

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **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**

Актуальность темы исследования. Работа посвящена вопросам численного моделирования распространения широкополосных акустических сигналов в мелком море с использованием модовых параболических уравнений. Данная тематика приобретает особую актуальность в связи с ростом хозяйственной активности человека в прибрежных зонах и необходимостью снижения негативного влияния антропогенных шумов на морскую экологию. Среди основных проблем можно выделить рост антропогенных шумов: судоходство, нефтегазовая промышленность и другие виды человеческой деятельности создают значительное акустическое загрязнение, влияющее на обитателей моря. Проблемы мониторинга: прямые измерения уровня акустического загрязнения затруднены из-за сложности и стоимости организации масштабных сетей гидроакустических регистраторов. Необходимость точного моделирования для предварительной оценки воздействий становится приоритетной задачей. Требования отрасли: современная практика нуждается в инструментах быстрого и надежного моделирования, позволяющих эффективно оценивать уровни звукового воздействия и контролировать распределение акустической энергии в водных бассейнах. Недостаточная эффективность существующих подходов: большинство из разработанных методов требует значительных ресурсов или подходит лишь для узкого круга задач.

С данной научной проблематикой связана и тема «Численное моделирование распространения широкополосных акустических сигналов в мелком море с использованием модовых параболических уравнений» диссертации Тыщенко А.Г., целью которой стала разработка эффективного

метода и программного комплекса для численного моделирования распространения широкополосных акустических сигналов в мелком море с использованием модовых параболических уравнений, обеспечивающего высокое качество и быстроту расчетов для широкого класса практических задач.

Обоснованность, достоверность и надежность научных положений и выводов. Научные положения и выводы основываются на глубоких исследованиях в области численного моделирования акустических явлений в трехмерных волноводах мелкого моря. Основной акцент сделан на развитие и проверку новых методик и алгоритмов, направленных на повышение точности и производительности расчетов акустических полей. Основные научные положения включают применение модовых параболических уравнений с высокоугловой апертурой для повышения точности описания акустических процессов; создание и внедрение граничных условий прозрачности, исключающих артефакты, вызванные искусственными ограничениями расчетной области; применение метода аппроксимации Паде для численного решения параболических уравнений, что повышает эффективность расчётов и снижает вычислительные ресурсы. Обоснованность положений, выносимых на защиту, подкреплена подробным описанием математических методов, детальным изложением этапов разработки программного комплекса и разносторонней валидацией предлагаемых подходов.

Достоверность и надежность научных выводов обеспечивается эмпирической проверкой посредством сравнения результатов моделирования с аналитическими решениями и экспериментальными данными, тестированием на модельных задачах, а также использованием апробированных методов и подходов, таких как методы аппроксимации Паде и краевые условия прозрачности, доказавшие свою эффективность в аналогичных задачах подводной акустики.

Результаты диссертации были опубликованы в 10 работах, 5 из которых – в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, а также неоднократно представлены на международных и российских конференциях. Научная ценность полученных результатов подтверждается уровнем изданий (ведущие журналы в области акустики: Акустический журнал, Journal of the Acoustical Society of America, Journal of Sound and Vibration), в которых они опубликованы и количеством цитирования работ автора (более 60 цитирований по данным РИНЦ).

Научная новизна и практическая значимость работы. Полученные Тыщенко А.Г. в диссертации результаты являются новыми. Разработан новый алгоритм численного решения модовых параболических уравнений с граничными условиями прозрачности и лучевыми стартерами, повышающими точность и скорость моделирования. Создан новый программный комплекс на языке C++, реализующий предложенный алгоритм и позволяющий эффективно моделировать распространение акустических сигналов в трехмерных волноводах мелкого моря. Впервые осуществлены расчеты акустических полей, вызванных прохождением одиночного судна, с учетом реального рельефа дна и сложной гидродинамики в трёхмерной постановке.

Практическая значимость полученных результатов не вызывает сомнений. Разработанный в диссертации метод и созданный автором программный комплекс решают актуальные задачи современной подводной акустики, позволяя быстро и точно рассчитывать акустические поля для широкого спектра сценариев распространения звука; повышать качество мониторинга акустических загрязнений, обеспечивая надежную предварительную оценку акустических воздействий; сокращать затраты на проектирование и эксплуатацию инфраструктуры, необходимой для охраны окружающей среды.

Содержание и характеристика работы. Диссертация Тыщенко А.Г. состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитированной

литературы (153 наименования). Диссертация изложена на 160 страницах, включая 38 рисунков и 11 таблиц.

Во *введении* обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, определены объекты и предметы изучения, перечислены научно-практические задачи, поставленные перед исследователем, и раскрыты предпосылки появления необходимости в новом подходе к моделированию акустических полей в мелком море. Сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту, представлен личный вклад автора в диссертационную работу, приведены данные об апробации результатов работы, публикациях, объеме и структуре работы.

Первая глава посвящена обзору состояния вопроса в области моделирования акустических полей в водной среде, подробному формулированию целей и задач исследования, выявлению проблем и недостатков существующих методов, а также определению путей их устранения.

Во *второй главе* подробно рассматриваются теоретические основы численного моделирования распространения акустических сигналов в трехмерных волноводах мелкого моря. Приведен анализ известных подходов, выделены преимущества и недостатки каждого из них, предложен оригинальный метод численного решения модовых параболических уравнений. Использовался широкий набор методов: широкоугольные модовые параболические уравнения, позволяющие точнее описать распространение звука в трехмерных волноводах мелкого моря; метод аппроксимации Паде для численного решения уравнений, снижающий вычислительные затраты и увеличивающий точность; специальные начальные условия («лучевые стартеры»), построенные на основе лучевой теории распространения звука, повышающие точность и снижающие численный шум; краевые условия прозрачности, предотвращающие появление паразитных отражений и искажений; программная реализация на языке C++ с поддержкой

многопоточных вычислений и оптимизацией кода; анализ акустических полей, включая расчет временных рядов сигналов, энергических характеристик и колебательных ускорений.

Третья глава посвящена созданию и проверке программного комплекса AMPLE, реализующего предложенный во второй главе метод численного решения модовых параболических уравнений. Подробно описаны структура программы, процедуры ввода-вывода данных, настройка вычислительных параметров и способы визуализации результатов. Особое внимание уделено процедурам проверки правильности функционирования комплекса на модельных задачах, подтверждающих эффективность предложенного подхода. Рассмотрено также практическое применение программы для анализа реальных акустических ситуаций, включая изучение распространения акустических сигналов от транспортных судов и сейсморазведочных установок.

Четвёртая глава посвящена практике применения разработанного метода и программного комплекса для решения реальных задач оценки акустических воздействий антропогенных источников, таких как судоходство и сейсморазведка. В ней детально рассматриваются конкретные примеры моделирования акустических полей, сопровождающих движение транспортного судна и распространение сейсморазведочных импульсов.

Подробно освещены результаты проведенных расчетов, подтверждающие способность разработанного метода обеспечивать высокую точность оценки акустических воздействий. Исследованы реальные ситуации, включая учет сложного рельефа дна и неравномерных гидродинамических условий. Продемонстрировано преимущество предложенного подхода по сравнению с существующими методами и аналитическими решениями, подтверждая его ценность для практики и природоохранных мероприятий.

В *заключении* подведены итоги проведенного исследования, сформулированы основные научные и практические результаты, подчеркнута

значимость полученных выводов для дальнейшего развития фундаментальных исследований и практической деятельности в области подводной акустики.

Важными достоинствами работы являются ясность, последовательность и четкость изложения. Тематика работы, объекты и методы исследования, а также полученные результаты соответствуют специальности 1.3.7 – Акустика.

Замечания. Следует отметить и некоторые недостатки работы.

1. Разработанный метод использует математический аппарат, исключаящий межмодовое взаимодействие (формула (24)) с формулировкой (с. 26): «Во многих классах задач этим взаимодействием можно пренебречь». Следует сразу и более четко (далее на с. 83 есть краткое обсуждение на примере клиновидного волновода) очертить эти классы задач, чтобы потенциальный пользователь программного комплекса мог иметь определенные критерии его применимости.
2. Для корректной оценки ресурсоемкости методов недостаточно одного указания времени расчета, обязательно требуется указание вычислительных мощностей. Так, во вводном разделе используются формулировки вида с. 16: «известно, что использование современного высокоточного подхода, основанного на трёхмерных параболических уравнениях, требует 20 часов», с. 19: «решение таких уравнений требует запредельных затрат памяти и времени, вычисление решения даже самых простых задач занимает не менее суток», также как и при представлении результатов нового алгоритма, с. 76: «Время, затраченное на проведение вычислений, отображено в Таблице 9», с. 80: «время вычисления составило 22.791 с» и далее. Очевидно, что сравнивать затраченное время можно только при нормировке на вычислительные ресурсы.
3. Рисунки 1-3 имеют разный масштаб по равнозначным осям x и y , что не даёт возможности быстро оценить результат для квазисферических фронтов, которые даже для аналитического решения выглядят искажёнными.

4. Сравнение в третьей главе результатов разных методов расчёта, особенно полученных при высоких порядках аппроксимации Паде, в виде представления набора независимых распределений или в виде наложения (хотя это, безусловно, лучше) не всегда позволяет удобно оценить степень совпадения или расхождения данных, тем более если речь идет о высокой степени соответствия. Так, например, при сравнении результатов расчета поля в волноводе мелкого моря с подводным каньоном делается вывод о том, что (с. 80) «решения достаточно сильно совпадают». Полезно было бы привести разностные картины (друг с другом, либо с эталонным полем), чтобы явно был виден уровень ошибки в разных областях.
5. В тексте работы присутствует незначительное количество опечаток («безпозвоночных» на с. 18, «с обоих сторон» на с. 75, «между ... её возможность_ аппроксимировать» на с. 115 и др.) и неточностей («плотность звука» на с. 15 лучше указывать как плотность звуковой энергии). Используется разный формат указания источников в списке литературы: в 41 цитировании из 153 авторы указаны после названия, в остальной части - наоборот.

Следует отметить, что перечисленные выше замечания, часть из которых носит характер пожеланий, не снижают общей положительной оценки диссертации.

Заключение. На основании вышеизложенного считаю, что диссертация «Численное моделирование распространения широкополосных акустических сигналов в мелком море с использованием модовых параболических уравнений» является завершенной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Таким образом, соискатель Тыщенко Андрей Геннадьевич

заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Согласен на обработку персональных данных, связанную с защитой диссертации.

18 августа 2025 года



Цысарь Сергей Алексеевич,
кандидат физико-математических наук
по специальности 01.04.06 Акустика,
доцент кафедры нанофотоники
физического факультета Московского
государственного университета
имени М.В. Ломоносова,
официальный оппонент

119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1, стр. 2
тел.: +7(495)939-29-52, моб. +7(916) 844-71-19;
e-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru

И.о. декана
физического факультета МГУ
профессор



В.В. Белокуров