

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Сидорова Данилы Дмитриевича «Распространение низкочастотного звука в
мелком море с водоподобными участками дна»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.7. – Акустика

Диссертационная работа Д.Д. Сидорова посвящена изучению распространения узкополосных и широкополосных низкочастотных сигналов, и шумов на мелководном шельфе с неоднородным дном, а также разработке методики оценки параметров неоднородностей верхнего слоя осадков на протяженных акустических трассах. Представленные в диссертационной работе Д.Д. Сидорова исследования проводились как аналитически, так и с помощью численного моделирования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы (134 наименования). Каждая глава включает в себя краткое введение с обзором литературы в рамках поставленной задачи, оригинальную часть и выводы. Общий объём работы составляет 135 страниц и включает 50 рисунков и 6 таблиц.

Во **введении** к диссертационной работе обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость исследуемой проблемы, приводится краткий обзор литературы, сформулированы цели и задачи работы, а также описывается методология исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору и современному состоянию создания геоакустических моделей и методов расчёта, применяемых для исследования распространения звука в присутствии неоднородностей в мелководном волноводе. Отмечено, что для исследования акустического поля на арктическом шельфе была выбрана геоакустическая модель Карского моря, характеризующаяся присутствием водоподобных осадков (скорость звука в дне близка к скорости звука в воде).

Из результатов, полученных в этой главе, стоит отметить полученные условия проявления горизонтальной рефракции, связанной с неоднородностями как в водном слое, так и при наличии генерального рельефа дна с существенными неоднородностями. Обозначен новый механизм возникновения горизонтальной рефракции, связанный с наличием градиента скорости звука в дне.

Во **второй главе** диссертации Д.Д. Сидорова на основе результатов численного моделирования проводится статистический анализ средних по глубине потерь при распространении низкочастотного (50–1000 Гц) звука. В случае одномодового распространения, когда длина звуковой волны сравнима с глубиной волновода, потери при распространении линейно зависят от протяженности водоподобных осадков. Полученная линейная зависимость сохраняет свой вид даже при различных профилях скорости звука в водном слое.

В **третьей главе** рассматриваются особенности формирования многомодового звукового поля в присутствии водоподобной области с резкими границами, вытянутой вдоль плоского волнового фронта акустических волн. Анализ проводится на примере двух моделей волноводов: идеализированной (скорость звука в дне меняется только вдоль одной горизонтальной координаты) и приближенной к реальности (Карское море). При этом основное внимание уделяется аналитическому описанию и численному моделированию эффекта межмодового взаимодействия на границах водоподобных участков дна при фиксированной глубине волновода.

Так, в **разделе 3.3** проводится численное исследование межмодового взаимодействия с использованием широкоугольного параболического уравнения и модовой фильтрации для идеализированной модели волновода с постоянным значением скорости звука в воде 1460 м/с. Отмечается, что при распространении звука в широкой полосе частот в волноводе с неоднородной структурой дна наблюдаются осцилляции амплитуды первой моды. Также величина межмодового взаимодействия максимальна, когда скорость звука в дне близка к скорости звука в воде.

В **четвертой главе** рассматриваются особенности распространения волноводных мод, когда граница водоподобных осадков расположена вдоль акустических трасс. Анализ проводится на примере двух моделей волноводов: идеализированной и приближенной к реальности (модель волновода одного из районов Карского моря). При этом основное внимание уделяется эффекту модовой горизонтальной рефракции в области водоподобных донных осадков при постоянной глубине волновода. Обнаружено, что на низких частотах (до 150 Гц) на границе водоподобного дна наблюдается модовая горизонтальная рефракция акустических волн, которая проявляется в случаях: а) искривления модовых лучей, б) увеличения амплитуды и уменьшения потерь при распространении, в) при дополнительной задержке времени прихода импульса, г) при смещении пеленга на источник.

Пятая глава посвящена изучению формирования отдельных спектральных составляющих шумового поля ветрового волнения (распределенные источники) и движущегося судна (сосредоточенный источник) при наличии неоднородностей в структуре дна волновода. В рамках численного моделирования для двух моделей волновода: идеализированной и приближенной к реальной – оценивается влияние неоднородной структуры верхнего осадочного слоя на интенсивность шума и форму его диаграммы направленности как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. Приведены результаты численных экспериментов, где демонстрируются возможности локализации водоподобных областей по тональным компонентам шума движущегося судна в одном из районов Карского моря.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации Д.Д. Сидорова, список публикаций автора по материалам диссертации и список литературы.

Диссертационная работа Д.Д. Сидорова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на очень высоком научном уровне. Достоверность и обоснованность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается проверочными численными экспериментами, а также соответствием результатов экспериментов априорной информации, теоретическим расчетам и результатам, полученным в работах других авторов.

В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Потери при дальнейшем распространении низкочастотного звука, выраженные в дБ, линейно зависят от суммарной протяженности водоподобных областей. Предложена оригинальная методика оценки протяженности низкоскоростных участков дна на основе этой линейной зависимости.
- Показано, что протяженные неоднородности верхнего слоя донных осадков со скоростью звука, близкой к скорости звука в воде, приводят к заметной горизонтальной рефракции акустических волн. На низких частотах (ниже 150 Гц) углы рефракции могут достигать $\approx 6^\circ$. Связанные с рефракцией аномалии в средних по глубине потерь при распространении составляют ≈ 4 дБ;
- Установлено, что в мелком море площадь морской поверхности, определяющей характеристики шумового поля ветрового волнения в точке приема, существенным образом зависит от скорости звука в донных осадках и может изменяться почти на порядок. При этом

уровень шума зависит от указанной площади в значительно меньшей степени, и его изменения составляют менее 3 дБ. Продемонстрировано, что неоднородная структура верхнего осадочного слоя приводит к слабой анизотропии шума ветрового волнения в горизонтальной плоскости и сильной – в вертикальной.

Основные результаты диссертации Д.Д. Сидорова опубликованы в 23 печатных работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ и в публикациях в сборниках трудов и тезисов Всероссийских и международных конференций.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеются замечания:

1. В диссертационной работе Д.Д. Сидорова подробно анализируется влияние водоподобного дна на дальнейшее распространение звука в мелком море с постоянной скоростью звука в водном слое. Однако полученные результаты были бы более весомы при учете зависимости скорости звука от глубины. Это может привести к тому, что наличие приповерхностного звукового канала уменьшит потери при распространении звука, анализируемые во второй главе диссертации, тогда как в придонном канале соответствующие потери увеличатся. К сожалению, подобные условия среды распространения в рецензируемой работе не рассматриваются.

2. В пятой главе показано, что при пересечении судном водоподобной области появляется локальный минимум интенсивности на 7 дБ (см. рис 5.13б). Для практического обнаружения необходима модель движения судна и знание его шумового спектра, направленности излучения, которые не являются изотропными. Более того, процесс не является детерминированным и параметры излучения должны учитывать случайные флуктуации амплитуды и фазы сигнала. В работе эти факторы не обсуждаются.

Указанные замечания не умаляют заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и их высокой оценки и не влияют на общее впечатление от диссертации.

Результаты, представленные в диссертационной работе Д.Д. Сидорова, вносят существенный вклад в аналитическое и численное исследование влияния водоподобных участков дна на формирование акустических полей в мелководных

волноводах. Полученные результаты могут быть использованы для развития методов акустического мониторинга и оперативной океанологии шельфовых районов с существенной изменчивостью параметров дна, включая задачи обеспечения безопасного судоходства и добычи полезных ископаемых.

Считаю, что диссертация «Распространение низкочастотного звука в мелком море с водоподобными участками дна» соответствует специальности 1.3.7. Акустика и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор — Сидоров Данила Дмитриевич — заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика.

Официальный оппонент:

доцент, кандидат физико-математических наук (специальность 1.3.4 – Радиофизика)

доцент кафедры акустики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ

Зам. начальника управления кадров
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Т.А. СУББОТИН

И.Ю. Демин

28.05.2026

Сведения об авторе отзыва: Демин Игорь Юрьевич

Место работы: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, радиофизический факультет, кафедра акустики.

Адрес: 603022, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, д.

Телефон: +7 (951) 918-11-14

E-mail: demin@rf.unn.ru

Подпись И.Ю. Демина заверяю:

