

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
экспертной комиссии
диссертационного совета Д005.017.01
по рассмотрению диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук
Петрова Павла Сергеевича
«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РЕФРАКЦИИ ЗВУКА
В ТРЁХМЕРНЫХ ВОЛНОВОДАХ МЕЛКОГО МОРЯ»
от 11.02.2021

Работа посвящена разработке эффективных схем численного решения задач распространения звука в условиях мелкого моря с 3D (трехмерной) нерегулярной батиметрией (неоднородным рельефом дна) на основе теоретического анализа модельных примеров и, главным образом, на основе приближенных методов параболического уравнения и геометрической оптики (акустики), широко используемых при математическом моделировании в акустике океана.

В процессе исследований в диссертации:

1. **Выведено** (в соавторстве) новое волновое уравнение для акустического давления, которое адекватно описывает распространение звуковых сигналов при наличии доминирующего вязкого механизма поглощения волновой энергии в донных осадках. Данное "вязкоупругое" волновое уравнение **представляет** определенный **теоретический интерес** в плане исследования задач волновой акустики непосредственно во временной области.
2. **Предложены** корректировки и дополнения к известному решению задачи распространения звука в 3D- клиновидном волноводе с проницаемым дном, **и разработана** вычислительная процедура для нахождения этого решения. Данное решение для трехмерного клина является важным тестовым примером при проверке работы программ численного моделирования, в основу которых положены приближенные методы геометрической акустики и параболического уравнения.
3. **Разработана и апробирована методика** моделирования распространения импульсных сигналов в мелком море с идеальными границами, основанная на лучевой теории распространения звука и **новых асимптотических формулах** для расчета временных рядов в регулярных и фокальных точках.
4. На физическом уровне строгости **теоретически и численно** исследовано распространение звука в модельных волноводах мелкого моря с **подводным каньоном**, а также с участками дна, имеющими **чашеобразную форму**. Показано, что в этих случаях в горизонтальной плоскости **может возникать модовая структура** акустического поля, изучены особенности и условия ее формирования. В частности, установлено, что для волновода мелкого моря с изобатами, имеющими форму дуг концентрических

окружностей, при определенных условиях **может наблюдаться явление**, сходное с распространением волн "шепчущей галереи", известное в архитектурной акустике. Рассмотренные модельные примеры **представляют интерес в фундаментальном плане** для понимания сути явления "горизонтальной рефракции", исследованию которого посвящена диссертационная работа, а также важны с точки зрения тестирования программ численного моделирования.

5. В рамках модовых параболических уравнений **получены** приближенные аналитические решения задач распространения звука в мелком море, где рельеф дна описывается **параболической квадратичной функцией**. Эти и другие известные из научной литературы аналитические решения использованы для качественного и количественного описания структуры звукового поля в клиновидном прибрежном волноводе и волноводе мелкого моря с подводным хребтом. **Разработана методика** численного моделирования распространения звука в трехмерных волноводах мелкого моря, основанная на получении приближенного уравнения горизонтальной рефракции и его численном решении с помощью псевдодифференциальных и широкоугольных модовых параболических уравнений (в горизонтальной плоскости).

6. **Разработан и апробирован новый метод** расчета акустических полей в волноводах мелкого моря, основанный на численном решении итеративных параболических уравнений с граничными условиями прозрачности. Данный метод позволяет учитывать наклон границы раздела сред без использования ступенчатой аппроксимации, которая ранее была широко распространена в научной литературе и приводила к ошибкам описания. Доказана корректность начально-краевых задач для итеративных параболических уравнений, а также безусловная устойчивость разработанной схемы численного решения.

7. На практическом примере с использованием данных экспериментальных измерений в мелком море **предложена оценка** возможного влияния горизонтальной рефракции низкочастотного звука на протяженных трассах, ориентированных поперек наклона дна, на точность решения прикладных задач акустической дальномерии. **Рассмотрен** вклад горизонтальной рефракции в дисперсию импульсных сигналов. **Показано**, что при определенных условиях на морском шельфе, когда влияние других гидрофизических процессов на распространение звуковых сигналов мало, фактор наличия горизонтальной рефракции звука может приводить к заметным поправкам при определении дальности до объекта.

Теоретическая значимость диссертации состоит в том, что в ней описан ряд новых физических эффектов, представляющих собой частные проявления горизонтальной рефракции звука в мелком море. К числу этих эффектов относятся: формирование шепчущей галереи в окрестности искривленной изобаты в мелком море, изменение характера выпуклости волновых фронтов при распространении звука над гребнем подводного хребта, а также действие горизонтальной рефракции как дополнительного механизма увеличения длительности модальных компонент импульсного сигнала.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в том, что в нем предложены две новых методики расчета звуковых полей в трехмерных волноводах мелкого моря общего вида (с произвольным рельефом дна и полем скорости звука в водном слое). В основе одной из них лежит численное решение широкоугольных и псевдодифференциальных модовых параболических уравнений. Вторая методика основана на обобщении лучевой теории распространения звука во временной области. Эта теория дополнена асимптотическими выражениями для расчета поля в фокальных точках.

Личный вклад соискателя в представленных исследованиях составляет от 20% до 60%. Доля автора диссертации в статьях в соавторстве составляет от 20% до 50%. Диссертация написана по результатам исследований, выполнявшихся в ТОИ ДВО РАН, ИПМех РАН, а также зарубежных институтах и университетах Германии, Франции, Израиля в период с 2009 по 2019 гг.: гранты Минобрнауки РФ в рамках проектов МК-4323.2015.5 и МК-2262.2017.5 (“Гранты Президента”), гранты РФФИ в рамках проектов 16-31-00442 мол_а, 16-05-01074 а, 18-05-00057 а, 18-35-20081мол_а_вед. Исследования соискателя, выполнявшиеся совместно с иностранными коллегами, в разные годы получали поддержку DAAD (Германия), Campus France (Франция), Университета Хайфы (Израиль) по результатам соответствующих конкурсов.

Публикаций по работе формально достаточно (24 статьи в рецензируемых журналах и 11 статей в сборниках трудов конференций). **Уровень публикаций** высокий, если судить по рейтингу научных журналов, в которых опубликованы работы.

Паспорту специальности «Акустика» – 01.04.06 диссертационного совета представленная работа соответствует по областям исследования:

- акустика мелкого моря
- распространение и дифракция акустических полей и сигналов

На основании вышеизложенного экспертная комиссия **рекомендует** диссертационному совету принять диссертацию Петрова П. С. «Математическое моделирование горизонтальной рефракции звука в трёхмерных волноводах мелкого моря» к защите.

Председатель комиссии



О.Э. Гулин

Члены комиссии



Б.А. Касаткин



В.П. Дзюба