

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию

«ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В МЕЛКОМ МОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДОВЫХ
ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ»,

представленную Тыщенко Андреем Геннадьевичем

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.7 – Акустика

Диссертационная работа Андрея Геннадьевича Тыщенко посвящена развитию метода математического моделирования распространения звука в мелком море путем численного решения широкоугольных модовых параболических уравнений, а также созданию на этой основе нового вычислительного инструмента – комплекса прикладных программ. Данный инструмент применен для решения ряда модельных задач акустики мелкого моря. Результаты моделирования не только демонстрируют широкие возможности разработанного метода, но представляют и самостоятельный интерес. Особенно интересен вывод о высокой точности адиабатического приближения при описании распространения звука вдоль изобат клиновидного дна подводного волновода. Примеры использования разработанного комплекса программ для решения актуальных прикладных задач представлены данными моделирования широкополосных шумовых сигналов, вызванных (i) прохождением судна и (ii) проведением сейсморазведочных работ на шельфе о-ва Сахалин.

Различные варианты широкоугольных модовых параболических уравнений для моделирования волновых полей в сложных подводных звуковых каналах ранее предлагались в работах сотрудников лаборатории, где работает соискатель, в частности, в публикациях научного руководителя А.Г. Тыщенко. Основной целью рассматриваемой диссертации стала разработка эффективного подхода для решения таких уравнений, пригодного для использования в практических задачах, связанных с моделированием широкополосных звуковых сигналов в трехмерных геоакустических волноводах мелкого моря, с учетом данных о рельефе дна, строении донных слоев и поля скорости звука в водном слое. Для достижения цели было необходимо решить ряд задач, таких как

– представление точечного источника в рамках данной модели;

- искусственное ограничение расчетной области без существенного повышения вычислительных затрат (с тем, чтобы отраженные от границ области волны не нарушали структуру решения внутри нее);
- построение адекватной модели волновода в рамках расчетной программы путем эффективной организации хранения и ввода в программу батиметрических и гидрологических данных для рассматриваемой задачи.

Кроме того, поставленная цель требовала выполнения всестороннего тестирования разработанной модели на ряде примеров, для которых имеются аналитические и численно-аналитические решения, позволяющие оценить адекватность результатов расчетов.

Актуальность диссертационной работы связана с бурным развитием как методов моделирования акустических полей в океане, так и расширением областей их применения. Это подтверждается значительным числом публикаций по данной тематике в отечественных и международных акустических журналах (русском Акустическом журнале, *Journal of the Acoustical Society of America*, *Journal of Sound and Vibration* и др.). К числу наиболее употребительных программ относятся, например, RAMs, разработанный Майклом Коллинзом (США) и Bellhop, разработанный и поддерживаемый Майклом Портером (США). Следует отметить, однако, что набор этих инструментов достаточно ограничен, и, насколько можно судить по публикациям в периодических научных изданиях, ни один из существовавших ранее программных продуктов не позволял в общем случае осуществлять моделирование широкополосных сигналов с учетом трехмерного характера распространения звука и возможностью непосредственного использования данных опорных измерений. Создание математической модели, имеющей такие возможности, стало результатом работы исследований, выполненных А.Г. Тыщенко при подготовке рассматриваемой диссертации.

Первая глава работы посвящена краткому описанию предметной области и некоторого множества задач акустики океана, в которых моделирование трехмерных звуковых полей играет немаловажную роль. Также в этой главе приводится краткое описание методов моделирования распространения звука, представленных в литературе на текущий момент.

Вторая глава диссертации А.Г. Тыщенко посвящена описанию математических методов, использованных в работе. Приводится математическая постановка задачи моделирования распространения звука в заданной области, вводятся основные понятия,

связанные с модовым разложением акустического поля, приводится вывод широкоугольного модового параболического уравнения. Результатом работы соискателя в данной главе является новый численный метод для решения широкоугольных модовых параболических уравнений, включающий в себя лучевые начальные условия (т.н. стартер), а также метод искусственного ограничения вычислительной области, основанный на использовании граничных условий прозрачности, полученных непосредственно автором диссертации. В этой главе также представлен алгоритм вычисления временного ряда импульса акустического сигнала, уровней звукового воздействия (SEL) и колебательных ускорений в звуковом поле. Отметим, что хотя теоретически пересчет давления в колебательные скорости и ускорения является совершенно элементарной процедурой, на практике соответствующие расчеты осложняются необходимостью, с одной стороны, использовать численное дифференцирование решения, но, с другой стороны, сохранять результаты расчетов на относительно грубой сетке, чтобы она могла разместиться в памяти компьютера (по этой причине расчет колебательных скоростей/ускорений обычно не предусмотрен в существующих моделях, в т.ч. упомянутых выше). В рамках используемого в работе подхода эту операцию можно выполнить численно-аналитически, благодаря модовому представлению поля.

В **третьей главе** приводится описание программной реализации метода решения модовых параболических уравнений с учетом реальных данных о батиметрии, гидрологии и строении донных слоев в рассматриваемой области, а также с возможностью учета данных опорных измерений акустических сигналов для определения спектра источника звука. Большая часть данной главы посвящена тестированию разработанного комплекса программ на задачах, для которых имеются эталонные решения, полученные другими методами. В частности, рассматривается распространение звука в клиновидном прибрежном волноводе, включая вычисление акустического поля на отдельных частотах, расчет временного ряда импульсного сигнала, трассировку горизонтальных лучей и т.д. При этом автором диссертации было сделано важное наблюдение о том, что при ориентации трассы перпендикулярно градиенту глубины (т.е. вдоль изобаты) распространение звука полностью описывается в рамках адиабатического приближения, и учет взаимодействия мод не требуется.

В **четвертой главе** диссертации автор приводит описание решения двух практических задач моделирования уровней антропогенных акустических шумов. В первой части главы рассматривается моделирование акустического поля, формируемого в

мелком море при прохождении одиночного грузового судна. Разработанные автором методы и алгоритмы здесь применены для моделирования распространения широкополосных сигналов на реальных данных в сложных океанических волноводах. При этом предложен метод оценки неизвестных *a priori* параметров дна в рассматриваемом районе по данным о распределении энергии сигнала по частотам в ближайшей к измерительной станции точке траектории судна. Во второй части четвертой главы рассмотрено моделирование сейсморазведочных импульсов и проведены расчеты уровней звукового воздействия для всей рассматриваемой акватории. Здесь также выполнены расчеты временных рядов, представляющих импульсные сигналы в тех точках, для которых имеются данные натурных измерений. Результаты расчетов показали хорошее качественное и количественное согласие моделирования и экспериментальных наблюдений. Они продемонстрировали работоспособность разработанной А.Г. Тыщенко модели распространения звука в мелком море для оценки уровней антропогенных акустических шумов, воздействующих на морскую фауну.

По содержанию работы можно сделать следующие замечания:

- 1) Поскольку метод расчета поля, развиваемый в диссертации, является приближенным, принципиальное значение имеет оценка границ его применимости. В третьей главе на конкретных примерах продемонстрировано, что расчеты полей с помощью данного метода дают примерно такие же результаты, как и расчеты, выполненные известными аналитическими или численными методами. Однако вопрос о границах применимости требует более детального исследования. В конечном итоге должны быть выработаны общие рекомендации, позволяющие пользователю оценить возможность применения созданного пакета программ для решения своей конкретной задачи.
- 2) На стр. 133 высказано интересное соображение о том, что хотя модель подводного волновода, полученная подгонкой ее параметров для согласования данных натурных измерений и численного расчета, может заметно отличаться от реального волновода, ее во многих случаях можно использовать для прогноза реальных потерь при распространении. Это предположение было бы неплохо подтвердить данными численного моделирования.
- 3) На стр. 48 указаны два варианта аналитического задания начального поля, приведенные в монографии [88]. Однако здесь почему-то не упомянут вариант синтеза начального поля из модовых функций, который тоже предлагается в [88] (там он называется *modal starter*) и в ряде случаев оказывается более эффективным.

Приведенные замечания несколько не снижают общей высокой оценки результатов соискателя, тем более что первые два из них, в сущности, являются пожеланиями на будущее.

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование. Его основные результаты в полной мере отражены в шести печатных работах А.Г. Тыщенко, в том числе двух статьях в Journal of the Acoustical Society of America, одной – в Journal of Sound and Vibration и еще двух – в «Акустическом журнале» (в трех из них А.Г. Тыщенко является первым автором, что, по-видимому, отражает его решающий вклад в подготовку этих работ). Автореферат работы адекватно передает ее содержание.

Диссертационная работа Тыщенко Андрея Геннадьевича полностью соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Согласен на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации.

Официальный оппонент:

заведующий Лабораторией статистических методов в акустике океана,
доктор физико-математических наук, доцент

18.07.2025



А.Л. Вировлянский

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

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46.

Телефон: +7(831)4164784

Электронная почта: viro@ipfran.ru.

Докторская диссертация по специальности: 01.04.06 – акустика

Подпись А.Л. Вировлянского заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН

кандидат физико-математических наук



И.В. Корюкин