

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Вировлянского Анатолия Львовича
на диссертацию **Петрова Павла Сергеевича,**
«Математическое моделирование горизонтальной рефракции звука в
трехмерных волноводах мелкого моря»,
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.04.06 – Акустика

Диссертация П.С. Петрова посвящена развитию методов аналитического и численного расчета волновых полей в трехмерных моделях подводных звуковых каналах (ПЗК) в мелком море.

Актуальность данного диссертационного исследования обусловлена тем обстоятельством, что такие методы необходимы для решения многочисленных фундаментальных и прикладных задач, связанных с освоением Мирового океана и изучением физических процессов в морской среде. К ним относятся задачи акустического мониторинга температурных полей океана, акустической навигации и подводной связи, зондирования дна, локализации источника, шумовой интерферометрии и другие.

К настоящему времени развито немало точных и быстродействующих алгоритмов расчета полей тональных и импульсных источников звука в двумерных моделях ПЗК. Однако прямое применение в трехмерной среде подходов, хорошо зарекомендовавших себя при решении двумерных задач, как правило, приводит к многократному увеличению объема вычислений. Это, например, имеет место для метода широкогольного параболического уравнения. Даже при использовании мощных современных компьютеров он оказывается эффективным лишь в случае низких частот и коротких дистанций.

Как правило, методы 3D моделирования оказываются эффективными, когда для «разгрузки» компьютера удается успешно применить упрощающие

приближения. Допустимые приближения каждый раз определяются спецификой конкретной задачи.

В диссертации развит ряд таких методов, предназначенных в первую очередь для анализа звуковых волн в мелком море с неоднородным дном. Значительного сокращения вычислений автору удается добиться путем использования адиабатического приближения, синтеза методов нормальных волн и широкоугольного параболического уравнения, применения метода канонического оператора Малова для коррекции геометрооптических формул, а также введения моделей неоднородного дна, допускающих аналитическое описание.

Диссертация П.С. Петрова состоит из Введения, шести глав и Заключения.

Во **Введении** обоснована актуальность рассматриваемых задач. Здесь дан краткий, но достаточно полный, обзор основных результатов, полученных к настоящему времени в нашей стране и за рубежом по развитию методов описания горизонтальной рефракции волн в ПЗК. Во Введении сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава имеет вспомогательный характер. В ней приведены необходимые для дальнейшего основные уравнения, описывающие звуковые поля. Здесь также сформулированы начальные и граничные условия, необходимые для корректной постановки рассматриваемых далее задач. Наряду с известными сведениями из теории волн в первой главе содержится несколько новых результатов. В первую очередь это вязкоупругое волновое уравнение, позволяющее учесть частотную зависимость поглощения в дне, а также внесенные автором уточнения в метод отображений для описания поля в волноводе с клиновидным дном.

Вторая глава диссертации посвящена развитию и тестированию нового метода моделирования распространения звуковых импульсов в подводных

волноводах. Его идея заключается в уточнении предсказаний обычной геометрической оптики с помощью асимптотических формул, полученных с использованием канонического оператора Маслова. В рамках развитого формализма автору удалось получить асимптотическое описание звукового поля, применимое не только в регулярных точках среды, но и на каустиках. Этот подход позволяет решать задачи приближенного описания полей импульсных источников звука на длинных трассах в неоднородных трехмерных моделях среды (на дистанциях в сотни и даже тысячи км), которые принципиально неразрешимы путем прямого численного моделирования. Ценность этого результата несколько снижается тем фактом, что он получен для волновода с идеально отражающими границами (абсолютно мягкими или абсолютно жесткими). Тем не менее, возможность относительно простого расчета пространственно-временных структур звуковых полей на столь длинных трассах представляет значительный интерес даже в случае сильно идеализированной модели среды. Этот подход может служить эффективным инструментом для тестирования методов решения обратных задач, связанных с локализацией источника звука и акустическим мониторингом вариаций параметров среды на протяженных акваториях.

В третьей главе рассматривается модовое описание поля в мелководном ПЗК с неровным дном. Здесь выяснены условия, при которых звуковое поле благодаря горизонтальной рефракции обладает модовой структурой не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости. В качестве отправной точки взят один из традиционных методов описания горизонтальной рефракции в ПЗК, известный под названием «вертикальные моды – горизонтальные лучи». Рассмотрено обобщение этого подхода, в рамках которого горизонтальная рефракция фактически описывается двумерными уравнения Гельмгольца для амплитуд мод, являющихся функциями горизонтальных координат. Основное внимание уделено анализу двух частных случаев, когда такие уравнения допускают аналитические

решения. Первым из них является волновод с неоднородностью дна в виде каньона однородного вдоль одной из горизонтальных координат. В этом примере звуковое поле фокусируется над каньоном и в горизонтальной плоскости образуется эффективный волновод. Для «горизонтальных» мод в адиабатическом приближении удается получить явные аналитические выражения, кардинально упрощающие как расчет поля, так и анализ характерных особенностей его структуры.

Другим примером является каньон круговой формы (изобаты представляют собой концентрические окружности). Показано, что звуковое поле в каньоне формируется так называемыми модами шепчущей галереи. В приближении ВКБ построено аналитическое описание таких мод. Развитый подход дает возможность приближенного аналитического описания волн, локализованных вблизи криволинейных изобат. Сформулированы критерии образования волн шепчущей галереи в местах, где рельеф дна имеет чашеобразную форму, и исследована интерференционная структура таких волн. Поскольку подобные особенности рельефа дна типичны для многих акваторий, полученные результаты представляют значительный практический интерес.

Четвертая глава посвящена вопросам аналитического и численного решения параболических уравнений, которые называются модовыми параболическими уравнениями (МПУ), описывающими зависимости амплитуд мод от горизонтальных координат. Основным результатом этой главы является построение аналитических решений МПУ в узкоугольном приближении. Формальное сходство между узкоугольным МПУ и уравнением Шредингера позволило применить используемые для решения последнего методы теории групп и алгебр Ли. С их помощью удалось найти целый класс трехмерных моделей с неровным дном, допускающих аналитическое описание.

В той же главе предложен и протестирован метод численного решения МПУ в широкоугольном приближении в трехмерных мелководных волноводах с неровным дном. Этот метод позволяет выполнять расчеты звуковых полей значительно быстрее, чем с помощью обычных трехмерных параболических уравнений. Ведь с точки зрения вычислений переход к МПУ фактически понижает размерность задачи.

В **пятой главе** представлен оригинальный метод получения широкоугольных параболических уравнений в двумерной и трехмерной средах. В отличие от традиционного вывода параболических уравнений на основе факторизации уравнения Гельмгольца и разложения операторного квадратного корня данный подход базируется на применении метода многих масштабов. При этом получается система параболических уравнений, так называемых итеративных параболических уравнений, которые следует решать одно за другим. В данной главе подробно описан вывод самих этих уравнений, а также соответствующих граничных и начальных условий. Здесь обсуждаются вопросы о математической корректности построенного описания, об асимптотическом выполнении закона сохранения в полученных решениях, об использовании данного метода для описания распространения мод. Подробно описана численная схема реализации предложенного подхода и обоснована ее устойчивость. Эффективность применения схемы для анализа пространственных структур полей в мелком море продемонстрирована на численных примерах.

Заключительная **шестая глава** посвящена применению разработанных автором численных методов для интерпретации данных натурного эксперимента, выполненного в Японском море на трассе длиной около 137 км. Звук распространялся вдоль кромки шельфа. Целью эксперимента была отработка методики оценки расстояния до источника звука по данным измерений. Расчеты пространственно-временной структуры звукового поля на трассе выполнялись с использованием методов широкоугольного

параболического уравнения, нормальных мод и геометрической акустики. Основным результатом численного моделирования и аналитических оценок стала демонстрация того обстоятельства, что учет горизонтальной рефракции позволяет повысить точность решения рассмотренной обратной задачи.

Перечисленные выше результаты диссертации находятся в полном соответствии с положениями, вынесенными на защиту, и фактически раскрывают содержание этих положений. Все результаты получены на основе известных и многократно апробированных подходов, используемых ведущими отечественными и зарубежными специалистами для анализа и расчета волновых полей. Значительное внимание в диссертации уделено обоснованию предлагаемых методов расчета полей и их тестированию на примере точно решаемых задач, а также сопоставлению полученных результатов с данными расчетов, выполненных альтернативными методами. Результаты диссертации апробированы на многочисленных российских и международных конференциях по теории волн и подводной акустике и опубликованы в ведущих отечественных и международных журналах по данной тематике.

Все это позволяет сделать вывод о том, что все защищаемые положения диссертации являются в достаточной степени обоснованными.

Относительно содержания диссертации Петрова П.С. можно сделать следующие замечания.

- 1) Для получения простого аналитического описания зависимостей амплитуд мод от горизонтальных координат в диссертации широко используется адиабатическое приближение. На конкретных примерах, допускающих решение другими методами, показано, что в случае плавных пространственных неоднородностей дна пренебрежение взаимодействием мод является допустимым. Однако для использования развитых в диссертации методов при решении других

задач желательно иметь общие, и по возможности универсальные, критерии применимости этого приближения.

- 2) В главе 2 описан метод, дающий уникальную возможность быстрого расчета импульсных сигналов на трассах практически произвольной длины, как в регулярных точках трехмерного волновода, так и на каустиках. К сожалению, этот результат получен лишь для ПЗК с абсолютно отражающим дном. Было бы интересно обсудить, какие из предсказаний этого метода, могут оставаться в силе и для более реалистичных моделей дна.
- 3) В главе 5 описаны системы итеративных параболических уравнений, полученных на основе метода многих масштабов. Этот способ расчета 3D полей представляет альтернативу традиционному методу широкоугольных параболических уравнений. В диссертации не хватает детального сопоставления слабых и сильных сторон двух подходов и областей их применимости.

Несмотря на эти замечания, считаю, что в диссертации П.С. Петрова разработан ряд важных методов 3D моделирования звуковых полей на трехмерном шельфе, которые могут иметь важные применения при решении фундаментальных и прикладных задач акустики океана.

Данная диссертация является законченным научным исследованием, которое соответствует всем критериям, установленным требованиями «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.06 – Акустика.

Автореферат правильно передает содержание диссертации.

Официальный оппонент,

зав. лаб. ИПФ РАН,

доктор физ.-мат. наук



А.Л. Вировлянский

Подпись А.Л. Вировлянского заверяю:

ученый секретарь ИПФ РАН

доктор физ.-мат. наук



И.В. Корюкин

19.05.2021