

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Лунькова Андрея Александровича на диссертационную работу Сорокина Михаила Андреевича «Исследование распространения звука с шельфа в глубокий океан методом нормальных волн», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.7 – Акустика

Диссертационная работа М.А. Сорокина главным образом посвящена исследованию распространения звуковых импульсов из мелкого моря в глубокий океан через бровку шельфа. Наибольшее внимание уделено прогнозированию времён прихода сигналов в глубоководную область на основе теории нормальных волн (мод) с целью интерпретации имеющихся натурных данных, накопленных в ходе экспериментов по акустической дальнометрии на протяженных трассах. Рассмотрены два ключевых фактора, влияющих на точность оценок времени распространения: учёт профиля дна и учёт поля скорости звука в водном слое. Следует подчеркнуть, что в обоих случаях задача была решена в том числе в трёхмерной постановке, что позволило учесть эффекты горизонтальной рефракции.

Актуальность работы связана с необходимостью совершенствования аппарата численного моделирования для повышения точности прогнозных оценок времени распространения звуковых сигналов в сложных батиметрических и гидрологических условиях. Научная новизна работы заключается в том, что при распространении звука из мелкого моря в глубокий океан в условиях морей Дальнего востока (Японского и Охотского) впервые были учтены трёхмерные эффекты, обусловленные неровностью рельефа дна и неоднородностью водной толщи. Практическая значимость работы и полученных результатов не вызывает сомнений в связи с активным развитием и массовым применением автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) большого радиуса действия (до сотен километров), которые для своей ориентации под водой используют сигналы акустических маяков, расположенных в шельфовой зоне. Для правильного позиционирования требуется не только синхронизация часов на маяке и приёмном гидрофоне АНПА, но и точное знание групповой скорости распространения акустических волн по трассе.

Диссертационная работа М.А. Сорокина состоит из введения, четырех содержательных глав, заключения и списка цитируемой литературы. Немного смущает, что материалы четвертой главы находятся несколько в стороне от основной темы диссертации и не фигурируют в положениях,

выносимых на защиту, и заключении. Также в названии работы следовало бы отразить, что исследование сфокусировано на оценке времён распространения сигналов.

Во введении к диссертации обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, раскрыты практическая значимость и новизна исследования. На защиту вынесены три положения, являющиеся необходимой научной базой для организации гидроакустических навигационных систем большой дальности с источниками навигационных сигналов на шельфе: 1) методика оценки эффективной скорости распространения звукового сигнала из мелкого моря в глубокий океан на основе модового подхода, 2) возможность повысить качество прогноза времени распространения звука за счёт применения моделей циркуляции океана с ассимиляцией натурных данных, 3) существенное влияние горизонтальной рефракции, вызванной неоднородностью рельефа дна на шельфе, на характер дисперсии акустических сигналов в глубоком океане.

В Главе 1 представлены теоретические основы для прогнозирования эффективных скоростей распространения импульсных сигналов: описан хорошо известный подход к моделированию звуковых полей в волноводах, основанный на модовом разложении, а также его обобщение на трёхмерный случай за счёт введения горизонтальных модовых лучей, приведены формулы для оценки эффективной групповой скорости распространения модовых сигналов, кратко упомянут метод широкоугольного параболического уравнения, удобный для проведения расчётов в случае неоднородной по трассе среды. Кроме того, предложен алгоритм численной оценки времён прихода модовых компонент импульсного сигнала, учитывающий трёхмерные неоднородности дна и водной толщи, и продемонстрирована его работоспособность в условиях клиновидного волновода. Обсуждены преимущества модового подхода перед лучевым для оценки эффективной скорости распространения сигнала.

В Главе 2 рассмотрен двумерный сценарий, когда звук распространяется из мелкого моря в глубокий океан практически под прямым углом к бровке шельфа и горизонтальная рефракция не проявляется. За основу взяты зарегистрированные в Японском море экспериментальные импульсные характеристики волновода (ИХВ) на расстояниях 68 и 198 км от излучателя. Прогнозные оценки времени прихода сигнала выполнены согласно алгоритму, предложенному в Главе 1. Важно отметить, что использование модели циркуляции океана, дающей информацию об изменении вертикального профиля скорости звука по трассе, совместно с ассимиляцией экспериментальных гидрологических данных позволило значительно

повысить точность оценки времени прихода основного пика ИХВ. Ценным с методической точки зрения является результат, касающийся возможности использования адиабатического приближения для оценки эффективной групповой скорости распространения модовых компонент звукового поля в рассматриваемых условиях. Показано, что модовый подход является более удобным и надёжным для прогноза времени распространения сигнала, чем лучевой.

В Главе 3 рассмотрены сценарии распространения звука в акваториях Японского и Охотского морей в присутствии одновременно гидрологических и батиметрических неоднородностей, при которых необходим учёт горизонтальной рефракции. Отмечено проявление дополнительной дисперсии, а также слабое влияние особенностей гидрологии на длину собственных лучей модовых компонент низших номеров. Вызывают интерес результаты, когда акустическая трасса идёт под углом к кромке шельфа и в глубоководной части формируется две группы мод, приходы которых локализованы в узких временных интервалах. Как и в Главе 2, обращает на себя внимание неплохое соответствие модельных и экспериментальных времён прихода несмотря на очень большую длину трасс, достигающую 1000 и более км.

В Главе 4 для условий Японского моря были получены выражения, описывающие фоновый вертикальный профиль квадрата волнового числа (функция в виде потенциала Морзе), а также трёхмерное пространственное распределение возмущения профиля скорости звука в области синоптического вихря (функция в виде распределения Максвелла-Больцмана). Очень важно, что подобранные оригинальные аппроксимации позволили выполнить аналитический расчёт постоянных распространения мод и их вертикальных профилей, что удаётся достаточно редко. Возможность быстрого расчёта этих характеристик значительно ускоряет вычисления звуковых полей в трёхмерных случаях, например, в рамках подхода «вертикальные моды – горизонтальные лучи».

Диссертационная работа М.А. Сорокина не лишена недостатков. По тексту имеются следующие замечания:

1. Для валидации предложенного алгоритма оценки времени распространения импульсного сигнала представлена малая выборка экспериментальных данных: используются единичные, хотя и уникальные, ИХВ, по которым сложно сделать статистически достоверные выводы.
2. Не представлено сопоставление экспериментальных и модельных передаточных функций волновода (за исключением одного расчёта в

рамках лучевого подхода), что можно было бы сделать на основе расчётов по методу широкоугольного параболического уравнения. Это бы позволило дополнительно убедиться в правильности выбранной модели среды.

3. В тексте часто говорится, что те или иные максимумы ИХВ можно ассоциировать с модовыми приходами, но детали этого процесса и критерии возможности его осуществления не раскрыты. По всей видимости, наиболее выраженные максимумы ИХВ являются следствием наложения сразу нескольких мод.
4. На Рис. 2.7 показано изменение амплитуд первых 10 мод с расстоянием при распространении из мелкого моря в глубокий океан. Не совсем понятно, как соотносится с законом сохранения энергии увеличение амплитуд всех рассматриваемых мод после прохождения свала глубин. Говорит ли это о том, что имеются моды более высоких номеров, амплитуда которых уменьшается?
5. В разделе 3.3 не приведено распределение поля скорости звука в водном слое, которое использовалось при моделировании. Указано только, что для мелководной части использовались натурные данные, а для глубоководной – выходные данные реанализа. Также следовало бы обосновать наличие систематической ошибки в прогнозных оценках времени прихода сигнала, которая заметна на Рис. 3.22.
6. В Главе 4 не указаны частоты, для которых проводились вычисления характеристик мод.
7. В списке литературы ряд ссылок на русскоязычные статьи приведён на английском языке с отметкой «(in Russian)».

Указанные замечания не меняют общего положительного впечатления о диссертации М.А. Сорокина и не подвергают сомнению обоснованность научных положений. Достоверность сделанных выводов подтверждается согласованностью экспериментальных и модельных данных. Результаты диссертационной работы являются оригинальными, новыми и практически значимыми. Они были опубликованы в ведущих тематических российских и зарубежных научных журналах («Акустический журнал», «Подводные исследования и робототехника», «Journal of Marine Science and Engineering», «The Journal of the Acoustical Society of America»), лично доложены автором диссертации на специализированных российских и международных конференциях (Школа-семинар им. акад. Л.М. Бреховских, сессии Российского акустического общества, Underwater Acoustic Conference and Exhibition и др.). Кроме того, М.А. Сорокин получил четыре свидетельства о

регистрации программ для ЭВМ, которые использовались для проведения численного моделирования. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Исходя из вышеперечисленного считаю, что диссертация М.А. Сорокина «Исследование распространения звука с шельфа в глубокий океан методом нормальных волн» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Михаил Андреевич Сорокин заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Луньков Андрей Александрович

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
лаборатории гидрофизики
Научного центра волновых исследований
Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук» (ИОФ РАН)
119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова 38
тел.: (499) 503-87-77 (доб. 3-84)
e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

27 августа 2026 года



Подпись Луньков А.А.
ЗАВЕРЯЮ
СЕКРЕТАРЯ ИОФ РАН
Глушков В.В.