



«УТВЕРЖДАЮ»  
Врио директора ТОИ ДВО РАН,

К. Г.-М.Н.,

Чаркин А.Н.

\_\_\_\_\_ 2026  
*Чаркин*

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ –  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанского  
океанологического института им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения  
Российской академии наук  
на диссертационную работу Сидорова Данилы 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

**Актуальность.** Диссертационная работа Сидорова Данилы Дмитриевича посвящена исследованию закономерностей распространения низкочастотного звука в мелководных волноводах (океанический шельф), дно которых обладает сложной пространственной структурой, зависящей, в первую очередь, от трехмерного распределения скорости звука в дне. Особый акцент в диссертационном исследовании сделан на «водоподобных» участках дна, в которых скорость звука близка к скорости звука в воде, но при этом имеющих большую плотность. Такие области, обнаруженные, в частности, на арктическом шельфе России в Карском море, могут оказывать кардинальное влияние на формирование акустических полей, что необходимо учитывать, как при решении фундаментальных задач, так и в прикладных областях, связанных с освоением шельфа, развитием гидроакустических систем мониторинга, а также оценкой антропогенного воздействия на морскую среду. Каждая глава представленного диссертационного исследования заканчивается предложением простой, но тем не менее имеющей прикладное значение методики зондирования с учетом наблюдаемых акустических эффектов. Тем более, что в основе исследования представлена реальная структура дна для одного из мелководных участков Карского моря. Освоение арктического шельфа, развитие систем акустического зондирования и оценка антропогенного воздействия на морскую среду требует создания надежных, наиболее приближенных к реальности, моделей распространения звука.

**Целью настоящей работы** является изучение распространения узкополосных и широкополосных низкочастотных сигналов и шумов на мелководном шельфе с неоднородным дном, а также разработка методики оценки параметров неоднородностей верхнего слоя осадков на протяженных акустических трассах. Акцент делается на неоднородности структуры дна, а не на его рельефе. Используются аналитические методы расчетов и численное моделирование.

**Научная новизна.** В диссертации получен ряд новых результатов, среди которых наиболее важными представляются следующие:

1. Впервые введено и описано понятие «водоподобного» дна, объясняющее ряд эффектов в распространении звука в мелком море.

2. Впервые аналитически и численно продемонстрировано возникновение трехмерных акустических эффектов в однородном водном слое на участке водоподобных донных осадков.
3. Описано формирование акустических шумов с учетом неоднородностей в донной структуре на арктическом шельфе, которая легла в основу разработки методов пассивного акустического зондирования неоднородностей в дне.

**Научная и практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для решения ряда практических задач, в частности:

- 1) развития методов акустического мониторинга и оперативной океанологии шельфовых районов с существенной изменчивостью параметров дна, включая задачи обеспечения безопасного судоходства и добычи полезных ископаемых;
- 2) прогнозирования акустических ландшафтов и защиты от антропогенного шумового воздействия охраняемых видов морских животных в части определения границ безопасных зон с учетом трехмерных неоднородностей в структуре донных осадков.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений, списка публикаций автора по теме диссертации (6 статей в рецензируемых российских и зарубежных журналах и тезисы отечественных и международных конференций) и списка литературы (134 наименования). Общий объем работы составляет 135 страниц и включает 50 рисунков и 6 таблиц.

Во **введении** представлены актуальность, степень разработанности темы, научная новизна, практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора, структура, объем и краткое содержание диссертации, сформулированы цели и задачи работы.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу современного состояния геоакустических моделей на основе обобщения теоретических и экспериментальных работ. В главе описан математический аппарат, используемый при проведении аналитических исследований и численного моделирования. Особое внимание уделено таким акустическим эффектам, как горизонтальная рефракция и межмодовое взаимодействие. Существенное место в работе занимает описание моделей и параметров мелководных волноводов, которые легли в основу диссертационного исследования. В данной главе представлены две ключевые модели. Первая — упрощенная модель, в которой скорость звука в дне изменяется по кусочно-линейному закону в диапазоне от 1400 м/с до 1600 м/с. Вторая модель приближена к реальным условиям и учитывает трехмерное распределение скорости звука в донных отложениях Карского моря, полученное по данным инженерной сейсморазведки. В обеих моделях водный слой предполагается однородным и имеющим постоянную толщину, что также обусловлено результатами сейсморазведки.

Во **второй главе** на основе численного моделирования проведен статистический анализ влияния объемных неоднородностей структуры дна на энергетические потери при распространении тональных низкочастотных звуковых сигналов (в диапазоне 50–1000 Гц) в мелководной части Карского моря. Автором показано, что одним из существенных факторов, влияющих на средние по глубине потери при распространении, являются участки дна, в которых скорость звука близка к скорости звука в воде. Такие участки предложено называть «водоподобными». В работе представлен аналитический подход к разработке критерия, позволяющего относить тот или иной участок дна к классу «водоподобных». Дополнительно автором установлено, что на низких частотах (ниже 100 Гц), когда полное

звуковое поле может быть описано одной первой модой, средние по глубине потери при распространении линейно зависят от протяженности водоподобных областей. Данное наблюдение предлагается использовать для обнаружения таких участков.

**Третья глава** посвящена исследованию модовой структуры акустического сигнала при распространении звука над участком дна, содержащим водоподобную область. В первом разделе представлены характеристики мод различных номеров для частот от 50 до 150 Гц в зависимости от скорости звука в дне при постоянной толщине водного слоя. Автором показано, что для значений скорости звука в дне, близких к скорости звука в воде, наблюдается сильная изменчивость характеристик мод, которая может существенно влиять на акустическое поле. Далее приводится аналитическое описание, в результате которого установлено, что наличие водоподобного участка дна на трассе распространения приводит к эффекту межмодового взаимодействия. Данный эффект проявляется в виде осцилляций в частотной области. Автор обращает внимание на то, что эти осцилляции зависят от положения водоподобного участка дна относительно источника звука. Для широкой полосы частот (150–1000 Гц) в рамках численного моделирования автором подтверждены результаты аналитического описания. Анализ модовой структуры проведен для независимого вертикального разреза поля скорости звука на основе двух моделей мелководного волновода, описанных в первой главе. Для модели Карского моря, с использованием ранее упомянутой зависимости характера осцилляций, предложена методика обнаружения и локализации водоподобного участка дна.

**Четвертая глава** посвящена исследованию структуры акустического сигнала в случае, когда водоподобная область ориентирована вдоль направления распространения звука. В первом разделе аналитически рассматривается задача о влиянии линейного изменения скорости звука в дне на «модовые лучи» при постоянной толщине водного слоя. В отличие от упрощенной модели, представленной в первой главе, скорость звука в дне в данном случае изменяется от 1460 м/с до 1600 м/с. Автором показано, что наличие такой неоднородности на трассе распространения приводит к искривлению траектории модового луча, а также проведена оценка углов горизонтальной рефракции луча первой моды. В последующих разделах автором выполняется моделирование распространения звука как для тональных низкочастотных сигналов, так и для импульсных сигналов (в диапазоне от 35 до 150 Гц) с использованием упрощенной модели и модели, приближенной к реальным условиям. В серии численных экспериментов показано, что горизонтальная рефракция приводит к уменьшению потерь при распространении; при этом углы горизонтальной рефракции могут достигать единиц градусов (для тональных сигналов), а также вызывать временные задержки до десятых долей секунды (для импульсных сигналов). В заключительном разделе главы автором рассматриваются особенности работы горизонтальных приемных антенн в условиях модели мелководной части Карского моря.

**Пятая глава** посвящена исследованию формирования акустических шумов от распределенных источников (ветровое волнение) и движущегося сосредоточенного источника (шум судна) при наличии неоднородностей в структуре дна. На первом этапе автором в рамках численного моделирования выполнены оценки границ применимости используемой методики прогнозирования шума ветрового волнения. Показано, что размер области, с которой собирается шум, зависит от параметров дна (скорости звука в донных отложениях). С учетом выделенных ограничений методики проведен анализ характеристик шума для моделей мелководного волновода, описанных в первой главе. В рамках предложенной модели автором установлено, что уровень шума ветрового волнения слабо

зависит от параметров дна. При этом направленность шума в вертикальной плоскости имеет различную структуру, обусловленную отличающимся модовым составом принимаемого сигнала, анализ которого также представлен в данной главе. Для сосредоточенного движущегося источника (шум судна) выполнена оценка структуры поля при наличии водоподобного участка дна между судном и приемником звука (вертикальная цепочка гидрофонов). Закономерности, выявленные в ходе численных экспериментов, согласуются с результатами, полученными в предыдущих главах, и предлагаются автором в качестве признаков наличия водоподобного участка дна на трассе между судном и стационарной приемной акустической системой.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации.

Как и любой другой объемный труд, рецензируемая работа имеет ряд недостатков, требующих уточнения. **Замечания** к работе следующие:

1. В главе 2 для расчета статистики потерь при распространении вводится статистический ансамбль акустических трасс со случайно расположенными точками излучения и приема. С точки зрения теории такое определение ансамбля является вполне разумным, поскольку оно допускает возможность существования некоей универсальной статистики, например, рассматриваемого соискателем распределения Берра. Однако, это определение является неудачным с точки зрения сопоставления с данными натурных измерений, при которых положение источника или приемной системы, как правило, фиксируется. При фиксации положения источника или приемника следует ожидать существенный вклад в статистику от пространственных корреляций поля скорости звука в дне.

2. На странице 65 приводится достаточно известная формула (3.5), которая содержит производную модовой функции от горизонтальной координаты. Однако, на границах областей интенсивного выхода газа акустические свойства дна могут меняться скачкообразно, что делает эту производную плохо определенной. На этой же странице в тексте присутствует выражение «Предполагая, что период косинуса медленно меняется ...» - конечно, это стилистически очень неудачная формулировка.

3. В параграфе 4.2 рассматривается влияние горизонтальной рефракции на распространение низкочастотных импульсов и обнаружено, что при учете горизонтальных отклонений уровень сигнала увеличивается на 65 дБ. Это очень большая величина, которая требует дополнительных пояснений.

4. В главе 5 указывается на слабую горизонтальную анизотропию шумовых полей ветрового волнения, но в то же время отмечается острая зависимость модового состава от типа дна в точке расположения приемной системы. На самом деле модовый состав может играть достаточно большую роль, поскольку он определяет степень акустической засветки водоподобных участков. Отсюда можно сделать вывод, что при определенных характеристиках дна горизонтальная анизотропия может быть значительно сильнее.

Вместе с тем отметим, что указанные замечания носят дискуссионный характер и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы Д.Д. Сидорова и могут относиться к перспективам дальнейших исследований. Работа выполнена на высоком содержательном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию как на этапе теоретического анализа рассматриваемой проблемы, так и при разработке численных алгоритмов. Выводы и научные положения диссертационной работы представляются достоверными и обоснованными.

Диссертационная работа в целом представляет собой законченный научный труд, основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в печатных работах Д.Д. Сидорова, которые опубликованы в ведущих рецензируемых научных российских и зарубежных журналах. Работа прошла апробацию на российских и международных конференциях. Автореферат работы и публикации Д.Д. Сидорова достаточно полно передают содержание и основные выводы работы. Диссертационная работа Даниила Дмитриевича Сидорова соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (ред. от 16.10.2024) "О порядке присуждения ученых степеней" (с изменениями и дополнениями, вступил в силу с 01.01.2025), а сам автор, безусловно, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Результаты диссертационной работы Сидорова Д.Д. были представлены и обсуждены на семинаре лаборатории математического моделирования волновых процессов ТОИ ДВО РАН 29 апреля 2026 г. Отзыв утвержден на заседании отдела физики океана и атмосферы 14 мая 2026 г.

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник

Лаборатории математического моделирования волновых процессов

доктор физико-математических наук

Макаров Денис Владимирович.

22.05.2026

Я, Макаров Денис Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

22 мая 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

Телефон: +7 (423) 231-1400

Факс: +7 (423) 231-2573

E-mail: [pacific@poi.dvo.ru](mailto:pacific@poi.dvo.ru)

Сайт: [www.poi.dvo.ru](http://www.poi.dvo.ru)

Подпись сотрудника Макарова Дениса Владимировича удостоверяю:

Ученый секретарь ТОИ ДВО РАН,

к.г.н.

Клещёва Татьяна Игоревна

22 мая 2026 г.

