

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, профессора Петухова Юрия Васильевича
на диссертационную работу Сидорова Даниила Дмитриевича

"РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА В МЕЛКОМ МОРЕ С
ВОДОПОДОБНЫМИ УЧАСТКАМИ ДНА",

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.7 – Акустика

Основными целями настоящей диссертации являются изучение закономерностей формирования акустических полей в мелководных океанических волноводах при наличии участков дна с горизонтально неоднородными водоподобными осадками, а также использование результатов этих исследований при разработке методов крупномасштабного акустического мониторинга на арктическом шельфе России. В этой связи актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, т.к. в арктических шельфовых зонах сосредоточены значительные запасы углеводородов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** изложено современное состояние рассматриваемых в работе задач, обоснована актуальность темы и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также приведено краткое изложение содержания диссертации.

В **первой главе** описаны исходные данные, а также подходы и методы аналитического и численного решения поставленных задач. Рассмотрены геоакустические модели мелководных волноводов с неоднородным дном различной сложности, включающим «водоподобные» участки. Для конкретных исследований выбрана модель мелководного волновода с изоскоростным водным слоем и водоподобным дном.

Во **второй главе** выполнен статистический анализ влияния водоподобных участков дна на потери при распространении звука. Разработан критерий для определения диапазона скоростей звука в дне, соответствующих таким участкам. Аналитически и численно выявлена линейная зависимость потерь при распространении от суммарной протяженности участков водоподобного дна на акустической трассе.

В **третьей главе** аналитически, с использованием метода поперечных сечений, и численным моделированием в рамках широкоугольного параболического уравнения исследовано влияние межмодового взаимодействия, приводящего к появлению осциллирующей амплитуд мод в зависимости от частоты излучения и горизонтального

расстояния при распространении акустических сигналов через горизонтально неоднородный участок водоподобного дна. Отмечена максимальная величина таких осцилляций при близких значениях скорости звука в водном слое и дне.

В **четвертой главе** продемонстрировано возникновение горизонтальной рефракции мод, обусловленной зависимостью скорости звука в водоподобном дне от горизонтальных координат. Аналитически и численно показано, что эффект, наиболее заметный на границе водоподобной области дна на частотах ниже 150 Гц, приводит к перераспределению энергии между различными направлениями и временной задержке сигналов.

В **пятой главе** исследовано влияние водоподобных участков дна на шумовые поля ветрового волнения (распределенные источники) и судоходства (сосредоточенные источники). Показано, что водоподобные участки могут заметно повлиять на шум судоходства, его структуру и интенсивность.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы, которые полностью подтверждают положения, выносимые на защиту.

Научные положения и выводы диссертационной работы представляются обоснованными, их достоверность не вызывает сомнений, поскольку они опубликованы в ведущих научных журналах и неоднократно докладывались на профильных конференциях и семинарах.

Несмотря на высокую в целом оценку диссертационной работы, к ней имеется ряд замечаний.

1. В пункте 5 в разделе Научная новизна отмечается, что "присутствие водоподобных осадков на акустических трассах может приводить к осцилляциям амплитуд волноводных мод как по частоте, так и по расстоянию". На стр. 12 в пункте 2 в разделе Положения, выносимые на защиту уточняется, что указанный эффект объясняется взаимодействием мод. На стр. 115 в пункте 4 в разделе Заключение уже утверждается, что "обнаружено, что в районах с неоднородными водоподобными осадками наблюдаются характерные осцилляции амплитуд отдельных мод". Возникает впечатление, что эффект таких осцилляций обнаружен впервые. По этому поводу следует сделать ряд замечаний.

1.1. Так, например, в монографии Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 307 с. в разделе 7.2 на стр. 219–220 отмечается, что в неоднородных по трассе волноводах взаимодействие мод приводит к осцилляциям их амплитуд, см. формулы (7.45) – (7.47), что продемонстрировано аналитически в волноводе с неровной границей со ссылкой там на работу [144].

1.2. В разделе 3.3 отмечается, что при взаимодействии первых двух мод на неоднородном по трассе распространения водоподобном участке дна осцилляции амплитуды первой моды от частоты излучения заметнее всего проявляются, когда скорость звука в дне близка к скорости звука в водном слое. Представляется, что это важный результат, и его следовало бы отмечать в формулировках соответствующих результатов. При этом отсутствует физическое объяснение причин максимального взаимодействия мод. Для ответа на этот вопрос достаточно было получить приближенное аналитическое выражение для среднего коэффициента взаимодействия этих мод (см. формулу (3.5)) в предположении малости горизонтального масштаба неоднородности дна по сравнению с периодом интерференции этих мод.

1.3. Кроме того, не приводится зависимость амплитуд этих осцилляций от степени близости скорости звука в дне со стороны больших или меньших значений по отношению к скорости звука в водном слое. Последнее, по-видимому, представляет интерес, поскольку имеет место принципиальное различие в поведении угловой зависимости коэффициента отражения формирующих моды плоских волн от относительно твердого и мягкого дна.

2. На стр. 46 в пункте 4 в разделе 1.8 утверждается, что "обозначен новый механизм горизонтальной рефракции, связанной с наличием градиента скорости звука в дне". На стр. 10 в пункте 3 раздела Научная новизна отмечается, что "с помощью численного моделирования и аналитически продемонстрировано существование горизонтальной рефракции и межмодового взаимодействия на границе водоподобных областей", а на стр. 115 в пункте 5 раздела Заключение уже уточняется, что максимальный эффект горизонтальной рефракции достигается при близких значениях скорости звука в дне и водном слое.

2.1. Считаю, что эта особенность, а именно, величина эффекта горизонтальной рефракции, а не сама демонстрация эффекта, и является самой главной отличительной чертой распространения звука в неоднородных по трассе мелководных волноводах с водоподобными участками осадочной толщи дна. Поэтому этот факт, по-видимому, можно было отмечать и в положениях, выносимых на защиту. Действительно, сам эффект горизонтальной рефракции мод при наличии таких неоднородностей дна достаточно предсказуем; поскольку, как, например, отмечалось в монографии Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 307 с. на стр. 221, горизонтальная рефракция мод имеет место при зависимости фазовой скорости мод

от горизонтальных координат, т. к. показатели преломления "модовых лучей" обратно пропорциональны этой зависимости и пропорциональны значению фазовой скорости мод в месте расположения источника. Впрочем естественно, что в случае однородного водного слоя и ровных границ раздела пространственная зависимость фазовой скорости мод будет целиком определяться зависимостью акустических характеристик осадочной толщи, определяющих горизонтальную рефракцию акустических сигналов в дне.

2.2. Кроме того, следует также отметить, что в работе [10] из Списка литературы диссертации уже проводились теоретические и экспериментальные исследования по оценке возможного влияния горизонтальных неоднородностей структуры осадочной толщи дна на рефракцию акустических сигналов в мелком море. То есть вопросы горизонтальной рефракции мод в волноводах с неоднородной структурой дна уже обсуждались.

3. При исследовании эффектов взаимодействия мод и горизонтальной рефракции используется модель неоднородной области дна, скорость звука в котором изменяется от 1600 м/с до 1400 м/с (см. рис. 1.3) при скорости звука в водном слое 1460 м/с. Это приводит к тому, что на участке трассы распространения, где скорость звука в водном слое превышает скорость звука в дне, акустическое поле формируется вытекающими модами. Однако, как отмечается в монографии Л.М. Бреховских. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с. на стр. 222, поле каждой такой моды ("квазимоды") экспоненциально возрастает в дне с увеличением глубины. Поэтому на стр. 32 в разделе 1.3 желательно было бы обсудить возможность и точность выделения таких "квазимод" с использованием выражения (1.25), в котором с учетом ортогональности только собственных мод волновода интегрирование производится лишь по глубине водного слоя. Кроме того, вопрос о точности выделения мод вертикальной антенной с использованием выражения (1.25) также остался без обсуждения и для собственных мод волновода.

Отмеченный выше замечания не снижают общей положительной оценки работы, которая является актуальным и законченным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Все главы диссертации идейно и методически связаны между собой, основные результаты содержат научную новизну и представляют высокую практическую ценность. Автореферат диссертации корректно отражает ее содержание.

По моему мнению, данная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям действующей редакции Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Содержание работы полностью соответствует специальности 1.3.7 – Акустика, а ее автор Сидоров Данила Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Даю свое согласие на обработку моих персональных данных в связи с оформлением диссертационным советом документации по данной диссертации.

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник лаборатории акустических методов в геофизике,
доктор физико-математических наук (специальность Геофизика),
профессор

"12" 05 2026 г.

Ю.В. Петухов

Сведения об авторе отзыва:

Петухов Юрий Васильевич

Место работы: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Адрес: 603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Телефон: +7 (831) 466-38-75

E-mail: yuvpetukhov@yandex.ru

Подпись профессора Ю.В. Петухова удостоверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.

"12" 05 2026 г.



И.В. Корюкин