

О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора
Пересёлкова Сергея Алексеевича 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»

Акустические методы дистанционного зондирования акваторий мирового океана являются в настоящее время весьма востребованными, а для исследований Арктических регионов, покрытых льдом, попросту незаменимыми для осуществления оперативного мониторинга происходящих там процессов. Получаемая с помощью акустической томографии информация важна как для глобального прогнозирования климатических изменений на Земле, так и для решения задач регионального дистанционного зондирования, таких как освещение подводной обстановки окраинных морей, поиск углеводородов на Арктическом шельфе, исследований структуры литосферы в сейсмоопасных районах. Повсеместное использование методов акустической томографии океана ограничено, в первую очередь, высокой стоимостью проведения эксперимента и техническими сложностями ее практической реализации. В итоге, в настоящее время активно развиваются альтернативные методы исследования мирового океана, использующие сравнительно дешевые автономные ныряющие станции, позволяющие проводить контактные измерения параметров океана при их погружении с дальнейшей передачей собранной информации при всплытии на поверхность океана через каналы спутниковой связи. Однако, при наличии ледового покрова возможности контактных измерений сильно ограничены или даже невозможны. В настоящее время требуются новые методы исследования океанической среды, простые в реализации и сравнительно дешевые, позволяющие осуществлять дистанционный мониторинг процессов в водной толще, проводить исследования приповерхностных и глубинных структур дна океана, а также осуществлять мониторинг состояния ледового покрова. Последний аспект особенно важен в контексте наблюдаемого в настоящее время сокращения ледового покрова, что открывает возможности широкого использования Северного морского пути, делает этот регион более доступным для проведения геолого-разведочных и иных видов деятельности.

Диссертационная работа А.С. Шурупа посвящена теоретической разработке, численному анализу и экспериментальной апробации актуальных методов томографического восстановления физических параметров океанических волноводов типа «упругое дно – жидкий слой – ледовый покров». Физической основой развиваемых методов является пространственно-частотно-временной анализ модового состава гидро-сейсмоакустического поля, формируемого в рассматриваемой неоднородной среде.

Новизна практической реализации связана с привлечением комбинированных приемных модулей, позволяющих реализовать векторно-фазовые методы обработки сигналов и полей, что особенно актуально в низкочастотной области, наиболее перспективной для реализации пассивного мониторинга на естественных шумах. Среди используемых математических подходов к построению схем модовой томографии следует выделить применение строгих функционально-аналитических алгоритмов решения обратных задач рассеяния, позволяющих учесть взаимодействие мод при восстановлении параметров среды их распространения.

Диссертационная работа состоит из введения, девяти глав, разделенных на три содержательно связанные части, основных результатов и выводов, списка публикаций автора по теме диссертации и списка литературы. В каждой из трех частей диссертации излагаются теоретические аспекты различных методов акустической модовой томографии, а также обсуждаются перспективы их практического применения. Часть I (Главы 1–3) посвящена развитию методов томографии неоднородного движущегося океана. Применению методов акустической томографии для восстановления параметров дна океана по данным с одиночных донных сеймостанций, а также развитию этих методов на случай присутствия ледового покрова посвящена Часть II (Главы 4–6). Применению строгих методов функционального анализа для решения задач акустической томографии, а также впервые полученным результатам модельных исследований неадиабатической модовой томографии океана посвящена Часть III (Главы 7 – 9).

Среди основных новых научных результатов диссертации можно выделить следующие:

1. Впервые разработана и численно реализована схема модовой томографии скорости звука и течений в океане, слабочувствительная к неконтролируемым смещениям вертикальных антенн в горизонтальной плоскости.

2. В рамках применения шумовой интерферометрии в томографических задачах, разработан оригинальный метод оценки критических частот гидроакустических мод по данным о фазе функции взаимной корреляции шумов мелкого моря.
3. На основе обработки экспериментальных данных, измеренных во Флоридском проливе, впервые показана возможность выделения в пассивной схеме отдельных модовых сигналов из шумового поля, принимаемого двумя разнесенными в пространстве одиночными гидрофонами, на основе частотно-временного анализа функции корреляции шумов и специально разработанного алгоритма выделения из спектрограмм полного поля сигналов отдельных мод.
4. Впервые осуществлена экспериментальная реализация корреляционной обработки шумов с двух разнесенных в пространстве комбинированных приемных модулей, содержащих гидрофон и векторный приемник, позволяющая оценить времена распространений сигналов при наличии выраженной анизотропной помехи. Это оказывается возможным благодаря формированию кардиоидных характеристик направленностей в точках приема, позволяющих частично отстроиться от паразитной помехи, выделяя из регистрируемого шумового поля те направления, которые дают основной конструктивный вклад в шумовые корреляции (направления распространений шумов вдоль линии, соединяющей точки приема).
5. Разработана оригинальная схема сейсмоакустической томографии на волнах поверхностного типа с использованием полосчатого базиса, возможности которого при восстановлении трехмерных неоднородностей скорости звука и течений в океане продемонстрированы диссертации.
6. Впервые осуществлена экспериментальная реализация схемы пассивной поверхностно-волновой сейсмоакустической томографии дна океана в районе Гавайских островов по данным с донных сейсмоприемников.
7. Впервые численно реализована и исследована на помехоустойчивость и разрешающую способность томографическая процедура совместного восстановления скорости звука, поглощения и течений функционально-аналитическим алгоритмом Новикова – Агальцова.
8. Впервые выполнено численное моделирование модовой неадиабатической томографии мелкого моря, основанной на многоканальном варианте функционально-аналитического алгоритма, позволяющего учесть взаимодействие мод при решении обратной

задачи без использования итераций и дополнительных регуляризирующих алгоритмов.

В целом, диссертационная работа А.С. Шурупа представляет собой значимое научное исследование в актуальной для современной физики области. Получены новые научные результаты, которые найдут свое применение в модовой томографии неоднородных природных сред. Материалы диссертации достаточно полно представлены в научных рецензируемых журналах, прошли апробацию на международных и российских конференциях. Личный вклад автора в постановку задачи, получение результатов и их интерпретацию не вызывает сомнения. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Среди вопросов и замечаний к работе можно отметить следующее:

1. Практически все рассмотренные в диссертации ситуации относятся к достаточно низкому частотному диапазону - десятки герц. В исследовании остается открытым вопрос об эффективности предлагаемых соискателем подходов при повышении частотного диапазона до сотен герц и выше. Сохранится ли при этом возможность выделения отдельных модовых сигналов. Как известно, при повышении частоты звука модовая структура поля существенно уплотняется, и разделять моды становится крайне затруднительно.
2. Возможности выделения отдельных модовых сигналов из спектрограммы корреляционной функции шумов также должны иметь ограничения, связанные с гидрофизическими параметрами среды распространения. Например, в условиях слабой межмодовой дисперсии разделение мод вряд ли возможно с помощью одиночных гидрофонов даже на очень низких частотах. К сожалению, этому важному аспекту не уделено должного внимания в диссертации.
3. Как зависят результаты восстановления, получаемые с помощью математически строгих функционально-аналитических алгоритмов, от количества приемоизлучающих преобразователей на периметре исследуемой области? Этот вопрос детально в диссертации не обсуждается, но он во многом определяет возможности практического применения в задачах гидро- и сейсмоакустической томографии этих алгоритмов.
4. В предоставленной версии диссертации присутствует ряд опечаток, которые несколько затрудняют знакомство с материалом.

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Полученные пионерские и основополагающие результаты, научный уровень проведенных исследований и актуальность рассмотренных вопросов позволяют с уверенностью утверждать, что диссертационная работа А.С. Шурупа «Модовая томография неоднородных сред с приложениями к гидро- и сейсмоакустике» полностью 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 кафедрой математической физики и
информационных технологий физического факультета
Воронежского государственного университета
доктор физико-математических наук, профессор

С.А. Переселков
05 июня 2023 г.

394018, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1
Телефон: +7 (473) 220-87-48