

## О Т З Ы В

официального оппонента д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Петникова Валерия Георгиевича 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

В настоящее время мировой океан становится всё более важной сферой деятельности человека. Это естественная дорога от континента к континенту, — это богатейшая кладовая белков, органического и минерального сырья, это кухня погоды. В связи с этим всё большую практическую значимость приобретают акустические методы диагностики больших водных акваторий, ориентированные на оценки средних по трассе распространения звука характеристик среды на расстояниях в несколько сотен километров. При этом речь идет о методах, позволяющих получить такие характеристики, изменяющиеся со временем, не прибегая к многочисленным контактным способам измерений *in situ*, которые обычно практически не реализуемы в натурном эксперименте. Диссертационная работа А.С. Шурупа посвящена развитию физических основ подобных методов, объединенных под общим названием акустической томографии морской среды.

Здесь следует подчеркнуть, что классическая схема для томографического восстановления параметров акустического волновода океанического типа была предложена и апробирована уже давно (См., например, [Munk W.H., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large-scale monitoring // Deep-Sea Res. A. 1979. V.26(2) P.123-161]. Однако эта классическая схема обладает целым рядом недостатков. К ним, во-первых, относятся технические сложности её реализации, связанные с применением специальных автономных источников звука и позиционированием приемных антенн. Во-вторых, они связаны с общетеоретическими ограничениями использующихся в этой схеме методов. Указанные методы являются в большинстве своем приближенными (как правило, используют линейное приближение и регуляризующие алгоритмы, а уточнение результатов восстановления осуществляют итерационно), что накладывает в общем случае ограничения на область их применения. В связи с этим актуальным являются предложенные и развитые в рассматриваемой диссертации способы акустической томографии, позволяющие, с одной стороны, получить достаточно строгое решение обратной задачи, а с другой — снизить технические требования на её

реализацию в натурном эксперименте.

К наиболее важным и пионерским результатам, полученным в диссертационной работе, следует отнести:

1. Схему томографического восстановления трехмерных скалярно-векторных неоднородностей (течений и вариаций скорости звука) в океане, основанную на использовании вертикальных антенн с приемниками градиента давления и компасами. Существенно, что предложенная схема включает алгоритм определения неизвестных смещений антенн в горизонтальной плоскости. Это, в свою очередь, позволило повысить точность определения среднего по горизонтали вертикального профиля скорости звука в океане.
2. Предложенный диссертантом вариант пассивной модовой томографии по данным с одиночных донных гидрофонов. Впервые продемонстрирована принципиальная возможность выделения составляющей взаимной корреляционной функции шумового поля, отвечающей отдельным волноводным модам, за времена, когда нестационарность среды еще не очень заметна. При этом следует подчеркнуть, что апробация оригинальной методики пассивной модовой томографии с одиночными гидрофонами была осуществлена на основе экспериментальных данных, полученных во Флоридском проливе.
3. Вариант сейсмоакустической томографии, основанный на измерениях времени распространения поверхностных волн рэлеевского типа на границе вода – дно, с использованием базисов полосчатого типа. Фактически этот вариант представляет собой развитие разработанной автором методики диагностики водной среды для определения параметров морского дна, что имеет важное практическое значение для мелководных акваторий, включая арктический шельф России.
4. Демонстрацию в рамках натурного эксперимента возможностей совместного восстановления характеристик дна, водной толщи и ледового покрова. В эксперименте были задействованы пять сейсмоакустических приемников, закрепленных на сплошном стационарном ледовом покрове по периметру исследуемой акватории с характерным поперечным размером  $\approx 400$  м и глубиной до 20 м.
5. Разработку физических основ решения задач модовой томографии неоднородных движущихся сред на основе функционально-аналитического алгоритма Новикова – Агальцова, учитывающего взаимодействие мод. Такой учет взаимодействия при акустической томографии океана никогда прежде не рассматривался.

В целом, диссертационная работа А.С. Шурупа представляет собой серьёзное и глубокое научное исследование в актуальной для современной акустики океана области. Её результаты найдут широкое применение при акустическом мониторинге шельфовых зон мирового океана, приобретающем в настоящее время особое значение. Материалы диссертации широко представлены в научных рецензируемых журналах и апробированы на международных и российских конференциях. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Диссертационная работа имеет и некоторые недостатки:

1. Для всех развитых в работе методик акустической томографии характерны одни и те же общие недостатки:
  - 1.1. Не конкретизированы физические модели возмущений морской среды и, соответственно, не указаны возможные диапазоны для параметров скалярно-векторных неоднородностей, подлежащих восстановлению тем или иным акусто-томографическим методом. Следовало бы уделить большее внимание таким моделям, диктующим схему и геометрию расстановки излучателей и приемников звука в исследуемой акватории.
  - 1.2. Не указаны возможные ошибки при восстановлении параметров неоднородностей, обусловленные присутствием фоновых шумов, всегда присутствующих в натуральных гидроакустических экспериментах. Отметим, что учет указанных шумов позволяет сформулировать и требования к технике морского физического эксперимента.
2. На рис. 3.6 диссертации и на аналогичном рисунке ба автореферата присутствует область значений спектрограммы, относящейся к скорости звука, превышающей скорость звука в воде. Эта область относится к звуковому полю, состоящему из вытекающих из волновода и сильно затухающих мод. Использование подобных полей для пассивной акустической томографии, требующей разнесения приемных гидрофонов на расстояния около 10 км и более, практически невозможно. Это обстоятельство должным образом не отражено в диссертационной работе.
3. В тексте диссертации содержится ряд опечаток:
  - 3.1. На стр. 78 диссертации присутствуют ссылки на несуществующую формулу (5). По-видимому, здесь следовало бы привести ссылки на формулу (3.1).

3.2. В подписи к рис. 3 автореферата не конкретизировано изображение на рис 3б и 3в.

Высказанные замечания не снижают достоинства работы. По научному уровню проведенных исследований, актуальности исследуемых вопросов и ценности полученных результатов 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».

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
главный научный сотрудник лаборатории гидрофизики  
Научного центра волновых исследований Института  
общей физики имени А.М. Прохорова Российской  
академии наук (НЦВИ ИОФ РАН)  
10 июня 2023 г.

В.Г. Петников

119991, г. Москва, ГСП-1, ул. Вавилова, д. 38  
Телефон: +7 (499) 503-87-77 (доб. 3-84)  
E-mail: petniko@kapella.gpi.ru

Подпись Петникова Валерия Георгиевича заверяю:

ВРИО директора Научного центра волновых исследований  
Института общей физики имени А.М. Прохорова  
Российской академии наук (НЦВИ ИОФ РАН)



М.Л. Лямшев