

ОТЗЫВ

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 Петрова П.С. посвящена разработке эффективных подходов для решения задач распространения звука в условиях мелкого моря с нерегулярной батиметрией. Тематика диссертационного исследования может быть отнесена к области теоретической и вычислительной акустики океана, которая интенсивно развивается в последние десятилетия. В работе разрабатываются новые численные методы решения задач расчета звуковых полей в волноводах с произвольной формой рельефа дна и профилем скорости звука в водном слое на основе теоретического анализа разных модельных случаев.

Диссертационное исследование Петрова П.С. является актуальным. Это определяется тем, что в последние годы акцент исследований в гидроакустике сместился с задач, связанных с распространением звука в глубоком океане, на задачи акустики мелкого моря (или шельфа). Известно, что в мелком море именно неоднородности рельефа дна являются основным фактором, определяющим структуру звукового поля, поэтому решаемые в диссертации Петрова П.С. задачи имеют огромное значение для многих современных приложений подводной акустики, в частности, для мониторинга акустических шумов, организации систем дальней акустической навигации. С другой стороны, на рубеже двадцатого и двадцать первого веков в вычислительной акустике океана сформировалось новое магистральное направление исследований, которое можно условно обозначить как разработка методов моделирования трехмерных звуковых полей. В рамках этого направления параллельно развивается несколько классов методов и диссертация Петрова П.С. вносит вклад в развитие методов из нескольких классов, поэтому работа может рассматриваться как вклад в развитие этого направления в целом.

Диссертация Петрова П.С. состоит из введения, шести глав и заключения.

Первая глава содержит математическую постановку трехмерных задач акустики океана в наиболее общем виде, как в стационарном, так и в нестационарном случае. В нестационарном случае они имеют вид начально-краевых задач для волнового уравнения с локализованной правой частью (соответствующей точечному источнику звука). Используя принцип

наследственности Больцмана, получивший математическое развитие в работах Вольтерра), диссертант приводит вывод вязкоупругого волнового уравнения для акустического давления. Его использование важно для акустики мелкого моря в случае, когда коэффициент уменьшения амплитуды поля при распространении звука на одну длину волны не является постоянным для некоторой полосы частот. В диссертации Петрова П.С. показано, как стандартное волновое уравнение заменить вязкоупругим волновым уравнением с интегральным оператором сверточного типа. В работе также предложена простейшая схема для решения вязкоупругого волнового уравнения.

По материалу главы возникает естественный вопрос с точки зрения эффективности выполнения вычислений для полученного уравнения при применении в трехмерном случае при решении прикладных трехмерных задач акустики мелкого моря.

Методом мнимых источников воспроизведен вывод решения задачи распространения звука в 3D клиновидном волноводе с проницаемым дном. В диссертации предложены дополнения к известному решению и разработана вычислительная процедура для нахождения соответствующих квадратур. Данное решение для клина является важным тестовым примером при проверке работы программ численного моделирования на основе приближенных методов геометрической акустики и параболического уравнения.

Во второй главе диссертации Петрова П.С. разработана и апробирована методика моделирования распространения импульсных сигналов в мелком море, основанная на лучевой теории распространения звука и модифицированных асимптотических формулах. Данная модификация основана на использовании асимптотических формул С.Ю. Доброхотова и В.Е. Назайкинского для решения волнового уравнения с локализованной правой частью. Эти формулы дают представление решения начально-краевой задачи для волнового уравнения в терминах канонического оператора Маслова, что позволяет получить ответ в явном виде как для регулярных, так и для фокальных точек. В диссертации показано, что в случае точечного источника звука эти формулы можно записать во временной области. Этот результат является новым и интересным с точки зрения анализа решения волнового поля без использования преобразования Фурье. Полученные асимптотические формулы для решения волнового уравнения использованы для решения задачи о распространении звука в прибрежном клине.

Критические замечания по главе связаны с тем, что нет никаких сравнений с ранее известными результатами, представленными в работах, например, Ю.А. Кравцова, в которых были получены равномерные асимптотики для описания звуковых полей в особых областях. Следует указать также на погрешности при изложении результатов. Например, на стр. 88-89 автор пишет о временном и пространственном интервалах, для которых

выполнен расчет, однако, параметры импульса в (2.16) представлены без указания размерного масштаба.

Третья глава диссертации начинается с введения основных понятий модовой теории распространения звука в нерегулярных волноводах мелкого моря. Автор подробно рассматривает вывод связанных уравнений горизонтальной рефракции для амплитуд взаимодействующих мод. Далее отмечается, что большая часть результатов в этой и последующих главах работы получена с использованием адиабатического приближения, которое позволяет опустить в уравнениях горизонтальной рефракции члены, описывающие взаимодействие мод.

Далее в этой главе Петров П.С. переходит к изложению собственных результатов, которые можно охарактеризовать как исследование двух задач с типичными для мелкого моря неоднородностями рельефа дна, в которых решения уравнений горизонтальной рефракции могут быть получены методом разделения переменных, причем звуковое поле в горизонтальной плоскости обнаруживает модовую структуру.

В первой задаче рассматривается распространение звука в мелком море с подводным каньоном. В этом случае переменные в уравнении горизонтальной рефракции разделяются, причем решения в поперечном к оси каньона направлении находятся в терминах гипергеометрических функций.

В следующей задаче рассматривается участок мелкого моря с чашеобразным рельефом дна. Диссертантом показано, что в таком случае при определенных условиях в акустическом поле формируются радиальные моды, локализованные в окрестности криволинейных изобат и аналогичные по своим свойствам модам шепчущей галереи. Следует отметить, что в данном случае шепчущая галерея формируется не из-за многократных отражений волн от криволинейной границы, а вследствие горизонтальной рефракции на чашеобразном дне. В диссертации подробно исследованы свойства горизонтальных мод шепчущей галереи данного типа.

Критическое замечание связано с формулировкой диссертантом ограничений, при которых горизонтальная рефракция приводит к эффектам, указанным в диссертации. Поскольку диссертация представлена по акустике, то автору желательно было бы выбрать соответствующую терминологию для изложения, а не ограничивать себя чисто математической фразой, что «установлены достаточные условия».

Четвертая глава диссертации посвящена получению уравнений однонаправленного распространения для модовых амплитуд, которые выводятся из уравнений горизонтальной рефракции. Согласно сложившейся в акустике океана терминологии, такие их обычно называются модовыми параболическими уравнениями (МПУ).

В первой части четвертой главы Петров П.С. строит аналитические решения узкоугольных МПУ с использованием методов выпутывания для

операторных экспонент, возникающих при представлении решения в терминах оператора эволюции. Данные методы основаны на теории Вей-Нормана, которая может быть применена в тех случаях, когда соответствующий МПУ оператор Гамильтона может быть представлен в виде линейной комбинации элементарных операторов, порождающих конечномерную алгебру Ли. Результатом первой части четвертой главы является класс аналитических решений трехмерных задач акустики мелкого моря, в которых неоднородности дна описываются квадратичной параметрической функцией. В этом случае Петровым П.С. получены аналитические выражения для модовых амплитуд акустического поля, которые позволяют выполнять качественный и количественный анализ его интерференционной структуры.

Вторая часть четвертой главы посвящена разработке метода решения задач распространения звука в волноводах мелкого моря общего вида, основанного на численном решении псевдодифференциальных модовых параболических уравнений. В начале представлен вывод псевдодифференциальных МПУ из уравнений горизонтальной рефракции в криволинейных координатах. После этого рассматриваются вопросы об искусственном ограничении расчетной области, а также о выборе начальных данных для маршевой схемы численного решения псевдодифференциального МПУ. Разработанный метод апробирован путем решения серии модельных задач, для которых известны эталонные решения, полученные другими методами.

Пятая глава диссертации Петрова П.С. посвящена разработке теории итеративных параболических уравнений. В рамках этой теории широкоугольные параболические аппроксимации строятся из сумм решений таких уравнений. В диссертации Петрова П.С. предложена методика решения задач распространения звука общего вида, основанная на численном решении итеративных параболических уравнений в области с искусственными границами. При этом в работе устанавливается существование и единственность решений итеративных параболических уравнений в некоторых разумных предположениях относительно соответствующих начальных условий. Предложенная методика решения задач распространения звука апробирована на модельных примерах.

Завершающая, шестая глава диссертации посвящена исследованию влияния эффекта горизонтальной рефракции на точность решения задач акустической дальнометрии. В данной главе выполняется анализ конкретного натурального эксперимента по дальнему распространению звука вдоль кромки шельфа Японского моря. Таким образом, в данном эксперименте реализуются наиболее благоприятные условия для проявления данного эффекта. Для объяснения ошибок определения дальности и ее уточнения в работе использована теория вертикальных мод и горизонтальных лучей Барриджа и

Вайнберга. Показано, что учет горизонтальной рефракции позволяет существенно снизить ошибку определения дальности.

Указанные при рассмотрении глав диссертации замечания в целом не снижают научной ценности диссертации Петрова Павла Сергеевича. Данная диссертация является 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.

Гузов Михаил Александрович,
академик РАН, доктор физико-математических наук,
директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской
академии наук (ИПМ ДВО РАН),

адрес: 690041 Владивосток, ул. Радио 7,

<http://www.iam.dvo.ru/>

e-mail: guzev@iam.dvo.ru

рабочий телефон: +7 (423) 231 18 56

Я, Гузов Михаил Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также на их дальнейшую обработку.

«20» мая 2021 г.

М.А. Гузов



Гузова М.А. заверяю
и ОК Н.К. Курганова

