



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Университета ИТМО

доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

/Васильев В.Н./

сентябрь 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
университет ИТМО» 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 посвящена исследованию распространения импульсных акустических сигналов из шельфовой зоны в глубокий океан. Такая постановка непосредственно связана с созданием гидроакустических навигационных систем большой дальности, в которых источник расположен на шельфе, а приемник, установленный на автономном необитаемом подводном аппарате, может находиться на значительном удалении в глубоководной части моря. Точность определения дальности в подобных системах определяется прежде всего точностью прогноза времени прихода акустической энергии, поэтому тема работы имеет как фундаментальное, так и прикладное значение.

Специфика задачи состоит в резком изменении условий распространения на шельфе, континентальном склоне и в подводном звуковом канале глубокого океана. На склоне возможно интенсивное перераспределение энергии между модами, а поперечные градиенты батиметрии и скорости звука приводят к горизонтальной рефракции. Сквозная идея диссертации заключается в том, что временная структура импульса, сформированная при прохождении шельфа и свала глубин, в значительной степени сохраняется при последующем распространении в глубоком океане, где групповые скорости низших мод близки друг к другу. Это позволяет прогнозировать времена прихода по эффективным групповым скоростям мод, не выполняя полный расчет межмодового взаимодействия на всей протяженной трассе.

Цель работы состоит в разработке методики определения эффективных скоростей модальных компонент импульсного акустического сигнала и времен их прихода в точку приема при распространении с шельфа в глубокий океан. Для достижения цели автор решает задачи расчета времен прихода в волноводах Японского моря, разработки алгоритма усреднения групповых скоростей вдоль трассы и оценки трехмерных эффектов с использованием теории горизонтальных лучей. Программная реализация алгоритмов выполнена автором в среде MATLAB.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 130 страниц, включая 51 рисунок; библиография содержит 148 наименований. Структура работы соответствует логике исследования: от построения расчетной методики и ее проверки на модельных волноводах автор переходит к двумерному и трехмерному моделированию натуральных экспериментов, а затем к полуаналитическому описанию возмущения подводного звукового канала синоптическим вихрем.

Во введении обоснована актуальность темы для гидроакустической навигации большой дальности, сформулированы цель и задачи, научная новизна и положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о методах исследования, практической значимости, достоверности, апробации, публикациях и личном вкладе автора. В качестве основных методов указаны метод нормальных волн, теория горизонтальных лучей и использование пространственных полей скорости звука, формируемых моделями циркуляции океана.

В первой главе изложена и обоснована расчетная методика. Акустическое поле представляется суммой нормальных волн; для каждого сечения волновода вычисляются волновые числа и групповые скорости мод, после чего трасса разбивается на участки и времена пробега суммируются с использованием введенной автором эффективной скорости. В трехмерной постановке групповые скорости усредняются не по геодезической, а вдоль собственного горизонтального луча соответствующей моды, рассчитываемого по пространственному распределению ее волнового числа. Автор сопоставляет рассчитанные времена с максимумами импульсной характеристики волновода и проверяет алгоритм сначала в регулярном, затем в клиновидном прибрежном волноводе. Эти расчеты показывают, что положения максимумов модальных импульсов правильно воспроизводятся теоретическими оценками, а моды высоких номеров заметно чувствительнее низших мод к наклону дна и вызываемой им горизонтальной рефракции. Отдельно обсуждаются

ограничения вертикально-лучевого подхода на протяженных трассах и обосновывается выбор модового описания.

Во второй главе методика апробирована на материалах эксперимента, проведенного ТОИ ДВО РАН в Японском море в сентябре 2017 года с фазоманипулированными сигналами в полосе 375-425 Гц. Для точек приема на удалениях 68 и 198 км сопоставлены расчеты по пяти экспериментальным профилям скорости звука и по реанализу GLORYS12V1 модели NEMO с ассимиляцией океанографических наблюдений. Интерполяция разрозненных зондирований не воспроизводит ни абсолютные времена, ни группировку приходов и дает расхождения порядка 100 мс. Использование NEMO, сочетаемое с натурным профилем на шельфе, позволяет восстановить плотный пучок мод малых номеров и поздние приходы высших мод; среднее расхождение расчетных времен с ближайшими максимумами импульсной характеристики составило около 21 мс при ширине автокорреляционной функции сигнала 10 мс. Автор также показывает, что внутримодовое уширение импульсов в рассматриваемой полосе частот в основном уступает межмодовой дисперсии. Физическое обоснование применимости адиабатической оценки дано через различие разброса групповых скоростей: около 70 м/с на шельфовом участке против примерно 2 м/с в глубоком океане. Поэтому относительные задержки, возникшие до выхода в подводный звуковой канал, сохраняются на последующей протяженной части трассы даже после интенсивного межмодового взаимодействия на континентальном склоне.

В третьей главе методика распространена на трехмерные волноводы Охотского и Японского морей. Для эксперимента 2021 года в Охотском море рассчитаны пространственные поля волновых чисел, собственные горизонтальные лучи и эффективные скорости на трассах 212 и 497 км по данным GLORYS12V1 и батиметрии SRTM. Для короткой трассы моды 1-6 группируются вблизи главного максимума импульсной характеристики, однако отдельные экспериментальные максимумы не удается однозначно связать с конкретными модами: расхождения достигают 0,1-0,15 с. Автор обоснованно связывает это с недостатком данных ARGO, ассимилированных NEMO в Охотском море. Существенно, что даже при этом модель правильно воспроизводит общий диапазон групповых скоростей и характер дисперсии. Для сверхдальнего эксперимента 2023 года в Японском море использован реанализ GOF3.1 модели HYCOM, лучше согласовавшийся с измеренными профилями. Несмотря на пересечение трассы синоптическим вихрем, удлинения модальных лучей составили лишь десятки метров на трассе более тысячи километров, то есть показано, что наличие крупной гидрологической

неоднородности само по себе еще не означает существенного влияния горизонтальной рефракции: определяющей является геометрия трассы относительно поперечных градиентов среды.

Отдельный важный трехмерный пример относится к эксперименту в Японском море на трассе длиной более 140 км, ориентированной примерно под углом 40 градусов к градиенту глубин и почти поровну разделенной на мелководную и глубоководную части. Расчет поля методом параболического уравнения и его разложение по модам показали интенсивный обмен энергией на участках резкого изменения батиметрии и последующий переход к почти адиабатическому распространению в глубоком море. Расчетные времена объясняют наблюдавшееся расщепление импульсной характеристики: моды 1-5 и 6-9 образуют два отдельных пучка, причем второй пучок локализован в интервале менее 0,4 с. За счет горизонтальной рефракции высшие моды проходят более длинный участок шельфа, что изменяет их задержки. Моделирование также воспроизводит уверенный прием сигнала на горизонтах до 914 м. Полученные результаты подтверждают вывод автора о преимущественном влиянии неоднородностей рельефа дна на шельфе по сравнению с трехмерной гидрологической структурой глубокого океана.

В четвертой главе разработана полуаналитическая модель подводного звукового канала с синоптическим вихрем на основе крестообразных гидрологических разрезов антициклонического вихря, полученных в Японском море летом 1999 года. Фоновый профиль представлен через потенциал Морса, что благодаря соответствию уравнений Гельмгольца и Шредингера позволяет аналитически вычислять волновые числа и модовые функции. Возмущение скорости звука вихрем описано произведением гауссовых функций по горизонтальным координатам и распределения типа Максвелла-Больцмана по глубине, учитывающего вертикальную асимметрию. Параметры определены одновременно по зональному и меридиональному разрезам методом наименьших квадратов; среднеквадратичное отклонение составило 0,38 м/с. Сопоставление с численным решением задачи Штурма-Лиувилля показало хорошее согласие для низших мод. Для максимального возмущения в центре вихря требуется теория возмущений второго порядка, тогда как при половинной амплитуде практически достаточно первого порядка. Тем самым получено удобное представление волновых чисел, пригодное для последующего расчета распространения через вихрь.

К наиболее значимым результатам диссертационной работы М.А. Сорокина следует отнести:

1. разработку и программную реализацию алгоритма расчета эффективных групповых скоростей и времен прихода модальных компонент, объединяющего метод нормальных волн с расчетом собственных горизонтальных лучей в трехмерно неоднородном волноводе;
2. теоретическое и экспериментальное обоснование применимости адиабатической оценки при распространении звука с шельфа в глубокий океан даже при наличии короткого участка сильного межмодового взаимодействия, поскольку временное разделение мод формируется преимущественно на шельфе и сохраняется в глубоководном звуковом канале;
3. количественное подтверждение преимущества пространственно полных полей скорости звука, полученных из реанализа GLORYS12V1 модели NEMO с ассимиляцией натурных данных, перед интерполяцией разрозненных зондирований: в эксперименте 2017 года среднее расхождение расчетных и измеренных времен прихода составило около 21 мс, а ошибка определения дальности по оценке автора уменьшается на 0,02-0,03% длины трассы;
4. установление зависимости проявления горизонтальной рефракции от ориентации акустической трассы относительно поперечных градиентов батиметрии и гидрологии и вывод о том, что задержки модальных приходов в рассмотренных случаях в большей степени определяются рельефом дна на шельфе, чем распределением скорости звука в глубоком океане;
5. объяснение формирования двух временно разделенных пучков мод и возможности приема сигнала на глубинах до 1 км при косом пересечении протяженного шельфового участка, включая выявление различного вклада горизонтальной рефракции для низших и высших мод;
6. построение полуаналитической модели фонового подводного звукового канала и его возмущения антициклоническим вихрем, сочетающей параметризацию потенциалом Морса, трехмерное описание вихря и теорию возмущений акустических мод.

Используемые в диссертации метод нормальных волн, лучевая теория и модели циркуляции океана сами по себе являются известными инструментами. Научная новизна работы определяется их целенаправленным объединением в алгоритме прогноза времен модальных приходов для перехода «шельф-

глубокий океан», установлением условий сохранения временной структуры сигнала после зоны межмодового взаимодействия, количественной оценкой вклада горизонтальной рефракции и построением параметрической модели вихря. Теоретическая значимость состоит в развитии модового описания импульсных сигналов в нерегулярных двух- и трехмерных волноводах. Практическая значимость связана с возможностью использования разработанного комплекса программ при проектировании гидроакустических навигационных систем большой дальности.

Достоверность результатов обеспечивается последовательной проверкой алгоритма на регулярном и клиновидном волноводах, сравнением модовых расчетов с решением параболического уравнения и численным решением задачи Штурма-Лиувилля, а также сопоставлением с импульсными характеристиками нескольких натурных экспериментов в Японском и Охотском морях. Автор не ограничивается демонстрацией совпадений, а анализирует причины расхождений, включая пространственное разрешение исходной гидрологии и степень ассимиляции данных ARGO. Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах, включая 11 статей в рецензируемых журналах, семь из которых индексируются в Web of Science и Scopus; получены четыре свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Содержание работы соответствует направлениям 1, 3 и 8 паспорта научной специальности 1.3.7. «Акустика» (физико-математические науки), охватывающим математическую теорию распространения волн, физические процессы распространения звука и акустику природных сред, включая гидроакустику.

Наряду с отмеченными достоинствами работа не лишена отдельных недостатков и дискуссионных положений:

1. предложенные границы применимости адиабатической оценки имеют характер приближенных критериев: различие разброса групповых скоростей на шельфе и в глубоком океане принимается не менее чем десятикратным, а длина зоны сильного межмодового взаимодействия - не более примерно 10% общей трассы. Представляется целесообразным подтвердить эти оценки систематическим исследованием их зависимости от частоты, крутизны континентального склона и соотношения длин мелководного и глубоководного участков;
2. сопоставление экспериментов в Японском и Охотском морях убедительно показывает зависимость точности от полноты ассимилированных моделью данных ARGO. Вместе с тем в работе не

приведен отдельный анализ погрешностей, позволяющий количественно отделить вклад неточности гидрологии NEMO или HYCOM, батиметрии SRTM, параметров дна и приближений акустического расчета в итоговую ошибку времени прихода и определения дальности;

3. в трехмерной постановке времени прихода рассчитываются вдоль собственных горизонтальных лучей без явного учета межмодового взаимодействия; автор справедливо характеризует такую оценку как первое приближение. Сравнение на одном-двух характерных примерах с полным трехмерным расчетом методом связанных мод или параболического уравнения позволило бы точнее установить диапазон параметров, в котором расщеплением модальных компонент и соответствующих лучей можно пренебречь;
4. параметризация вихря построена по крестообразным разрезам одного устойчивого антициклонического вихря, наблюдавшегося летом 1999 года. При малом среднеквадратичном отклонении 0,38 м/с максимальное локальное отклонение достигает 2,05 м/с на периферии объекта. Для оценки универсальности предложенной формы представляет интерес ее проверка на независимых данных, включая другие районы, сезоны и циклонические вихри.

Указанные замечания конкретизируют границы применимости полученных результатов и направления дальнейшего развития методики. Они не затрагивают обоснованность основных выводов и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Диссертация М.А. Сорокина «Исследование распространения звука с шельфа в глубокий океан методом нормальных волн» является завершенной научно-квалификационной работой. В ней на основании комплекса теоретических, численных и натурных исследований решена актуальная научная задача разработки и обоснования методики прогноза эффективных скоростей и времен прихода модальных компонент импульсного акустического сигнала в неоднородном волноводе типа «шельф-глубокий океан», имеющая значение для развития гидроакустики и методов подводной навигации.

По актуальности, научной новизне, достоверности, теоретической и практической значимости полученных результатов, объему выполненных исследований и уровню публикаций диссертационная работа соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к

диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Сорокин Михаил Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. «Акустика».

Отзыв обсужден и одобрен на профильном научном семинаре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» «12» августа 2026 г., протокол №08/2026.

Отзыв составил:

в.н.с., доцент физического факультета

Университета ИТМО, к.ф.-м.н.

_____/Петров М.И./

Сведения о составителе отзыва:

Петров Михаил Игоревич, ведущий научный сотрудник, доцент физического факультета
Университета ИТМО, кандидат физико-математических наук

Контактные данные: m.petrov@metalab.ifmo.ru, +7(921) 978-11-31

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО, НИУ ИТМО, ИТМО)

Почтовый (фактический) адрес организации: Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Телефон: +7(812) 480-00-00

Адрес электронной почты: od@itmo.ru

Web-сайт организации: <https://itmo.ru/>