



Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

Ульянова ул., 46, Бокс-120, Нижний Новгород, 603950

Тел. (831) 436-62-02

Факс (831) 416-06-16

E-mail: dir@ipfran.ru

<http://www.ipfran.ru>

ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,

ИНН/ КПП 5260003387/526001001

Ученому секретарю
диссертационного совета
МГУ.013.6
д. ф.-м.н. Косаревой О.Г.

119991, г. Москва, ГСП-1,
Ленинские горы, д. 1, стр. 2

№ _____
от _____
На № _____

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.ф.-м.н., профессора Хилько Александра Ивановича
на диссертацию Шурупа Андрея Сергеевича
«МОДОВАЯ ТОМОГРАФИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД
С ПРИЛОЖЕНИЯМИ К ГИДРО- И СЕЙСМОАКУСТИКЕ»,
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика.

Диссертационная работа А.С. Шурупа посвящена акустической модовой томографии слоистых сред. Прежде всего, рассматривается восстановление характеристик водной толщи и дна океана, а также оценка параметров ледового покрова. Опираясь на современные результаты общей теории решения обратных задач рассеяния, автором получены, с одной стороны, новые научные результаты в рассматриваемой области, с другой стороны, предложены методики, допускающие более простую техническую реализацию и удешевление натурального томографического эксперимента.

В настоящее время, мониторинг состояния морской среды (водной толщи, ледового покрова, дна) является крайне актуальной задачей, решение которой требуется для адекватного планирования хозяйственно-экономической деятельности в условиях

наблюдаемых климатических изменений на Земле. Особенно ярко эти изменения проявляется в арктическом регионе, где Российская Федерация обладает наиболее протяженной шельфовой зоной. Таяние ледников, сокращение ледового покрова, увеличение метановых выбросов с дна – все это требует оперативного решения задач мониторинга происходящих процессов. Только методы низкочастотной сейсмогидроакустики дают информацию о пространственно-временной изменчивости океана в региональном масштабе в режиме, близкому к реальному времени. Исследование методов акустической томографии океана были начаты за рубежом В.Манком с коллегами с 70-ых годов прошлого столетия. В конце 1970-ых годов к аналогичным исследованиям подключились отечественные ученые под руководством А.В. Гапонова-Грехова. В 1989 – 1996 годах была предложена идея использовать для томографии океана волноводные моды, причем с точки зрения практической реализации использование маломодового режима излучения и приема оказалось более эффективным с энергетической точки зрения, чем многомодовое рассмотрение. Полученные в диссертации А.С.Шурупа результаты являются важным развитием имеющегося теоретического и практического задела по модовой томографии шельфовых морей, формируют теоретическую основу нового научного направления, связанного с решением задач модовой томографии слоистых сред на основе строгих математических методов с упрощенными требованиями на техническую реализацию томографического эксперимента.

Диссертация состоит из введения, трех содержательных частей, состоящих из 9 глав (3 главы в каждой части), основных результатов и выводов работы, списка публикаций автора, а также списка литературы. Общий объем диссертации составляет 328 страниц, включая 56 рисунков и 2 таблицы; список цитируемой литературы содержит 334 работы, включая 119 ссылок на работы автора.

Первая часть диссертации посвящена модовой томографии водной толщи океана. Показано, что использование дополнительных данных об углах горизонтальной рефракции мод позволяет реализовать томографическую схему восстановления неоднородностей скорости звука и течений в океане, слабочувствительную к неконтролируемому смещению антенн в горизонтальной плоскости. Эти результаты, в совокупности с разработанными ранее при участии автора алгоритмами обработки данных с искривленных антенн, не перекрывающих полностью океанический волновод, формируют теоретическую основу методов модовой томографии океана со сниженными требованиями на позиционирование вертикальных антенных комплексов. В первой части диссертации также получены пионерские результаты по пассивной модовой томографии, не требующей использования

контролируемых дорогостоящих низкочастотных излучателей. Впервые на основе обработки экспериментальных данных показана возможность выделения в пассивной схеме отдельных модовых сигналов из шумового поля, принимаемого двумя разнесенными в пространстве одиночными гидрофонами. Также показаны преимущества использования в пассивной томографии комбинированных приемных модулей, содержащих гидрофон и векторных приемник. В этом случае удастся получить информативные данные о временах распространения сигналов даже при наличии анизотропной шумовой помехи. Использование векторно-фазовых методов обработки сигналов и полей в задачах пассивной модовой томографии является весьма перспективным, а полученные в диссертации результаты являются основополагающими для этой области исследований.

Вторая часть диссертации посвящена сейсмоакустической модовой томографии слоистой среды вида «неоднородное дно – водный слой – ледовый покров», что характерно для арктического региона. Для восстановления параметров такой среды предложен оригинальный метод, основанный на так называемом полосчатом базисе, который был использован в первой части работы для восстановления характеристик водного слоя. Результаты обработки экспериментальных данных, зарегистрированных на льду Ладожского озера, показали возможности предложенного подхода для одновременного восстановления параметров рассматриваемой слоистой среды. Физической основой такого восстановления является выделение в регистрируемом поле отдельно низшей гидроакустической моды, изгибной моды ледовой пластины, а также фундаментальной моды волны рэлеевского типа, распространяющейся вдоль границы «водный слой – дно». Характер распространения этих мод определяется преимущественно параметрами отдельных слоев, что и позволяет восстановить значения этих параметров. Важным развитием рассматриваемого автором подхода восстановления слоистой геофизической среды является пассивная поверхностно-волновая томография по данным с донных сейсмометров. В диссертации получены важные, новые результаты в этой области при восстановлении характеристик дна океана в районе Гавайских островов на основе экспериментальных данных международного эксперимента PLUME.

Третья часть диссертации А.С.Шурупа посвящена математически строгим функционально-аналитическим методам модовой томографии. Дело в том, что подавляющее большинство методов решения задач акустической томографии являются приближенными, в том числе, и использованные в первой и второй частях диссертации. Как правило, рассматривается линейное приближение, подразумевающее линейную связь между возмущениями исходных данных (времен распространения сигналов, полных полей, углов

горизонтальной рефракции и пр.) и восстанавливаемыми возмущениями параметров среды (скорости звука, течения, поглощения и пр.). Такое приближение может и не выполняться на практике, что ограничивает область применения используемых подходов, требует привлечения итераций для уточнения результатов восстановления, а также априорной регуляризации. В третьей части работы для решения модовой томографической задачи используется так называемый функционально-аналитический алгоритм, изначально разработанный для уравнения Шредингера. Исследованиями возможностей и ограничений этого алгоритма в акустических приложениях занимаются в научной группе, где работает А.С.Шуруп, уже более 25 лет, в основном для медицинских приложений. Принципиально новым результатом, полученным А.С.Шурупом, является развитие этого подхода для решения задачи модовой томографии. В результате удалось получить волновое решение неадабатической модовой томографии океана, учитывающей взаимодействие мод без привлечения итераций и дополнительных процедур регуляризации. Также получен интересный результат совместного восстановления в широкополосном режиме не только скорости звука и течений, но и частотнозависящего поглощения, а также неоднородностей плотности среды. Эти результаты могут в перспективе представлять интерес для модовой томографии шельфовых морей, где неоднородности импеданса дна и поглощения в дне существенно влияют на распространение низкочастотного звука.

К основополагающим, наиболее важным результатам диссертационной работы можно отнести следующие:

1. Схема пассивной модовой томографии мелкого моря по данным с одиночных комбинированных модулей, содержащих приемник давления и векторный приемник. Важно, что этот результат нашел экспериментальное подтверждение по данным с Флоридского пролива и с гидроакустического полигона МГУ. Отказ от использования низкочастотных излучателей и вертикальных антенн существенно снижает стоимость и техническую сложность эксперимента. Это весьма важный результат. Однако нужно учитывать требования на время накопления шумового сигнала, которое не должно превышать характерных временных масштабов изменения параметров океанической среды.
2. Схема пассивной поверхностно-волновой томографии неоднородностей дна океана по данным с донных сейсмоприемников. В этом случае время накопления сейсмического шума, которое требуется для оценки времен распространений поверхностных волн и решения обратной задачи, может быть заметно меньше, чем время наблюдения за землетрясениями, сигналы от которых проходят через исследуемую область. Это

востребованное преимущество для сейсмоопасных районов, когда важна скорость принятия решений.

3. Схема неадиабатической модовой томографии океанической среды на основе волнового функционально-аналитического алгоритма решения обратной задачи. Учет взаимодействия мод при рассеянии на сильноконтрастных неоднородностях, например, на неоднородностях рельефа или интенсивных внутренних волнах, является важным шагом в направлении решения обратной задачи в этом случае, когда традиционные подходы могут не работать.

В целом, диссертационная работа А.С. Шурупа выполнена на высоком научном уровне и является последовательным, законченным научным трудом в актуальной области исследований. Рассмотрен обширный круг задач, представляющих теоретический и практический интерес для мониторинга шельфовых зон и акваторий глубокого океана, в том числе при наличии ледового покрова. Материалы диссертации широко представлены в научных рецензируемых журналах и апробированы на международных и российских конференциях. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Среди незначительных замечаний к работе можно отметить следующее:

1. Во второй части диссертации при обработке данных эксперимента PLUME не приведены результаты восстановления трехмерной неоднородности. Представлены лишь результаты реконструкции отдельно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Возможности восстановления трехмерных неоднородностей методами поверхностно-волновой томографии с помощью полосчатого базиса еще не исследованы?
2. В третьей части работы не приведены результаты совместного восстановления трехмерных неоднородностей скорости звука и течений, аналогично тем, что были восстановлены в первой части. Показаны лишь возможности функционально-аналитического алгоритма при восстановлении двумерных течений. Имеет смысл сравнить возможности «классических» методов модовой томографии из первой части и функционально-аналитических подходов, исследованных в последней части диссертации. Подобный сопоставительный анализ представляет бесспорный интерес.

Высказанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации и могут рассматриваться как возможные перспективы дальнейшей работы. Результаты диссертации актуальны, представляют не только теоретическое, но и практическое значение и могут быть

применены при разработке и реализации различных томографических схем, основанных на анализе модовой структуры сейсмогидроакустического поля.

Считаю, что диссертационная работа А.С. Шурупа «Модовая томография неоднородных сред с приложениями к гидро- и сейсмоакустике» соответствует специальности 1.3.7. «Акустика» и всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор — Шуруп Андрей Сергеевич — заслуживает присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.7. «Акустика».

Заведующий лабораторией акустических
методов в гидрофизике Института прикладной
физики имени А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук (ИПФ РАН)
доктор физико-математических наук, профессор

А.И. Хилько
09 июня 2023 г.

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
Телефон: +7 (831) 436-84-90
E-mail: a.khil@ipfran.ru

Подпись Хилько Александра Ивановича заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.

И.В. Корюкин