

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию

**«ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА С ШЕЛЬФА В ГЛУБОКИЙ ОКЕАН
МЕТОДОМ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН»,**

представленную Сорокиным Михаилом Андреевичем

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.7 – Акустика

Диссертационная работа Михаила Андреевича Сорокина посвящена исследованию особенностей распространения гидроакустических сигналов из шельфовой зоны в глубокий океан с целью разработки эффективной методики расчета времен приходов импульсных навигационных сигналов на дальних и сверхдальних дистанциях. Решение этой задачи требует учета специфики распространения сигнала как в условиях мелкого моря, когда особое влияние оказывают характеристики дна, так и в условиях глубокого океана, где требуется учет возмущений гидрологических параметров волновода. Дополнительную сложность приносят эффекты взаимодействия мод на континентальном склоне и необходимость учета горизонтальной рефракции. Несмотря на столь нетривиальную постановку задачи, как с точки зрения наблюдаемых физических эффектов, так и с точки зрения математического описания, М.А. Сорокину удалось получить впечатляющие результаты, демонстрирующие возможности детального анализа экспериментальных данных с помощью разработанного автором комплекса программ на трассах, превышающих 1000 км.

Актуальность темы не вызывает сомнений. Обеспечение подводного позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов на больших удалениях от центров управления возможно практически лишь средствами гидроакустических навигационных систем большой дальности, в которых источники навигационных сигналов размещаются в шельфовой зоне, а приемник находится в глубоководной части акватории. Именно такая конфигурация, «шельф – континентальный склон – глубокий океан», рассматривается в диссертации. Точность решения задачи дальнометрии в этом случае напрямую определяется точностью прогноза эффективной скорости распространения сигнала, а последняя, в свою очередь, – качеством описания пространственно-неоднородной среды. Работа лежит на стыке фундаментальных проблем акустики океана и прикладных задач подводной навигации, что придает ей дополнительную значимость.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 148 наименований. Общий объем – 130 страниц, включая 51 рисунок.

В первой главе излагается математический аппарат работы. Акустическое поле представляется разложением по локальным модам, вводятся групповые скорости мод, определяемые известным интегральным соотношением, и на их основе – понятие эффективной скорости на интервале трассы. Для трехмерного случая привлекается часто используемый подход «вертикальные моды – горизонтальные лучи». Влияние горизонтальной рефракции количественно характеризуется удлинением собственного луча относительно геодезической. Работоспособность методики демонстрируется на регулярном волноводе и на клиновидном волноводе с идеальными границами.

Во второй главе методика применяется к двумерному моделированию эксперимента 2017 г. в Японском море (трассы 68 и 198 км от мыса Шульца). Ключевой результат главы – демонстрация того, что поле скорости звука, восстановленное по прогнозу модели циркуляции океана, рассматриваемой в диссертации, позволяет предсказать не только абсолютные значения времен прихода, но и саму структуру приходов в импульсной характеристике волновода (ИХВ), тогда как интерполяция измеренных в ходе эксперимента вертикальных профилей скорости звука не дает возможности с приемлемой точностью идентифицировать пики ИХВ в рамках модового описания акустического поля. Существенно, что модельное поле воспроизводит крупномасштабные неоднородности – в частности, синоптический вихрь, который принципиально не может быть обнаружен по выполненным в ходе эксперимента локальным океанологическим зондированиям. Отдельного внимания заслуживает раздел 2.4, в котором обосновывается работоспособность методики, построенной на адиабатическом приближении, в условиях заведомо неадиабатического перехода через континентальный склон.

В третьей главе обсуждаемый подход применяется к трехмерному случаю. Рассматриваются результаты серии натурных экспериментов, проведенных в Охотском море (трассы 497 и 212 км), в Японском море на сверхдальней трассе 1073 км и на трассе длиной около 140 км, ориентированной под острым углом ($\sim 40^\circ$) к градиенту глубин. Последний эксперимент представляется наиболее интересным: в нем обнаружено формирование группы мод 6–9 номеров, приходящих в узком временном интервале, что объясняет наблюдаемое расщепление главного максимума ИХВ, а также устойчивый прием сигнала на глубинах до 1000 м.

В четвертой главе на основе уникального материала о гидрологическом разрезе антициклонического вихря в Японском море выполнена параметризация фонового профиля скорости звука потенциалом Морса, а также параметризация вихревого возмущения произведением гауссовых функций по горизонтали и распределением Максвелл-Больцмановского типа по глубине. Использование квантовомеханической аналогии позволило получить замкнутые аналитические выражения для модовых функций и

собственных чисел. Использование аналитических выражений заметно увеличивает численную эффективность моделирования для рассматриваемого в диссертации описания акустического поля в виде «вертикальные моды – горизонтальные лучи», поскольку исключает решение задачи Штурма – Лиувилля в каждом сечении волновода.

В Заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты.

Диссертационная работа написана ясным языком, подтверждает высокий уровень научной квалификации автора, способность получать значимые научные результаты, а также демонстрирует глубокие знания соискателя актуальных методов моделирования акустических волноводов, обработки и анализа экспериментальных данных.

Рецензируемая работа не лишена недостатков.

1. В работе присутствует критика лучевых методов, которая представляется недостаточно обоснованной, а сопоставление с используемым модовым подходом – неполным. Например, утверждение (с. 32–33) о том, что численное интегрирование лучевой системы Гамильтона ведет к накоплению ошибки, делающей сомнительными расчеты на сотни и тысячи километров, применимо в той же мере и к расчету горизонтальных лучей в Главе 3, где рассматривается численное решение точно такой же гамильтоновой системы (с. 17) на трассах длиной до 1073 км. Критерий, по которому одно интегрирование признается неточным, а другое – приемлемым, в работе не сформулирован. Утверждение (с. 33) о принципиальной невозможности «сколь-нибудь точно моделировать распространение звука в трехмерных случаях» вертикальными лучами является чрезмерно сильным: трехмерные лучевые коды широко и успешно применяются, в том числе в задачах томографии и термометрии океана на мегаметровых трассах, например, в работах сотрудников ИПФ РАН. Более уместным представляется упоминание не о «превосходствах» одного описания над другим, а о выборе адекватного способа описания акустического поля в океаническом волноводе для конкретных условий распространений – когда удобно использовать лучи, а когда моды. Включение такого сопоставления, пусть и краткого, сделало бы позицию автора существенно более убедительной, а критику лучевых методов – корректной.

2. В работе часто упоминается о межмодовом взаимодействии (например, разделы 2.4, 2.4.1, 3.3.2, 3.3.4, первое положение, выносимое на защиту). Однако практически все выводы делаются на основании визуального анализа графиков или других качественных наблюдений. Наличие аналитических соотношений, например, уравнений связанных мод, или коэффициентов взаимодействия, с привязкой в обсуждаемым эффектам было бы полезным для общего понимания. Количественные оценки, фактически, отсутствуют. Хотя условия, при которых неадиабатика существенна для распространения импульсных сигналов, известны и быть сформулированы вполне конкретно. На этом фоне

приведенные условия применимости (2.1), (2.2), снабженные оговорками «грубо», «видимо», выглядят недостаточно обоснованными. Вопрос о том, как именно взаимодействие мод влияет на оценку времен распространения представляется не полностью раскрытым.

3. В работе встречаются неточности в формулах, начиная с первой: в (1.1) зависимость от частоты присутствует только в левой части, в (1.2) пропущен индекс у волнового числа и т.д. Рис. 3.5 в легенде указаны четыре кривые (моды 1, 5, 10, 15), на графике изображено не менее пяти линий. Встречаются и орфографические опечатки: «незначительною» (с. 50), «выполняется» (с. 51), «щельфу» (с. 74).

Высказанные замечания носят в основном редакционный характер, могут относиться к перспективам дальнейших исследований и не ставят под сомнение достоверность полученных результатов и общую положительную оценку работы. Полученные результаты актуальны, представляют не только теоретическое, но и практическое значение. Работа выполнена на высоком содержательном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию как на этапе теоретического анализа рассматриваемой проблемы, так и при разработке численных алгоритмов и обработке экспериментальных данных. Выводы и научные положения диссертационной работы представляются достоверными, обоснованными, обладают определенной степенью новизны.

Диссертация Сорокина М. А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача разработки методики прогноза эффективных скоростей и времен прихода модальных компонент акустического сигнала при распространении с шельфа в глубокий океан, имеющая важное значение для развития гидроакустических навигационных систем большой дальности. Основные представленные результаты верифицированы расчетами на эталонных модельных задачах и, главное, систематическим сопоставлением с данными пяти независимых натурных экспериментов. Результаты прошли апробацию на специализированных отечественных и международных конференциях, опубликованы в 18 печатных работах, из них 11 — статьи в рецензируемых журналах, зарегистрированы 4 программы для ЭВМ. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

Личный вклад автора в полученные результаты, их анализа и интерпретации не вызывает сомнений. Соискатель продемонстрировал глубокие знания предмета исследования, показал высокий уровень владения методами численного моделирования гидроакустических сигналов и полей, обработки экспериментальных данных.

Диссертационная работа Михаила Андреевича Сорокина соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,

профессор кафедры акустики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Шуруп Андрей Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет, кафедра акустики

Тел.: 8-495-939-30-81

E-mail: shurup@physics.msu.ru

Я, Шуруп Андрей Сергеевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в материалы защиты диссертационной работы Сорокина М.А., а также их размещение на сайте ТОИ ДВО РАН и дальнейшую обработку.

Подпись

УДОСТОВЕРЯЮ

Зав. канцелярией

В.В. АРХАНГЕЛЬСКАЯ

