

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

университета ИТМО

д.т.н., профессор

Цыкифоров В.О.

2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» на диссертационную работу

Тыщенко Андрея Геннадьевича

«Численное моделирование распространения широкополосных акустических сигналов в мелком море с использованием модовых параболических уравнений»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.7. - Акустика

Моделирование распространения звука в океане является достаточно сложной практической задачей, важной, в частности, для таких приложений как мониторинг антропогенных акустических шумов и исследование их воздействия на морскую фауну, акустическая навигация, обеспечение акустической безопасности акваторий, а также дистанционное зондирование морской среды. Как показали недавние исследования, в такого рода задачах немаловажную роль играет учёт трёхмерных неоднородностей среды, в которой распространяется звук. Диссертационная работа Тыщенко А.Г. посвящена разработке метода численного моделирования распространения звука в сложных трёхмерных океанических волноводах, основанного на теории модовых параболических уравнений. Результатом работы является конкретный метод расчета акустических полей, а также основанный на этом методе программный продукт, позволяющий вычислять поле акустического давления, модовые функции и соответствующие им горизонтальный волновые числа, временной ряд импульсного сигнала в произвольных точках приёма, поле колебательного ускорения, а также выполнять трассировку горизонтальных лучей, соответствующих вертикальным модам. Важной частью работы также являются детальные исследования применимости данного метода, выполненные как с привлечением тестовых решений, полученных другими способами, так и путем сравнения с результатами натурных измерений в задачах мониторинга антропогенных акустических шумов.

Диссертация Тыщенко А.Г. состоит из введения, четырёх содержательных глав, заключения и списка литературы, общим объемом 160 страниц, включая 38 рисунков и 11 таблиц. Список цитируемой литературы составляют 153 наименований на 21 страницах текста.

Во Введении автор обосновывает актуальность исследуемой темы и ее значимость для подводной акустики, формулирует цели и задачи исследования, представляет положения, выносимые на защиту. Также во введении отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, степень достоверности и апробации результатов.

Первая глава носит ознакомительный характер, в ней описываются задачи, в которых применяется численное моделирование распространения звука в мелком море, такие как оценка влияния антропогенных акустических сигналов и акустическая навигация. Приводится краткий обзор существующих программных продуктов, предназначенных для решения задачи расчета звуковых полей. В конце главы автор формулирует требования к разрабатываемой модели распространения звука и её программной реализации, такие как эффективность проводимых вычислений и поддерживаемый функционал.

Во Второй главе подробно описываются математические методы, использованные в работе. Приводится математическая постановка задачи моделирования распространения звука в мелком море, подробно описывается вывод широкоугольных модовых параболических уравнений. Большая часть главы посвящена разработке численных методов решения данных уравнений, включающих аппроксимацию операторного квадратного корня с использованием аппроксимации Паде, граничные условия прозрачности (впервые разработанные автором специально для используемых им уравнений), а также лучевые начальные условия (для задачи Коши в полупространстве), адекватно моделирующие поле точечного источника звука.

В Третьей главе приводится описание программной реализации метода расчета поля из предыдущей главы, а также валидация на модельных тестовых задачах. Первая часть главы служит своего рода инструкцией по использованию разработанного продукта, в которой описаны структура входных и выходных данных, позволяющих сформировать адекватную модель геоакустического волновода мелкого моря (с учётом рельефа дна, гидрологии и строения донных слоев), возможности программы и параметры конфигурации. Корректность работы программы проверяется на четырёх модельных примерах. В первую очередь проводится моделирование распространения звука в регулярном волноводе, для которого сравнения проводится с аналитическим решением. Дополнительно автор исследует влияние порядка аппроксимации Паде на точность решения. Следующим рассматривается задача о распространении звука в волноводе мелкого моря с подводным каньоном, для которого приводится сравнение с методом виртуальных источников. В качестве третьего эксперимента приводится распространения звука в клиновидном волноводе, в рамках которого проводится валидация всех возможностей разработанной программы: вычисление поля акустического давления и колебательного ускорения, временного ряда импульсного сигнала в точках приёма, трассировка горизонтальных лучей. В качестве последней задачи рассматривается волновод с реалистичной батиметрией и профилем скорости звука в воде. По результатам валидации автор делает вывод, что разработанный метод и основанный на нём программный продукт позволяют выполнять моделирование распространения звука в сложных неоднородных океанических волноводах.

Четвёртая глава посвящена использованию разработанной программы в реальных задачах моделирования антропогенных акустических шумов с целью оценки их воздействия на морскую фауну. В первой части главы рассматривается моделирование акустического поля одиночного судна. Проводится сравнение распределения акустической энергии по децидадным полосам, полученное в результате моделирования, с данными натурных измерений. Приводится подробное описание методики уточнения геоакустических параметров морского дна, основанной на байесовской оптимизации, необходимого для улучшения точности моделирования. В качестве следующей задачи во второй части главы рассматривается моделирование уровней звукового воздействия, связанных с проведением сейсморазведочных работ. Результаты моделирования сравниваются как с натурными данными, так и с решением, полученным с использованием узкоугольного параболического уравнения. Исходя из результатов сравнений, автор делает вывод о необходимости учёта трёхмерных неоднородностей среды в прикладных задачах.

В Заключение приведены основные результаты выполненного в диссертационной работе исследования.

Отметим наиболее значимые результаты Тыщенко А.Г.:

1. Разработан и протестирован метод численного решения модовых параболических уравнений с искусственным ограничением области.
2. Создан высокопроизводительный программный комплекс на C++ для моделирования распространения акустических сигналов с учётом характеристик морской среды.

Работа не лишена недостатков. В качестве замечаний стоит отметить следующее:

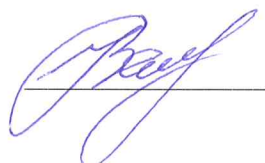
1. В диссертации отсутствует сравнение точности и вычислительной эффективности предлагаемого метода с другими подходами, такими как метод изображений или метод трёхмерных параболических уравнений. Такой анализ желателен для оценки достоинств разработанного подхода.
2. В разделе 4.1 представлены расчёты шума одиночного судна основанный на предварительной оптимизации параметров среды по данным мониторинга. Возникают сомнения в универсальности метода: неочевидно, насколько корректно он будет работать при варьировании маршрута судна, без повторной настройки параметров.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической значимости диссертации. Работа представляет собой законченное научное исследование. Результаты диссертационной работы в полной мере отражены в публикациях автора, написанных в соавторстве с коллегами, а автореферат диссертации соответствует содержанию работы. Основные результаты работы опубликованы в ведущих российских и международных журналах по акустике, в частности, в *Journal of the Acoustical Society of America*, *Journal of Sound and Vibration* и в «Акустическом журнале». Исследования, описанные в диссертации Тыщенко А.Г. соответствуют пп. 1 (математическая теория распространения упругих волн в жидкостях), 8 (гидроакустика), 9 (акустические шумы) паспорта специальности 1.3.7 – Акустика.

Диссертация Тыщенко А.Г. «Численное моделирование распространения широкополосных акустических сигналов в мелком море с использованием модовых параболических уравнений» является научно-квалифицированной работой, в которой предложен научно обоснованный метод моделирования распространения звука в сложных трёхмерных океанических волноводах, а также проводится всесторонняя валидация разработанного на его основе комплекса программ. Работа соответствует всем требованиям п. 24 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (в редакции от 25.01.2024), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Диссертационная работа и отзыв на диссертационную работу обсуждены и одобрены на семинаре физического факультета Университета ИТМО.

Декан физического факультета
Университета ИТМО, к.ф.-м.н.

 / Мельчакова И.В.

Отзыв составил:

в.н.с., доцент физического факультета
Университета ИТМО, к.ф.-м.н.

 / Петров М.И.

Сведения о составителе отзыва:

Петров Михаил Игоревич, ведущий научный сотрудник, доцент физического факультета Университета ИТМО, кандидат физико-математических наук
Контактные данные: trisha.petrov@gmail.com, +7(921) 978-11-31

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО, НИУ ИТМО, ИТМО)

Почтовый (фактический) адрес организации: Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Телефон: +7(812) 480-00-00

Адрес электронной почты: od@itmo.ru

Web-сайт организации: <https://itmo.ru/>

Подпись
удостоверяю
Менеджер ОПС
Виноградова А.Д.

