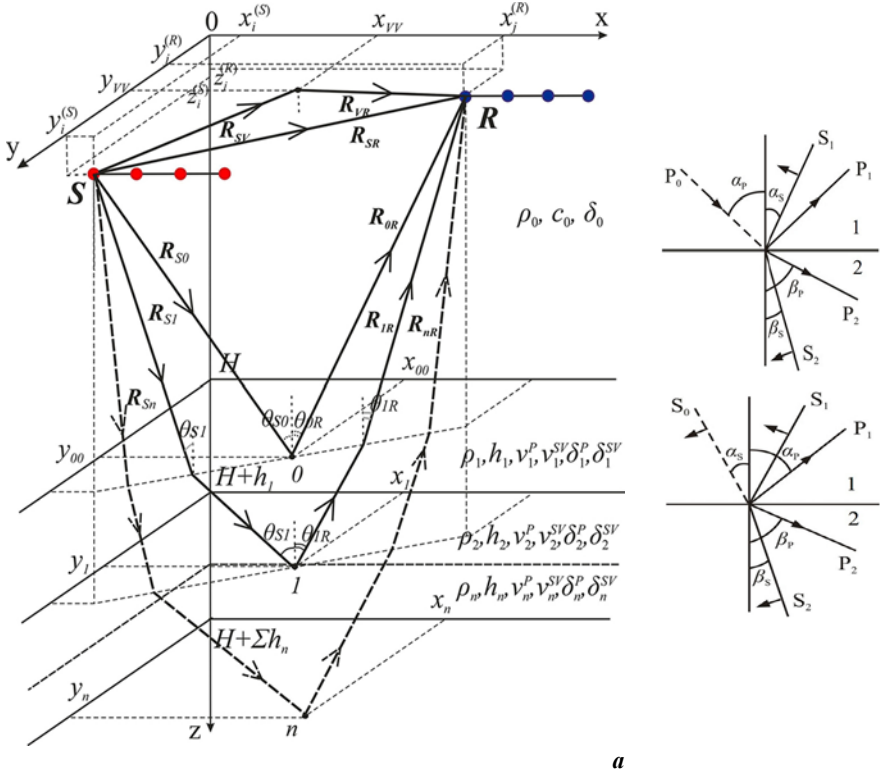


Рис. 1. Формирование отраженных импульсов от слоистого дна (*a* – траектория импульса при однократном отражении от нижней границы *n*-го слоя; *b* – отражение и преломление продольных (сверху) и поперечных (снизу) волн на границах упругих слоев)

Дно, согласно принятой геоакустической модели, представлено последовательностью из N упругих слоев, высотой h_n , $n = 1 \dots N$, которые описываются следующими параметрами: плотностью, скоростью распространения продольных волн, скоростью распространения поперечных волн, декрементом затухания продольных волн и декрементом затухания поперечных волн ($\rho_n, v_n^p, v_n^{sv}, \delta_n^p, \delta_n^{sv}$). Рассматривается помещенная в океанический волновод система наблюдения, состоящая из совокупности (S) ненаправленных

независимых друг от друга когерентных излучателей звука S_i , размещенных в точках множества $\{\mathbf{r}_j^{(S)} = (x_j^{(S)}, y_j^{(S)}, z_j^{(S)}), i = 1 \dots K_S\}$ (излучающая антенна), и расположенная на относительно небольшом горизонтальном расстоянии от излучателя система (R) ненаправленных гидрофонов R_j , расположенных в точках множества $\{\mathbf{r}_j^{(R)} = (x_j^{(R)}, y_j^{(R)}, z_j^{(R)}), i = 1 \dots K_R\}$ (приемная антенна). Излучателем S_i возбуждается импульсный сигнал.

Также в **разделе 1.1** приводятся основные уравнения, на основе которых была разработана численная модель формирования отраженных сложных акустических импульсов в море со слоистым дном. Получена формула для спектральных компонент импульса, отраженного от нижних границ слоев в геометроакустическом приближении, в которой коэффициенты отражения и преломления определяются из уравнений Цеппритца для амплитуд волн на границах упругих слоев [20].

В **разделе 1.2** описываются условия применимости развитой геометроакустической модели формирования отраженных сигналов. Разрабатываемая модель имеет следующие ограничения:

1) при отражении поля точечного источника от границ раздела слоев используется формула для коэффициентов отражения плоских волн; расстояния от излучателя и приемника до дна должны быть много больше, чем длина волны $|H - z_S|, |H - z_R| \gg \lambda$;

2) диапазон углов падения зондирующего сигнала ограничивается величиной $\sim 10^\circ$;

3) в модели слоистого дна полагаем, что слои горизонтально-однородные;

4) в модели формирования реверберации случайные неоднородности предполагаются плавными и крупными (параметр Рэлея $\gg 1$);

5) многократное рассеяние не учитывается.

В **разделе 1.3** анализируется структура сигналов при когерентном акустическом зондировании морского дна. Принимаемый сигнал формируется как сумма прямого импульса, импульса, отраженного от поверхности воды, импульса, отраженного от поверхности дна, набора из $k = \sum_{i=1}^N 4^i$ импульсов, отраженных от нижних границ донных слоев, а также реверберационных компонент отражения от свободной взволнованной поверхности воды и случайных неоднородностей рельефа дна. Развитая модель позволяет исследовать взаимосвязь основных параметров задачи и на этой основе оптимизировать решающие правила, обеспечивающие максимальное накопление полезных сигналов, а также снизить требования к априорным данным, то есть найти наилучшую процедуру поиска решения обратной задачи.

Результаты расчетов структуры акустических импульсов с выхода согласованного фильтра, отраженных от дна из шести упругих слоев, включающих слой газогидратов (слой № 5), лежащих на упругом полупространстве, пред-

ставлены на рис. 2. Зондирующие ЛЧМ импульсы с окном Блэкмана – Харриса, длительностью 0.125 с, возбуждались в полосе частот Δf от 150 до 250 Гц источником с мощностью 300 Вт. На рис. 2, б сверху представлена реализация суммарного отраженного от заданного слоистого дна сигнала, а снизу приведены отдельные компоненты импульса до интерференции, соответствующие суммам всех монотипных и обменных волн, которые образуются при отражении от нижней границы каждого слоя.

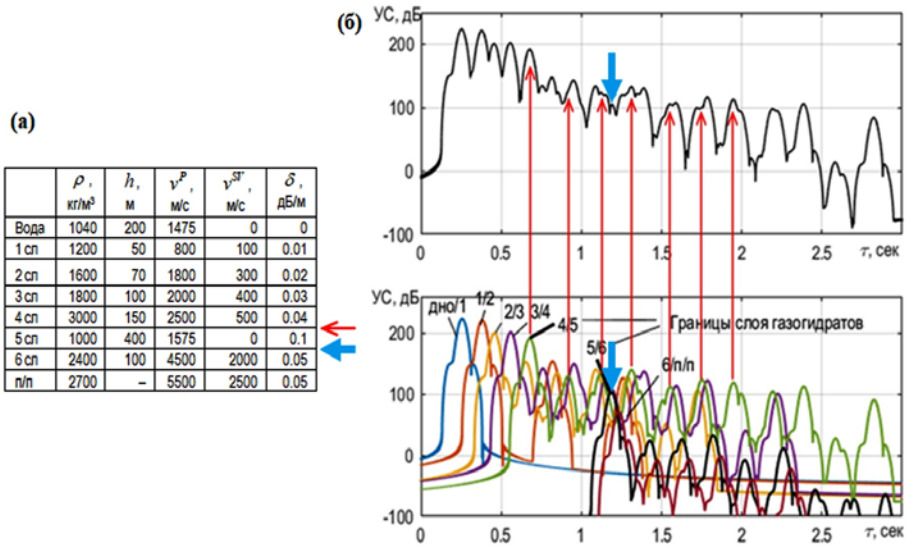


Рис. 2. (а) – геоакустическая модель дна; (б) – реализация сигнала, отраженного от морского дна в виде шести упругих слоев на упругом полупространстве (сверху – суммарный сигнал, снизу – компоненты импульса, представляющие собой суммы всех монотипных и обменных волн, отраженных от каждой границы)

Тонкими стрелками на рис. 2 обозначена верхняя граница слоя газогидратов, которая из-за наличия в вышележащих слоях упругих волн имеет множество пиков, влияющих на общий суммарный сигнал. Толстой стрелкой обозначена нижняя граница слоя газогидратов, которую на интерференционной картине, вследствие большого затухания и наложения других отражений, сложно идентифицировать. Видно, что отраженные от разных границ импульсы, соответствующие различным волновым компонентам, пересекаются. При их интерференции формируется сложная структура, причем пики отражений обменных волн могут быть ложно интерпретированы как границы более глубоких слоев. Разрабатываемая в работе модель предназначена для интерпретации соответствующих от границ откликов и компонент. В целом видно, что уровни различных волновых компонент, отраженных от слоистого

полупространства, отличаются на 2–4 порядка, причем средние их значения быстро спадают с глубиной. Волновые компоненты, связанные с переизлучением энергии в поперечные волны, относительно малы, так что их измерение возможно лишь при высоком уровне излучения и слабых помехах и шумах.

В разделе 1.4 приводится описание разрабатываемой модели реверберационных помех, возникающих при когерентном акустическом зондировании морского дна за счет рассеяния зондирующих импульсов на всех случайных граничных и объемных неоднородностях водной толщи и дна. Как показывают оценки, наибольший вклад в реверберационную помеху вносит рассеяние на случайных неоднородностях донной поверхности, а также рассеяние на свободной поверхности воды вследствие ветрового волнения. Для оценки вклада таких компонент используется коэффициент рассеяния высокочастотного звука и метод касательной плоскости Бреховских – Исаковича [21]. При импульсном зондировании реверберационные сигналы распределяются вдоль оси задержек в виде откликов согласованного фильтра, соответствующих рассеянию в импульсных объемах, имеющих форму эллиптических колец. Приведены расчеты реверберации по разным моделям волновода и набора жидких слоев.

В разделе 1.5 обсуждается влияние аддитивных шумов, наблюдаемых при зондировании морского дна когерентными акустическими импульсами. Как показывают эксперименты, наибольший вклад в шумы при акустическом зондировании морского дна в большинстве случаев вносит шум научно-исследовательского судна-буксировщика (НИС). Такие шумы часто не являются гауссовыми. Разработка теоретической модели такого шума практически невозможна, так как их структура зависит от особенностей конструкции и режимов работы механизмов судна. Для анализа возможностей зондирования морского дна когерентными акустическими импульсами можно воспользоваться эмпирической моделью шумов.

В разделе 1.6 сформулированы выводы по данной главе.

Глава 2 посвящена разработке алгоритмов реконструкции геоакустических параметров пород морского дна и исследованию их устойчивости к шумам и помехам при когерентном зондировании. В качестве искомым параметров слоя при решении обратной задачи реконструкции оцениваются его толщина, плотность, продольная и поперечная скорости грунта:

$$p = \{ \rho_i, h_i, v_i^p, v_i^{sv} \}, i = 1 \dots N.$$

В разделе 2.1 приводится схема и описание алгоритма послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании. При построении данного алгоритма используются априорные данные о зондируемой среде и данные выполненных ранее экспериментов, а также целевая функция оценки искомым параметров среды, основанная на детальном анализе особенностей формирования отраженных от слоистого дна импульсных сигналов, шумов и реверберационных помех (Глава 1). Особенности разработанного алгоритма являются:

1) возможность использования различных способов когерентного накопления сигналов – частотного (на выходе согласованного фильтра), пространственного (когерентное накопление на приемной антенне) и временного (алгоритм когерентного межимпульсного/траекторного накопления), поскольку имеется полная информация об излучаемых сигналах и имеет место полная повторяемость зондирующих сигналов при их непрерывном излучении;

2) статистическая проверка и отбрасывание ложных гипотез об искомым параметрах дна с использованием адаптивных порогов, получаемых с учетом внесенных в модель принимаемого сигнала шумов и реверберационных помех. При этом статистические характеристики полученных оценок параметров донных слоев должны удовлетворять исходно заданным требованиям (например, требованиям точности оценок параметров).

Алгоритм когерентной послойной реконструкции структуры морского дна может функционировать в двух режимах. Первый режим – это прогноз возможностей реконструкции в зависимости от параметров задачи и проектирование измерений при условии удовлетворения заданных требований реконструкции. Достижение указанных целей осуществляется с использованием методов стохастического моделирования, что позволяет выбрать оптимальные параметры целевой функции в зависимости от задаваемых априорно статистических характеристик измеряемых данных, априорной информации и требований к статистическим характеристикам решений. Второй режим обеспечивает выполнение реконструкции при конкретной схеме и условиях измерений, осуществляя операции накопления, оценивания и определения характеристик по экспериментально измеренным данным.

Параграф 2.1.1 содержит описание предложенного алгоритма когерентного траекторного накопления (КТН), который заключается в адаптивном (учитывающем наклон каждого слоя) межимпульсном накоплении сигналов, отраженных от разных границ донных слоев. Такое когерентное траекторное накопление позволяет дополнительно увеличивать отношение сигнала к шуму, что демонстрируется при дальнейшей обработке экспериментальных данных.

Параграф 2.1.2 содержит описание функционалов невязки, используемых при реконструкции параметров слоистого дна. Как показал дальнейший анализ, различные функционалы невязки имеют различную чувствительность и статистическую устойчивость при оценке отдельных параметров морского дна. В работе используются: стандартный функционал – L_p -норма, модифицированный алгоритм оценивания – процессор AMUSIC [22] и новый функционал – нейроноподобная свертка сигналов [A4]. Формулы, используемые для расчетов, подробно представлены в диссертации.

Параграф 2.1.3 содержит описание релаксационно-итерационного метода поиска решений, используемого в работе. При этом поиск значений параметров происходит последовательно и послойно, а локально найденные экстремумы, соответствующие параметрам предыдущего слоя, принимаются в

качестве искомых оценок и учитываются при поиске параметров последующего слоя с последующим итерационным возвратом к их оценкам. Итерации останавливаются после фиксации сходимости оценок параметров к стационарным значениям.

В разделе 2.2 приводится анализ решения обратной задачи по реконструкции параметров донных слоев на примере импульсного зондирования верхних осадочных слоев.

В параграфе 2.2.1 описывается возможность сужения интервалов поиска параметров осадочных слоев с использованием априорной информации и аналитических зависимостей принимаемого сигнала (амплитуд и времен прихода отраженных от слоев импульсов) от параметров расположения излучателя и приемной системы, а также от самих геоакустических параметров донных слоев.

В параграфе 2.2.2 представлены особенности восстановления параметров двухслойных осадков с использованием функционалов невязки, основанных на спектральных свойствах корреляционных матриц (AMUSIC). Рассматриваются модификации такого функционала невязки, адаптированные под решаемую задачу. Приводятся результаты оценок с обобщенными процессорами, которые строятся на основе перемножения процессоров на разных частотах (AMUSIC_f), перемножения процессоров при различных отдалениях приемной системы от излучателя (AMUSIC_r), или же концентрации процессора на определенной задержке, соответствующей времени прихода отдельного импульса (AMUSIC_τ).

В параграфе 2.2.3 приводятся результаты работы послойного итерационного метода и анализа устойчивости решений к шумам при реконструкции донных осадочных слоев. В качестве апробации метода приводится (рис. 3) пример оценки плотности и скорости волны в жидком слое и оценки плотности и скорости волны в подстилающем жидком полупространстве. На рис. 3 показана сходимость оценок к истинным значениям при одинаковом отношении сигнал/шум при различных начальных приближениях (толстой черной линией указаны истинные значения параметров). Видно, что с увеличением числа итераций качество оценок монотонно растет и средние значения сходятся к истинным. Полный список всех параметров, используемых в модели, приведен в диссертации.

В параграфе 2.2.4 приводятся примеры использования метода последовательной релаксации при реконструкции параметров дна, состоящего из трех жидких слоев, лежащих на жидком полупространстве. Рассчитываются совместные оценки скоростей звука и плотностей донных осадочных слоев и совместные оценки скоростей звука и толщин донных осадочных слоев с использованием функционала невязки типа AMUSIC, а также демонстрируются возможности и преимущества использования комбинации процессоров, рассчитанных при различных начальных приближениях.

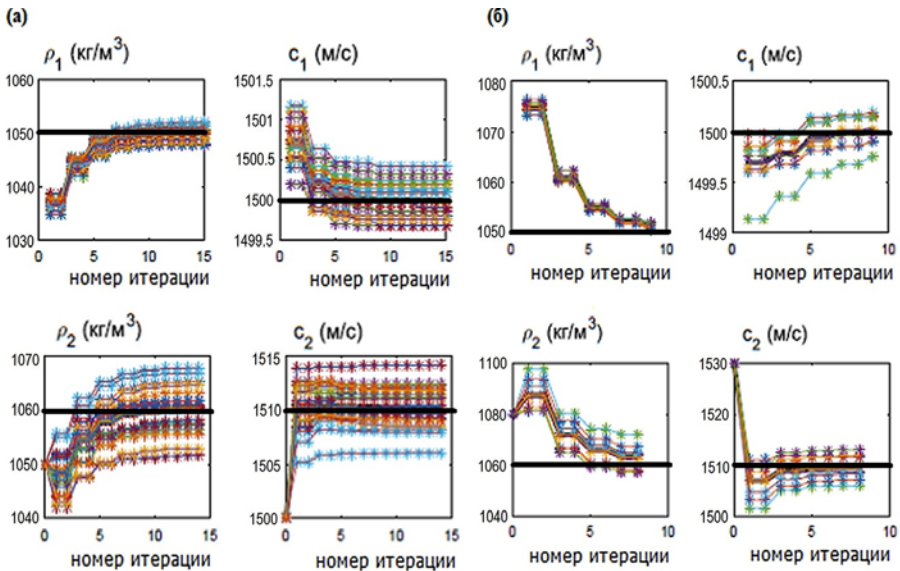


Рис. 3. Траектории поиска параметров модели дна (в виде жидкого слоя на жидком полупространстве) при послойно-итерационном методе

В разделе 2.3 проводится сравнительный анализ робастности реконструкции параметров упругих донных слоев при использовании различных функционалов невязки. В качестве модели морского дна используется набор упругих слоев. В качестве функционалов невязки (рис. 4) используются: 1 – L_2 -норма; 2 – L_2 -норма с описанным ранее алгоритмом когерентного траекторного накопления; 3 – обобщенный процессор P_r AMUSIC $_f$, получаемый перемножением двух отдельных процессоров AMUSIC $_f$, взятых при двух отклонениях приемной решетки от излучателя, каждый из процессоров получается из спектральных амплитуд сжатого сигнала и модели на центральной частоте ЛЧМ-сигнала; 4 – процессор AMUSIC $_r$, в котором корреляционные матрицы получаются из амплитуд после согласованной фильтрации сигнала и модели и концентрации на определенной задержке τ , выбираемой исходя из того, параметры какого слоя хотим оценить; 5 – обобщенный процессор P_f AMUSIC $_f$, получаемый перемножением на разных частотах сигнала отдельных процессоров AMUSIC $_f$, в которых корреляционные матрицы получаются из спектральных амплитуд сжатого сигнала и модели на одной из частот ЛЧМ-сигнала; 6 – нейроподобная свертка сигнала и модели.

В разделе 2.4 сформулированы выводы по данной главе.

В Главе 3 обсуждаются результаты экспериментальной апробации метода когерентной реконструкции структуры морского дна. Эксперименты проводились в условиях физического моделирования в бассейне и в морских условиях в Каспийском и Черном морях.

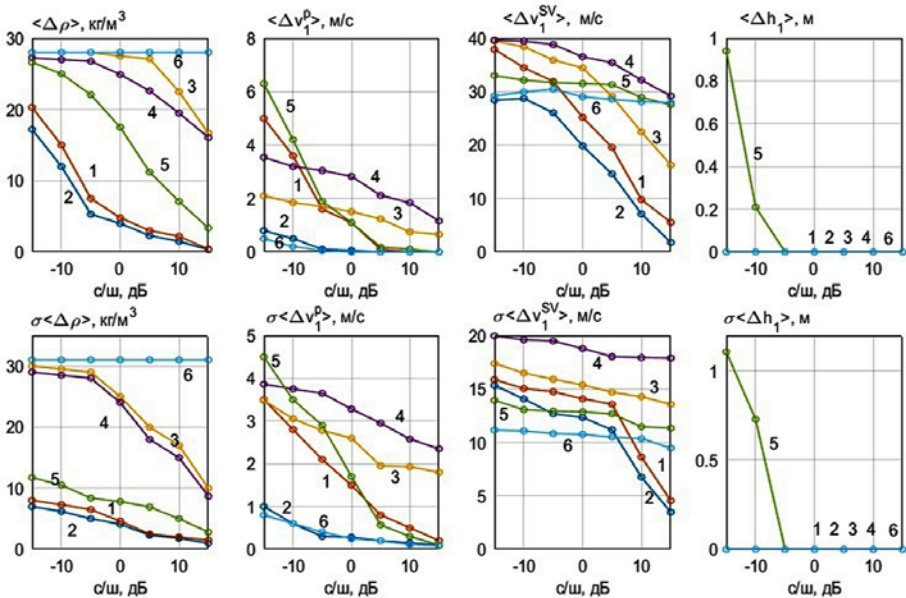


Рис. 4. Сравнительный анализ статистической устойчивости реконструкции параметров морского дна (плотности, продольной скорости, поперечной скорости, толщины слоя) при использовании различных функционалов невязки

В разделе 3.1 описывается установка для экспериментальной апробации метода реконструкции структуры морского дна в условиях лабораторного бассейна. В качестве упругого слоя, параметры которого оцениваются, использовался слой плексигласа. Подсистемой излучения формировались акустические ЛЧМ импульсы в полосе частот от 25 кГц до 3 МГц, длительностью от 10^{-3} до 0.1 с. Источник акустических сигналов и приемная система располагались на глубинах от 30 до 2 см, расстояния между ними менялись с помощью подвижной каретки гидрофона от 20 мм до 660 мм, точность определения положения измерительных элементов в бассейне обеспечивалась лазерным дальномером и составляла 0.1 мм. Приведены результаты численного моделирования эксперимента по указанным данным на основе разработанной в Главе 1 модели.

В параграфе 3.1.1 обсуждаются методы накопления акустических сигналов и возможности ослабления реверберационных помех и шумов благодаря применению импульсного стробирования, подбору относительного положения излучателя и приемника и отключению привода механизма перемещения каретки гидрофона, который вносил наибольший вклад в аддитивные помехи при измерениях. Это позволило повысить отношение сигнал/шум на 40 дБ.

В параграфе 3.1.2 приведены оценки параметров слоя плексигласа с использованием разработанной модели и функционала невязки типа L_2 -нормы.

Показано, что в конкретной установке для физического моделирования и при используемых алгоритмах точность реконструкции донного слоя плексигласа составила для плотности и скорости поперечной волны величину порядка 3–4 %, а для скорости продольной волны и толщины плексигласа – порядка 2–3 % (относительно значений параметров, взятых из справочника).

Раздел 3.2 содержит описание условий и оборудования при проведении совместных с ИО РАН экспериментов в акватории Каспийского моря с глубинами около 400 м. Измерения структуры сейсмоакустических сигналов осуществлялись с борта НИС «Рифт» с помощью сейсмокоды из 25 гидрофонов, расположенных с шагом 1 метр, буксируемой со скоростью 2.5 узла в горизонтальном положении на глубине 3.5 метра и расстоянии 100 метров от НИС. Когерентный излучатель работал в частотном диапазоне 150–750 Гц и буксировался на глубине 30 м, длительность импульсов составляла от 0.1 до 0.5 с, период следования 2 с. В условиях эксперимента входное отношение сигнал/шум (в зависимости от мощности излучения от 100 до 300 Вт) составляло от 5 до минус 15 дБ.

В **параграфе 3.2.1** приводится структура зондирующих сигналов, анализ спектрального состава и статистических характеристик аддитивных шумов, наибольший вклад в которые вносили шумы судна-буксировщика, а также исследование структуры реверберационных помех.

В **параграфе 3.2.2** производится апробация предложенного метода КТН (глава 2) на примере накопления 100 импульсов на одном из участков траектории, где излучались ЛЧМ импульсы в диапазоне от 150 до 250 Гц длительностью 0.125 с. На рис. 5 изображен результат такого когерентного траекторного накопления, которое позволило дополнительно увеличить отношение сигнала к шуму от 10 до 15 дБ, что дало возможность на глубинах залегания донных слоев порядка 500 м выявить ранее не наблюдаемую нижнюю кромку газонасыщенных слоев.

Раздел 3.3 посвящен описанию условий и оборудования при проведении экспериментов в мелководном районе Черного моря с глубинами около 50 м. Измерения структуры сейсмоакустических сигналов осуществлялись с борта НИС «Акварин» с помощью сейсмокоды из 16 гидрофонов, расположенных с шагом 1.5 метра, буксируемой со скоростью 3 узла в горизонтальном положении на глубине 17.5 метра и расстоянии 5 метров от НИС. Когерентный излучатель работал в частотном диапазоне 200–8000 Гц и буксировался на глубине 20 м, длительность импульсов составляла от 0.5 до 1 с, период следования 1.5 с. В условиях эксперимента входное отношение сигнал/шум (в зависимости от мощности излучения от 50 до 100 Вт) составляло от 0 до минус 5 дБ.

В **параграфе 3.3.1** анализируются результаты испытаний и приводятся результаты измерения амплитудно-частотной характеристики излучателя в морских условиях.

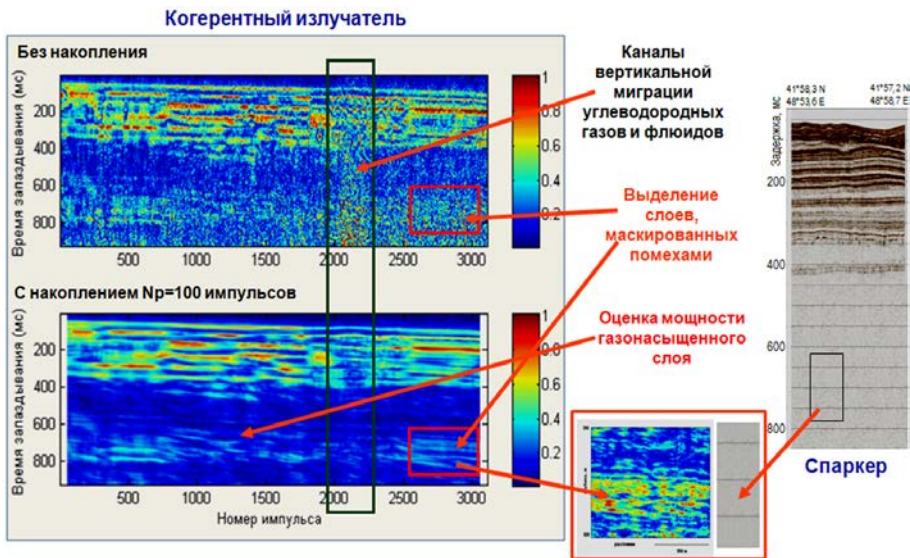


Рис. 5. Изображения донных слоев для трассы в акватории Каспийского моря при зондировании одиночным акустическим импульсом (слева сверху) мощностью 300 Вт и при когерентном траекторном накоплении 100 импульсов (слева снизу). Изображение, полученное с использованием спаркера мощностью 1 кВт, приведено справа

В параграфе 3.3.2 приводится апробация предложенного метода КТН, а так же оценка параметров донных слоев. На рис. 6 слева изображен результат пространственного когерентного накопления по приемной антенне и КТН 10 импульсов на одном из участков траектории, где излучались ЛЧМ импульсы в диапазоне от 200 до 8000 Гц длительностью 0.5 с, что позволило дополнительно увеличить отношение сигнала к шуму до 10 дБ.

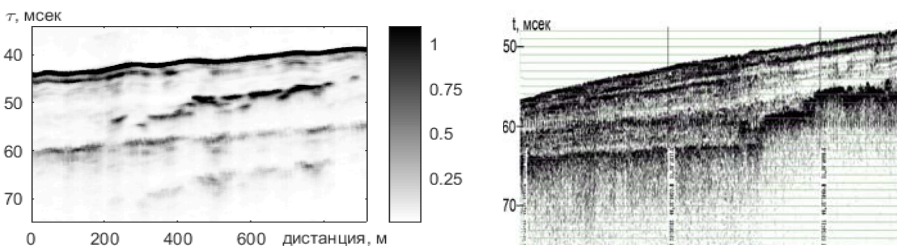


Рис. 6. Сравнение результатов реконструкции морского дна в районе полигона в Черном море, полученных когерентным акустическим излучателем мощностью 100 Вт с широкополосными ЛЧМ импульсами и частотно-пространственно-временным накоплением (слева) со спаркером мощностью 1 кВт (справа)

В разделе 3.4 сформулированы выводы по данной главе.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для решения задачи реконструкции параметров морского дна при зондировании когерентными сложными акустическими импульсами разработана геометроакустическая модель формирования рассеянных в слоистом дне акустических сигналов, учитывающая случайные неоднородности донного рельефа и наличие ветрового волнения. Показано, что разработанная модель позволяет рассчитывать относительные уровни сигналов, шумов и реверберационных помех для обнаружения рассеянных сигналов и повысить точность оценок геоакустических параметров донных слоев. Получены количественные оценки глубины реконструкции этих параметров в зависимости от уровня реверберационных помех.

2. Разработан послойный итерационный алгоритм оценивания геоакустических параметров морского дна при излучении когерентных сложных акустических импульсов и проведено его стохастическое моделирование с использованием различных целевых функций. Показано, что наилучшую устойчивость к шумам и помехам при оценке геоакустических параметров имеет функционал невязки типа L_2 -нормы с когерентным пространственно-частотным накоплением. Функционал невязки типа AMUSIC также показывает хорошую сходимости, однако дисперсия оценки при малых отношениях сигнал/шум больше, чем в аналогичных условиях при использовании невязки типа L_2 -нормы. Функционал невязки типа нейроподобной свертки демонстрирует наименьшую дисперсию оценки значений скоростей продольных волн в слоях и толщин слоев при малых отношениях сигнал/шум по сравнению с другими рассматриваемыми функционалами.

3. При проведении физического моделирования в лабораторных условиях установлено, что когерентное накопление акустических сигналов позволило повысить отношение сигнала к реверберационному шуму на 40 дБ, при этом точности оценки скорости продольной волны, скорости поперечной волны, плотности и толщины первого донного слоя были повышены и составили от 2 до 5 %.

4. В результате обработки данных по когерентному зондированию морского дна в акватории Каспийского моря, показано, что предложенный в диссертации метод когерентного траекторного накопления акустических импульсов в условиях наклонных отражающих донных слоев позволил в анализируемом частотном диапазоне зондирования от 150 до 250 Гц дополнительно увеличить отношение сигнала к шуму от 10 до 15 дБ. Это дало возможность на глубинах залегания донных слоев порядка 500 м выявить ранее не наблюдаемую нижнюю кромку газонасыщенных слоев. Результирующий суммарный выигрыш с учетом процедур когерентного траекторного накопления и накопления по антенне составил до 30 дБ, что дает возможность эквивалентного снижения уровня излучения зондирующих сигналов до 10^3 раз в сравнении с источниками взрывного типа (в данном случае, со спаркером).

5. Проведены эксперименты по когерентному зондированию морского дна в мелководной акватории Черного моря. Показано, что совместное применение процедуры частотного сжатия широкополосных зондирующих сигналов (в полосе от 200 Гц до 8 кГц), когерентного траекторного накопления в условиях наклонных границ и когерентного накопления по антенне позволили дополнительно увеличить отношение сигнала к шуму до 15 дБ. Оценки скоростей, плотностей и толщин донных слоев соответствует интервалу типичных значений этих параметров для данной акватории Черного моря.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морская сейсморазведка / Под ред. А.Н. Телегина. М. : ООО “Геоинформмарк”, 2004. 237 с.

2. Мерклин Л.Р. Основные технологические тенденции в морской сейсморазведке // Труды IX научной школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана» и XII сессии РАО / М. : ГЕОС, 2002. С. 351-358.

3. Гайнанов В.Г., Зверев А.С. Сейсмоакустический комплекс для двухчастотного профилирования на акваториях // Океанология. 2010. Т. 50, № 4. С. 649-653.

4. Гончар А.И., Донченко С.И., Шлычек Л.И. Современные технические средства профилирования дна // Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана. Сб. научн. тр. НТЦ ПАС НАН Украины. Запорожье, 2006, № 3, С. 120-128.

5. Askeland B., Ruud B.O., Hobak H., Mjelde R. A seismic field test with a low-level acoustic combustion source and pseudo-noise codes // J. Applied Geophysics. 2008. V. 22, № 9. P. 1224-1236.

6. Мерклин Л.Р., Левченко О.В. Сейсмоакустические исследования с параметрическим профилографом (1988–2001 гг.) // Акустические океанологические исследования и экспедиции / под ред. В.П. Кузнецова, Б.Г. Мордвинова, В.И. Тимошенко. Ростов-на-Дону : Ростиздат, 2002. С. 396-413.

7. Arslan M. Tashmukhambetov., George E. Ioup, Juliette W. Ioup, Natalia A. Sidorovskaia, Joal J. Newcomb. Three-dimension seismic array characterization study: Experiment and modeling // J. Acoustic. Soc. Am. V. 123, № 6. June 2008. P. 4094-4108.

8. Сидоровская Н.А., Аюп Дж. Е., Аюп Д.В., Ташмухамедов А.М., Екимов А.Э. Использование пассивных акустических методов для изучения влияния индустриальной деятельности человека на морскую мегафауну // Труды XIII школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского акустического общества. М. : ГЕОС, 2011. С. 205-211.

9. Патин С.А. Антропогенное воздействие на морские экосистемы и биоресурсы: источники, последствия, проблемы // Труды ВНИРО, Контроль и охрана состояния водной среды и биоресурсов. М., 2015. Т. 154. С. 85-104.

10. Лебедев А.В., Малеханов А.И. Когерентная сейсмоакустика // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 7. С. 579-597.
11. Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н., Вировлянский А.Л., Лебедев А.В., Малеханов А.И., Марышев А.П., Таланов В.И. Перспективные методы и технические средства сейсмоакустического зондирования шельфа и береговой зоны океана // Фундаментальные исследования океанов и морей. Т. 2. М. : Наука, 2006. С. 491-511.
12. *Gingras D.F. and Gerstoft P.* Inversion for geometric and geoacoustic parameters in shallow water : Experimental results. SACLANT Undersea Research Centre, Report, December 1994. 34 p.
13. *Jeremic Aleksandar.* Constrained Non-Linear Seismic Inversion : A Thesis Presented to the Faculty of the Department of Earth and Atmospheric Sciences University of Houston. December 2008. 75 p.
14. *Ли Цян.* Разработка помехоустойчивых алгоритмов динамической инверсии сейсмических данных : Диссертация / РГУ нефти и газа. М., 2018.
15. *Кребс Джером Р., Хинкли Дэвид Л.* Эффективный способ инверсии геофизических данных : Патент РСТ/US2009/032010, WO 2009/117174 2009.09.24.
16. *Jiang Y., Chapman N.R., De Ferrari H.A.* Geoacoustic inversion of broadband data by matched beam processing // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 119. № 6. P. 3707-3716.
17. *Yang T.C., Yoo K., Fialkowski P.* Subbottom profiling using a ship towed line array and geoacoustic inversion // J. Acoust. Soc. Am. 2007. V. 122, № 6. P. 3338-3352.
18. *Веденев А.И., Гончаров В.В., Курьянов Б.Ф.* Оценка акустических параметров морского дна по интерференции широкополосного звука // Акустические волны в океане / Под ред. Л.М. Бреховских и И.Б. Андреевой. М. : Наука, 1987. С. 162-173.
19. *Гайнанов В.Г.* Сейсморазведка : учебное пособие. М. : МГУ, 2006. 149 с.
20. Сейсморазведка : справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. М. : Недра, 1981. 464 с.
21. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. Л. : Гидрометиздат, 1982. 264 с.
22. *Сазонтов А.Г., Смирнов И.П., Матвеев А.Л.* Локализация источника в мелководном канале со взволнованной поверхностью // Акустический журнал. 2015. Т. 61, №1. С. 114-122.
23. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М. : Наука, 1997. 191 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Стромков А.А., Таланов В.И., Хилько А.И. Экспериментальное исследование возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными импульсными сигналами // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58, № 2. С. 227-236.

А2. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое профилирование морского дна с использованием широкополосных сигналов // *Океанология*. 2013. Т. 53, №6. С.843-850.

А3. Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Лазарев В.А., Малеханов А.И., Петухов Ю.В., Романова В.И., Хилько А.И. Реконструкция параметров осадочных слоев морского дна мелкого моря с использованием широкополосных сейсмоакустических источников моря // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59, № 3. С. 354-362.

А4. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Романова В.И. Использование нейросетевых структур свободной динамики с контекстно-зависимыми параметрами для наблюдения в неоднородных нестационарных средах // *Известия вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, №2. С. 104-124.

А5. Калинина В.И., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Таланов В.И., Хилько А.И. Когерентные методы сейсмоакустического зондирования морского дна // *Технологии сейсморазведки*. 2015. № 4. С. 81-88.

А6. Калинина В.И., Смирнов И.П., Малеханов А.И., Хилько А.И. Когерентная морская сейсмоакустика: новые подходы к реконструкции структуры донных слоев в шельфовых акваториях // *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81, № 8. С. 1020-1027.

А7. Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И. Оптимизация алгоритмов решения обратной задачи при реконструкции геоакустических параметров слоев дна морского шельфа с помощью зондирования когерентными сейсмоакустическими импульсами // *Ученые записки Физического факультета Московского университета*. 2017. № 5. С. 1750131.

А8. Уваров В.В., Калинина В.И., Хилько А.А., Курин В.В., Хилько А.И. Когерентное сейсмоакустическое зондирование модели слоистого морского дна в лабораторных условиях // *Известия вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 60, № 10. С. 922-934

А9. Смирнов И.П., Калинина В.И., Хилько А.И. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. I. Решающие правила // *Акустический журнал*. 2018. Т. 64, № 1. С. 46-55.

А10. Смирнов И.П., Калинина В.И., Хилько А.И. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустическом зондировании. II. Анализ робастности // *Акустический журнал*. 2018. Т. 64, № 2. С. 207-216.

А11. Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И., Курин В.В., Хилько А.А. Восстановление параметров морского дна при когерентном сейсмоакустиче-

ском зондировании. III. Накопление сигналов и подавление шумов // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 1. С. 10-21

A12. *Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И.* Экспериментальные исследования возможностей сейсмоакустического зондирования морского дна когерентными низкочастотными импульсами // Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей. М. : Научный мир, 2010. С. 300-314.

A13. *Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Таланов В.И., Хилько А.И.* Исследование особенностей акустического зондирования морского дна когерентными низкочастотными импульсами // Труды XII школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXI сессией Российского акустического общества. М. : ГЕОС, 2009. С. 288-292.

A14. *Романова В.И., Мерклин Л.Р., Хилько А.И., Малеханов А.И., Лазарев В.А., Стромков А.А.* Экспериментальное исследование эффективности сейсмоакустического зондирования морского дна в зависимости от спектральных и статистических характеристик шумов и помех // Труды XXII сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. М. : РАО, 2010. С. 301-305.

A15. *Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Стромков А.А., Таланов В.И., Коваленко В.В., Хилько А.И.* Анализ особенностей формирования и экспериментальная оценка когерентности отраженных от морского дна сейсмоакустических сигналов // Труды XIII школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXIII сессией Российского акустического общества. М. : ГЕОС, 2011. С. 358-361.

A16. *Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Лазарев В.А., Романова В.И., Хилько А.И.* Особенности формирования сигналов, реверберационных помех и шумов при когерентном сейсмоакустическом зондировании морского дна // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2. М. : ГЕОС, 2011. С. 350-354.

A17. *Хоботов А.Г., Хилько А.И., Яхно В.Г., Романова В.И.* Обработка сложных сигналов нейроноподобными структурами // Труды Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных системах». Н. Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 214-218.

A18. *Лазарев В.А., Петухов Ю.В., Романова В.И., Хилько А.И.* Восстановление интегральных вдоль акустической трассы характеристик донных слоёв по тонкой структуре спектра звукового импульса // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2. М. : ГЕОС, 2011. С. 343-446.

A19. *Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Лазарев В.А., Романова В.И., Хилько А.И.* Особенности формирования сигналов, реверберационных помех и шумов при когерентном сейсмоакустическом зондировании морского дна

// Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2. М. : ГЕОС, 2011. С. 350-354.

A20. *Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Малеханов А.И., Хилько А.И., Лазарев В.А., Романова В.И.* Реконструкция донных слоёв мелкого моря по частотно-временным распределениям интенсивности сигналов пневмоакустического источника // Сборник трудов XXIV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2. М. : ГЕОС, 2011. С. 334-337.

A21. *Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Романова В.И., Хилько А.И.* Когерентное сейсмоакустическое зондирование морского дна // Труды XII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2011). М., 2011. Т. 1. С. 113-123.

A22. *Романова В.И., Хилько А.И.* Реконструкция параметров упругого слоистого дна морского шельфа с помощью буксируемого когерентного акустического излучателя сенсоров // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2012. С. 262-265.

A23. *Романова В.И., Хилько А.И., Смирнов И.П.* Использование модели отражения импульсов от упругого слоистого дна для реконструкции параметров слоев при буксировке когерентного акустического излучателя в мелком море // Сборник трудов XXV сессии Российского акустического общества и сессии Научного совета по акустике РАН. Т. 2. М. : ГЕОС, 2012. С. 280-285.

A24. *Романова В.И., Хилько А.А., Хилько А.И.* Регуляризация реконструкции параметров морского дна с помощью модели отражения сейсмоакустических импульсов от упругого слоистого полупространства // Труды XIV школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXVI сессией Российского акустического общества. М. : ГЕОС, 2013. С. 219-223.

A25. *Калинина В.И., Лазарев В.А., Уваров В.В., Хилько А.И.* Исследование метода когерентного сейсмоакустического зондирования морского дна в условиях физического моделирования // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. : Нестор-История, 2014. С. 477-480.

A26. *Хилько А.И., Калинина В.И.* Минимизация экологического урона при сейсмоакустическом профилировании дна морского шельфа и пойм больших рек на основе использования когерентных излучателей // Сборник Трудов XIV международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». М. : РУДН, 2015. № 4. С. 81-88.

A27. *Калинина В.И., Хилько А.И., Мерклин Л.Р., Малеханов А.И., Лазарев В.Н.* Экспериментальная оценка параметров морского дна в мелководной прибрежной акватории // Труды XIII Всероссийской конференции «Приклад-

ные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. : Нестор-История, 2016. С. 74-76.

A28. *Калинина В.И., Мерклин Л.Р., Плешаков А.Ю., Лазарев В.А., Уваров В.В., Хилько А.И.* Экспериментальное измерение геоакустических характеристик дна морского шельфа // Труды XV научной школы-семинара им. академика Л. М. Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXII сессией Российского акустического общества. М. : ГЕОС, 2016. С. 36-39

A29. *Калинина В.И., Малеханов А.И., Хилько А.И. Мерклин Л.Р.* Сейсмопрофилирование и оценивание параметров дна морского шельфа при когерентном и некогерентном сейсмоакустическом зондировании // Труды V Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2016)». М. : Феория, 2016. С. 157-161

A30. *Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И.* Оценивание геоакустических параметров слоев дна морского шельфа с помощью зондирования когерентными сейсмоакустическими импульсами // Труды V Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2016)». М. : Феория, 2016. С. 200-205.

A31. *Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И.* Оптимизация алгоритмов решения обратной задачи при реконструкции геоакустических параметров слоев дна морского шельфа с помощью зондирования когерентными сейсмоакустическими импульсами // Труды II Всероссийской акустической конференции, совмещенной с XXX сессией Российского акустического общества. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2017. С. 1011-1016.

A32. *Калинина В.И., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р., Смирнов И.П., Хилько А.И.* Реконструкция геоакустических параметров донных слоев в морском шельфе и поймах больших рек с помощью когерентной сейсмоакустики // Сейсмические технологии-2017 : материалы научно-практической конференции / ООО «Центр анализа сейсмических данных МГУ им. М.В. Ломоносова». М., 2017. С. 167-170.

A33. *Уваров В.В., Калинина В.И., Хилько А.А., Курин В.В., Хилько А.И.* Когерентное сейсмоакустическое зондирование модели слоистого морского дна в лабораторных условиях // Труды XVI школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXXI сессией Российского акустического общества. М. : ГЕОС, 2018. С. 158-161.

A34. *Калинина В.И., Смирнов И.П., Хилько А.И.* Исследование возможностей регуляризации при когерентном сейсмоакустическом зондировании морского дна // Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2018. С. 365-368.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Развитие модели формирования сложных акустических импульсных сигналов в море в результате рассеяния в слоистом дне, учитывающей случайные неоднородности рельефа дна и наличие ветрового волнения

1.1. Модель формирования сложных акустических импульсов в море со слоистым дном

1.2. Анализ применимости развитой модели формирования отраженных от слоистого дна когерентных акустических импульсов

1.3. Анализ структуры сложных акустических импульсов при когерентном зондировании в море со слоистым дном

1.4. Разработка модели реверберационных помех, возникающих при когерентном акустическом зондировании морского дна за счет рассеяния на случайных неоднородностях донной поверхности и взволнованной поверхности воды

1.4.1. Реверберационные помехи, возникающие при рассеянии когерентных акустических зондирующих импульсов на случайных неоднородностях донного рельефа

1.4.2. Реверберационные помехи, возникающие при рассеянии когерентных акустических зондирующих импульсов на ветровом волнении

1.5. Модель аддитивных шумов, наблюдаемых при зондировании морского дна когерентными акустическими импульсами

1.6. Выводы

Глава 2. Разработка алгоритмов реконструкции геоакустических параметров морского дна и исследование их устойчивости к шумам и помехам при когерентном зондировании

2.1. Разработка алгоритма послойной реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании

2.1.1. Описание алгоритма когерентного траекторного накопления (КТН)

2.1.2. Описание функционалов невязки, используемых при реконструкции параметров слоистого дна

2.1.3. Описание релаксационно-итерационного метода поиска решений

2.2. Анализ решения обратной задачи по реконструкции параметров верхних осадочных слоев при когерентном импульсном зондировании морского дна

2.2.1. Уточнение интервалов поиска параметров осадочных слоев

2.2.2. Исследования применения функционалов невязки, основанных на спектральных свойствах корреляционных матриц, на примере реконструкции параметров модели верхних осадочных слоев

2.2.3. Релаксационно-итерационный метод оценки параметров слоев и исследование устойчивости решений к шумам при реконструкции донных осадочных слоев

2.2.4.Примеры использования метода последовательной релаксации при реконструкции параметров дна, состоящего из 3 жидких слоев, лежащих на жидком полупространстве

2.3. Сравнительный анализ робастности реконструкции параметров упругих донных слоев при использовании различных критериев минимизации

2.4. Выводы

Глава 3. Экспериментальная проверка метода когерентной реконструкции структуры морского дна

3.1. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном акустическом зондировании в лабораторном бассейне

3.1.1.Методы накопления акустических сигналов и подавления реверберационных помех и шумов

3.1.2.Оценка параметров модели морского дна в условиях физического моделирования

3.2. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном сейсмопрофилировании в акватории Каспийского моря

3.2.1.Структура сигналов, шумов и реверберационных помех при зондировании дна когерентным источником

3.2.2.Сейсмическое профилирование донных слоев при использовании когерентного межимпульсного накопления

3.3. Экспериментальная апробация реконструкции структуры морского дна при когерентном сейсмопрофилировании в мелководном районе Черного моря

3.3.1.Измерение АЧХ излучателя в морских условиях

3.3.2.Сейсмическое профилирование при использовании когерентного межимпульсного накопления и оценка параметров донных слоев

3.4. Выводы

Заключение

Список литературы

КАЛИНИНА Вера Игоревна

**РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ МОРСКОГО ДНА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОГЕРЕНТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ**

Автореферат

Подписано к печати 10.09.2019 г.
Формат 60×90 $^{1/16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 69(2019).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46