

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН»



член-корреспондент РАН

С.В. Гарнов

57 » апреля 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу 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

Всестороннее изучение Мирового океана в последние годы перешло в новую стадию: предпринимаются настойчивые попытки изучения физических эффектов, обусловленных трехмерным характером распространения звука в мелководных акваториях. В основе совокупности этих эффектов, описание которых выходит за рамки двумерной модели океанического волновода, лежит *горизонтальная рефракция звука*, под которой понимается искривление линий, вдоль которых акустическая энергия распространяется в горизонтальных направлениях. Горизонтальная рефракция может быть обусловлена как неоднородностями скорости звука, так и неровностями рельефа дна, второй фактор наиболее типичен для мелководных акваторий.

Одним из важных проявлений горизонтальной рефракции является образование зон фокусировки (каустики) и акустической тени, формирующихся в горизонтальной плоскости в различных направлениях от источника. С данными явлениями постоянно приходится считаться во многих областях акустики океана. Например, при сейсморазведке, мониторинге антропогенных акустических шумов, подводной навигации и связи, оценке возможностей дальнего зондирования, разработке методов моделирования распространения звука и т.д. Решение практических задач, осложнённых трехмерными эффектами распространения, требует всестороннего исследования этих эффектов как в теоретическом, так и в экспериментальном аспектах. В этой связи многостороннее теоретическое описание П.С. Петровым механизма горизонтальной рефракции звука на

неоднородностях батиметрии в мелком море, позволяющим учитывать реальную океаническую обстановку, представляется весьма актуальным.

В диссертации П.С. Петрова изложены физико-математические принципы горизонтальной рефракции звука в мелком море и выполнен сравнительный анализ аналитических решений модельных задач; разработаны и апробированы новые методы моделирования горизонтальной рефракции в реалистических трехмерных океанических волноводах.

Диссертационная работа П.С. Петрова состоит из введения, шести содержательных глав и заключения общим объемом 347 страниц. Список цитируемой литературы составляет 256 наименований.

Во введении обоснован выбор научного направления исследований, показана актуальность решаемых проблем, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор современных методов расчета звукового поля в подводной акустике. Рассмотрены волновое уравнение, уравнение Гельмгольца и система динамических уравнений теории упругости. Сформулированы начальные и краевые условия для этих уравнений. В качестве примера приведено решение уравнения Гельмгольца в клиновидном прибрежном волноводе с проницаемым дном.

Во второй главе разработан и апробирован новый метод моделирования трехмерных звуковых полей, основанный на лучевой теории. Асимптотическое решение строится с использованием модифицированного канонического оператора Маслова. В рамках изложенного формализма получено решение как для регулярной, так и для фокальной точки семейства лучей. Предложенный метод применим только в случае начально-краевых задач для волнового уравнения с условиями Дирихле или Неймана. Приведены результаты расчета распространения импульсных сигналов для акустической трассы в прибрежном клине, ориентированной параллельно ребру клина. На основе теории инвариантов Вестона дана интерпретация геометрии лучей.

В третьей главе приведены основные понятия модовой теории описания акустических полей в трехмерных океанических волноводах. Изложен вывод уравнения горизонтальной рефракции, когда перераспределением энергии между модами можно пренебречь. Рассмотрена лучевая теория решения уравнения горизонтальной рефракции, в рамках которой вводится понятие горизонтального луча и устанавливается связь между горизонтальными лучами и проекциями лучевых траекторий трехмерного уравнения Гельмгольца. На примере двух моделей мелководных волноводов проиллюстрированы

аналитические решения уравнения горизонтальной рефракции. В первом примере представлен волновод с неоднородностью в виде подводного каньона, в котором горизонтальная рефракция проявляется как фокусировка энергии волнового поля над каньоном, а распространение в горизонтальной плоскости является волноводным. Горизонтальные моды описываются гипергеометрическими функциями. Во втором примере рассмотрен волновод с изобатами, имеющими форму дуг концентрических окружностей. В этом случае горизонтальная рефракция обуславливает возникновение волн шепчущей галереи. Построена ВКБ-теория этих волн.

В четвертой главе приведен вывод узкоугольного модового параболического уравнения и с использованием теоретико-групповых методов, основанных на теории алгебры Ли и теоремы Вея-Нормана, построены аналитические решения задачи распространения звука в клине и вдоль гребня подводного хребта. Сравнительный анализ результатов расчета с результатами, полученными с применением метода виртуальных источников, демонстрирует качественное и количественное сходство. Описана методика расчета полей в трехмерных волноводах с неоднородностями рельефа дна, основанная на численном решении широкоугольных модовых параболических уравнений, выведены граничные условия прозрачности. В адиабатическом приближении разработан универсальный метод расчета волновых полей в волноводах с трехмерными неоднородностями дна, основанный на численном решении псевдодифференциальных модовых параболических уравнений. В качестве примера рассмотрена задача о волнах шепчущей галереи, распространяющихся вдоль криволинейной изобаты.

В пятой главе построена теория итеративных параболических уравнений, основанная на методе многомасштабных разложений, и описаны граничные и интерфейсные условия. Обобщено граничное условие прозрачности Баскакова–Попова для уравнения Шредингера на систему итеративных параболических уравнений. Изложен алгоритм решения системы итеративных параболических уравнений с граничным условием прозрачности и доказана его безусловная устойчивость. Выполнены численные эксперименты на предмет проверки точности расчетов волновых полей с использованием разработанного алгоритма.

В шестой главе рассмотрено проявление горизонтальной рефракции при распространении низкочастотного звука вдоль трассы, ориентированной поперек наклона дна в мелком море. Описан натуральный эксперимент, выполненный в Японском море, где трасса протяженностью около 137 км была ориентирована приблизительно вдоль кромки шельфа. Проанализированы импульсные характеристики принимаемых сигналов и оценены их эффективные скорости распространения, соответствующие усредненной по

трассе групповой скорости первой моды. С использованием широкоугольных параболических уравнений промоделирована модовая структура поля. Приведена методика расчета эффективной скорости, основанная на информации о профиле дна вдоль трассы и данных о гидрологических условиях. Использование этой методики приводит к ошибке определения дальности примерно 65 м. При учете горизонтальной рефракции, приводящей к увеличению расстояния, проходимого лучом соответствующей моды, ошибка позиционирования составила 31 м.

В заключение дана общая характеристика полученных результатов и оценен их вклад в развитие методов моделирования распространения звука в мелком море с трехмерными неоднородностями рельефа дна.

Отметим наиболее значимые на наш взгляд научные результаты Петрова П.С.:

1. Предложено обобщение лучевого метода моделирования распространения импульсных сигналов в мелководных волноводах с неоднородной батиметрией и идеальными границами, позволяющее выполнять расчеты волнового поля как в регулярных, так и в фокальных точках семейства лучей.

2. Для двух моделей мелкого моря с чашеобразным дном и подводным каньоном установлены достаточные условия, при которых горизонтальная рефракция определяет модовую структуру поля в горизонтальной плоскости и локализует энергию в окрестности семейства изобат, определяющих неоднородности батиметрии. В обоих случаях проведен качественный и количественный анализ интерференционной картины, формируемой горизонтальными модами.

3. В адиабатическом приближении построены аналитические решения задач распространения звука в мелководных акваториях с трехмерными неоднородностями батиметрии, описываемыми квадратичными параметрическими функциями. На примере волновода с подводным хребтом выполнен качественный анализ интерференционной картины в горизонтальной плоскости.

4. В адиабатическом приближении разработана и апробирована на основе решения тестовых задач новая методика моделирования полей в трехмерных нерегулярных мелководных волноводах, основанная на численном решении псевдодифференциальных модовых параболических уравнений. Методика позволяет выполнять расчеты полей с существенно более высокой скоростью, чем при использовании трехмерных параболических уравнений.

5. Предложен и теоретически обоснован новый метод расчета волновых полей в мелком море, основанный на численном решении итеративных параболических уравнений с граничными условиями прозрачности. Доказана корректность начально-краевых задач

для этих уравнений, а также безусловная устойчивость разработанной численной схемы их решения.

Научная значимость работы состоит в том, что в ней описаны новые физические эффекты, обусловленные горизонтальной рефракцией звука. К ним относятся: формирование шепчущей галереи в окрестности искривленной изобаты, изменение формы выпуклости волновых фронтов волн, распространяющихся над гребнем подводного хребта, увеличение длительности модальных составляющих импульсного сигнала. Результаты исследований значительно расширяют спектр трехмерных задач акустики мелкого моря, для которых получены приближенные аналитические решения.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что в ней предложены две новые методики расчета полей в трехмерных мелководных акваториях. В основе первой из них лежит численное решение широкоугольных и псевдодифференциальных модовых параболических уравнений. Вторая методика основана на обобщении лучевой теории распространения звука, дополненной асимптотическими выражениями расчета поля в фокальных точках во временной области. Эти методики могут быть реализованы для решения различных практических задач, где требуется моделирование полей на обширных акваториях.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, научных положений и выводов обусловлены хорошим согласием между результатами численного моделирования, аналитическими расчетами и данными натурного эксперимента. Работы П.С. Петрова широко представлены в научных рецензируемых журналах и апробированы на международных и российских конференциях.

Результаты диссертационной работы Петрова П.С. могут быть использованы в учреждениях, связанных с исследованиями по подводной акустике, например, в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН; Институте прикладной физики РАН; ФГУП Акустическом Институте им. Н.Н. Андреева; Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН; Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН; Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова; С.-Петербургском государственном морском техническом университете; Воронежском государственном университете.

Работа не лишена недостатков. В качестве замечаний отметим следующее.

1. Для оценки практических возможностей обсуждаемых в диссертации новых методов моделирования полей в трехмерных волноводах мелкого моря следовало бы попытаться учесть погрешности, возникающие из-за неточности модели среды.

2. Не отражено влияние горизонтальной рефракции на формирование интерференционной картины в пространственно-частотной области при излучении широкополосных акустических сигналов.

3. Не представлены методы моделирования распространения звука в трехмерных мелководных волноводах с учетом рассеяния акустических волн на случайных неровностях дна. Работа приобрела бы еще большую практическую ценность, если в ней были бы представлены данные исследования.

4. В работе мало внимания уделено сравнению результатов расчетов с известными экспериментальными данными. Фактически это сделано только при оценках влияния горизонтальной рефракции на точность решения задач акустической дальнометрии. Однако и здесь можно отметить, что регистрация в эксперименте группы из нескольких сигналов (см. рис. 6.3б) вместо одного ожидаемого сигнала первой моды (см. рис. 6.3а) не получила должного объяснения.

5. Горизонтальная рефракция звука приводит как к увеличению расстояния, проходимого модовым лучом в горизонтальной плоскости, так и к изменению его групповой скорости. Учитывалось ли изменение групповой скорости при оценке ошибки дальности трассы в натурном эксперименте с поправкой на горизонтальную рефракцию?

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической значимости диссертации. Основные результаты получены впервые, а работа представляет собой законченное научное исследование. Результаты диссертационной работы в полной мере отражены в публикациях автора с коллегами, а автореферат диссертации соответствует содержанию работы.

Диссертация Петрова Павла Сергеевича «Математическое моделирование горизонтальной рефракции звука в трехмерных волноводах мелкого моря» является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные численные методы решения трехмерных волновых задач в мелководных акваториях, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие информационных технологий в области акустики мелкого моря. Это соответствует требованиям п. 24 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Диссертация заслушана и обсуждена на семинаре Научного центра волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова

Российской академии наук» (филиал) (НЦВИ ИОФ РАН) 07.10.2020 г. Отзыв на диссертацию Петрова П.С. рассмотрен и принят на заседании Ученого совета НЦВИ ИОФ РАН (Протокол № 1 от 31.03.2021 г.)

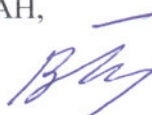
Отзыв составили:

главный научный сотрудник НЦВИ ИОФ РАН,
доктор физико-математических наук
119991 ГСП-1 Москва, ул. Вавилова 38
тел.: 8-916-558-5496; e-mail: kumiov@yandex.ru

Кузькин Венедикт Михайлович

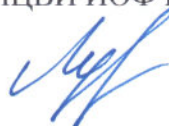


главный научный сотрудник НЦВИ ИОФ РАН,
доктор физико-математических наук
119991 ГСП-1 Москва, ул. Вавилова 38
тел.: 8-499-503-8777 доб. 3-84; e-mail: petniko@kapella.gpi.ru



Петников Валерий Георгиевич

заведующий лабораторией гидрофизики НЦВИ ИОФ РАН,
кандидат физико-математических наук
119991 ГСП-1 Москва, ул. Вавилова 38
тел.: 8-499-503-8777 доб. 3-84; e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru



Луньков Андрей Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, ул. Вавилова 38

Оф. сайт: www.gpi.ru; тел.: 8-499-503-8734; e-mail: office@gpi.ru