

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию

«МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
НА ШЕЛЬФЕ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ»,

представленную Манульчевым Денисом Сергеевичем

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.7 – Акустика

Диссертационная работа Дениса Сергеевича Манульчева посвящена развитию методов прогнозирования уровней антропогенных шумов и параметров акустических импульсов в условиях шельфа с учетом характеристик источника, батиметрических, гидрологических и геологических особенностей среды распространения. Представлен внушительный экспериментальный материал, основанный на результатах натурных исследований, проведенных на Морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН, м. Шульца, а также на результатах многолетней экологической программы по изучению серых китов на северо-восточном побережье о. Сахалин.

Целью диссертационной работы Д.С. Манульчева являлась разработка и апробация на экспериментальных данных методики расчета пространственного распределения уровней акустических шумов для получения количественных оценок уровней акустического воздействия на морских животных. Для достижения заявленной цели Д.С. Манульчевым были предложены и реализованы новые методы обработки экспериментальных данных, зарегистрированных в множестве точек в исследуемой акватории, позволяющие оценить характеристики трассы распространения (решение обратной задачи рассеяния), а также восстановить функцию источника (обратная задача излучения). Полученные результаты решения обратных задач используются в качестве исходных данных для моделирования методами модового параболического уравнения (МПУ), что позволяет достичь соответствия модельных и экспериментальных данных с точностью до 2 дБ. Подобная точность является весьма высокой и ранее другими авторами при выполнении расчетов для аналогичных условий распространений не достигалась.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что в настоящее время наблюдается существенный рост хозяйственно-экономической деятельности на шельфе Российской Федерации, связанный с активным поиском и освоением нефтегазовых месторождений, развитием морских транспортных артерий, что приводит к активизации строительных проектов, к увеличению интенсивности судоходства. Все это влечет заметное изменение антропогенной шумовой нагрузки на шельфовую зону. Повышается значимость проведения комплексного мониторинга состояния окружающей среды и контроля степени влияния индустриальной деятельности на нее. Одной из ключевых составляющих подобного рода экологических программ является акустический мониторинг, включающий в себя не

только проведения натурных измерений текущей шумовой обстановки в акватории, но и численного моделирования. Корректное численное моделирование уровней формируемых шумов является весьма актуальным и востребованным, позволяет заранее оценить акустическое воздействие на акваторию и морских обитателей в ней, выработать оптимальные сценарии хозяйственной деятельности с целью минимизации вредного шумового воздействия. Хорошо известно, что характер распространения акустической волны в условиях шельфа сильно зависит как от характеристик водного слоя, так и параметров дна. В общем случае эти параметры известны лишь приближенно, а в случае протяженных трасс и фрагментарно, что делает задачу моделирования абсолютных уровней звука в таких условиях сильнейшей априорной недостаточности весьма трудоемкой и нетривиальной проблемой. Развитие методов и подходов, позволяющих выполнять расчеты уровней акустического поля, соответствующих экспериментальным данным с требуемой точностью, в условиях выраженной пространственной неоднородности характеристик мелкого моря, является актуальной и востребованной задачей. В связи с этим актуальность диссертационной работы Д.С. Манульчева, а также полученных им результатов, не вызывает сомнений. Значимость результатов, полученных Д.С. Манульчевым, демонстрируется и тем, что разработанный метод расчета уровней акустических шумов, изложенный в диссертации, многократно использовался в рамках комплексных экологических программ на северо-восточном шельфе о. Сахалин при моделировании акустических полей от забивки фундаментных свай на берегу (оператор Exxon Neftegas Limited, 2015 и 2019 гг.), при проведении геофизических исследований (ООО Сахалинская Энергия, 2022 г., АО Сахалинморнефтегаз-Шельф, 2023 г.), а также при исследовании акустической обстановки Обской губы в зоне потенциального воздействия проекта «Арктик СПГ-2» (ПАО Новатэк, ИЭПИ, 2020 г.).

Диссертация состоит из введения, одной главы, содержащей обзор литературы по теме диссертации, двух оригинальных глав, включающих в себя материал, выносимый на защиту, заключения, где описываются основные результаты, и списка литературы. Список литературы состоит из 167 наименований, включая основные публикации автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 155 страниц, из них 135 страниц текста, включая 58 рисунков.

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, а также положения, выносимые на защиту, отмечается научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов.

В первой главе приводится обзор технических средств и методов акустического мониторинга шумовой обстановки на акваториях. К наиболее интенсивным источникам антропогенных шумов на шельфе отнесены морские сейсморазведочные исследования, забивка свай в море и на берегу, а также шумы судоходства, обеспечивающие проводимые работы. Если шумы судов характеризуются широкополосным звуком, то два других типа источников формируют серии низкочастотных импульсных сигналов. В качестве

характеристик, описывающих воздействие антропогенного шума, выбраны пиковые значения акустического давления SPL_{peak} и акустическое воздействие SEL , которые проявляют наибольшую стабильность в случае распространения серии импульсных сигналов, например, при проведении сейсморазведочных работ. Важно, что при вычислении указанных величин, учитываются особенности восприятия звука различными млекопитающими путем введения взвешенной частотно зависимой функции. Особое внимание в первой главе уделено рассмотрению различных подходов к моделированию распространения звука и расчета функции потерь в неоднородных волноводах. Акцент сделан на методах, основанных на параболическом уравнении. Для достижения поставленных в диссертационной работе задач выбраны: а) хорошо известный метод параболического уравнения с аппроксимацией Паде $RAM(s)$, б) серия методов модового параболического уравнения (МПУ), разработанных в научной группе, где осуществлялась подготовка диссертации. Методы $RAM(s)$ использовались ранее для анализа экспериментальных данных, аналогичных тем, которые рассматриваются в диссертации. Эти методы позволяют учесть упругие характеристики дна, но применяются для расчетов полей в вертикальной плоскости. В свою очередь МПУ позволяют решать трехмерные задачи, учитывая трехмерные эффекты рассеяния акустических волн в неоднородных шельфовых зонах, что является их весомым преимуществом. Использование МПУ для анализа особенностей формирования шумового поля в условиях шельфа вблизи о. Сахалин и м. Шульца выполнено в работе Д.С. Манульчева впервые.

Во второй главе приводится ряд экспериментальных и численных исследований распространения звука в сложных волноводах, характерных для районов залива Посъета вблизи м. Шульца (Японское море) и северо-восточного шельфа о. Сахалин (Охотское море). Выявлены особенности формирования акустического поля под воздействием гидрологических условий и неоднородностей дна.

Так, в эксперименте близи м. Шульца, при распространении тонального звука в береговом клине в сторону континентального склона исследовано явление «захвата» энергии звуковых колебаний придонным звуковым каналом при наличии сезонного термоклина. В результате расчетов был смоделирован «эффект оползня» для звука частотой 320 Гц в летне-осенних гидрологических условиях и эффект равномерного распространения звука в водном слое шельфовой зоны и формирования обширных зон тени и конвергенции в глубоководной части моря в зимних условиях. При этом для получения корректных результатов численного моделирования потребовалось учесть упругие свойства дна ($RAMs$). Приближение «жидкого дна» приводило к завышенным на примерно 18 дБ значениям уровней. Столь существенная разница в оценке потерь для этого эксперимента может быть связана с возбуждением в дне сдвиговых волн, наличие которых подтверждает выход горных пород в рассматриваемом районе залива Посъета.

В следующем эксперименте, проведенном на северо-восточном шельфе о. Сахалин, приближение «жидкого дна» и применение модовых параболических уравнений (МПУ) позволило сопоставить экспериментальные и модельные данные с приемлемой точностью. Рассматривалось распространение серии тональных сигналов в диапазоне 15–5000 Гц в сторону берега. В ходе обработки экспериментальных данных показано, что наличие сезонного термоклина приводит к увеличению функции потерь в пределах 6 – 20 дБ на частотах более 80 Гц. Минимальные же потери при распространении звука наблюдаются, когда водный слой однородный и холодный. Сезонный термоклин увеличивает потери на распространение, поскольку акустические волны захватываются придонным звуковым каналом, что приводит к интенсивному взаимодействию звука со дном и, как следствие, к его поглощению и рассеянию в дне. На распространение в прибрежную зону низкочастотных тональных сигналов в сравнительно высоком диапазоне частот 8 – 80 Гц изменение гидрологических условий влияния практически не оказывало.

Следующие два эксперимента выявили ряд интересных особенностей влияния неоднородностей дна на характер распространения акустического сигнала в условиях шельфа. Так при излучении одиночных импульсных сигналов в относительно глубоководной бухте Витязь (м. Шульца) в сторону моря, гидрофоном у дна регистрировался «двойной» импульс. При этом оба регистрируемых импульса имели соизмеримые амплитуды и спектры. Использование методов моделирования, развиваемых в диссертационной работе Д.С. Манульчева, позволило объяснить наблюдаемый эффект за счет введения слоя осадочных пород. В этом случае создается дополнительный канал распространения звука, в котором локализуется часть энергии излучаемого сигнала. Выполненное численное моделирование показало, что энергия «прямого» (или водного) импульса переносится первой и частично второй модой, в то время как другой импульс распространяется в слое осадков за счет преимущественно второй моды. Полученное объяснение соответствует геологии места проведения работ, где ниже границы «вода-дно» может присутствовать слой горных пород, представленных преимущественно гранитом.

Второй эксперимент, где ярко проявилось влияние неоднородностей дна, был проведен в районе северо-восточного шельфа о. Сахалин. Излучение проводилось с множества точек, практически равноудаленных от точки приема сигналов, но расположенных на разных азимутах в диапазоне углов от 0 до 180 градусов. Экспериментально установлено наличие зон аномально высокого поглощения звука. Численное исследование выявило, что наблюдаемый эффект связан с наличием неоднородностей, содержащих пониженные значения скоростей продольной волны c_p в дне. Показано, что аномальный участок по форме похожий на уединенный «солитон» с основанием равным 400 м и высотой 75 м, в котором значение c_p на 350 м/с меньше, чем в окружающем эту область дне, и на 110 м/с меньше, чем в водном слое, увеличивает потери при распространении сейсморазведочного сигнала в водном слое на 14.2 дБ в частотном

диапазоне 10 – 250 Гц. На частотах выше 70 Гц основная энергия сейсмоакустического импульса переносится за счет водных мод, и наблюдаемый эффект проявляется не так заметно. Подобное влияние неоднородностей скорости продольных волн в дне известно и наблюдалось ранее на шельфе Баренцева моря, а также в пресноводных водоемах. Причина столь малых значений c_p может быть связана с присутствием пузырьков метана, которые могут содержаться вблизи газоносных провинций на шельфе, или формироваться за счет процессов гниения в дне пресноводных водоемов. Проведенное Д.С. Манульчевым численное моделирование продемонстрировало эффективность развиваемых в диссертации методов для корректной оценки уровней акустических сигналов даже в таких сложных условиях аномального поглощения акустических волн за счет неоднородностей дна.

Последний эксперимент, который описывается и детально численно анализируется во второй главе диссертации, посвящен распространению акустической волны в неоднородных геоакустических волноводах с включением береговых участков. Эксперимент проводился в бухте Витязь и на мысе Шульца полуострова Гамова. Показано, что акустические поля от различных источников могут устойчиво регистрироваться на поверхности суши и в скважинах на довольно значительном расстоянии от уреза воды. Впервые с привлечением МПУ проведено численное исследование распространения звука в волноводе, включающем в себя водный слой, дно, береговой участок и слой воздуха. Количественно объяснить экспериментальные результаты с высокой точностью не удалось, однако качественно результаты моделирования согласуются с результатами экспериментальных исследований, что указывает на перспективность дальнейшего развития предлагаемых в диссертации подходов и для моделирования акустических сигналов на суше от подводного источника.

Третья глава диссертации посвящена развитию методов оценки спектральной функции источника по данным измерений с удаленных приемников, а также использованию полученных оценок для моделирования нестационарных акустических полей, формируемых в нерегулярных волноводах при проведении сейсморазведочных работ и забивки свай на берегу. Анализируются результаты двух экспериментов, проведенных в районе шельфа о. Сахалин. В одном эксперименте судно-катамаран обеспечивало излучение коротких низкочастотных импульсных сигналов, которые регистрировались у поверхности дна. В другом эксперименте на дне акватории регистрировались сигналы от забивки свай на берегу. Предложенная и реализованная в диссертации Д.С. Манульчева методика построения функции эквивалентного точечного источника позволила оценить пространственное распределение энергии и пиковой амплитуды импульсного сигнала в акватории в обоих экспериментах с точностью до 2 дБ. Дополнительно было проведено сравнение результатов моделирования акустического поля методами узкоугольного и широкоугольного (в горизонтальной плоскости) модового параболического уравнения. Показано, что в условиях рассматриваемых экспериментов учет трехмерных эффектов рассеяния акустических волн при использовании псевдодифференциального (широкоугольного) адиабатического метода

решения МПУ дает значительно более точные результаты, чем при использовании его узкоугольного аналога. Тем самым показано, что использование модового параболического уравнения в совокупности с методикой построения функции эквивалентного точечного источника по акустическим данным опорного гидрофона может эффективно использоваться для прогнозирования и оценки уровней низкочастотных акустических шумов, генерируемых производственной деятельностью человека на шельфе.

В Заключение диссертационной работы сформулированы основные результаты.

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями «Положения о присуждении ученых степеней», написана ясным языком, подтверждает высокий уровень научной квалификации автора, способность получать значимые научные результаты, а также демонстрирует глубокие знания соискателя актуальных методов моделирования акустических волноводов, обработки экспериментальных данных.

Достоверность представленных результатов определяется тем, что они основаны на многочисленных акустических экспериментах, проведенных с применением метрологически аттестованных акустических и гидрологических измерительных средств с применением независимо полученных батиметрических и гидрологических данных, собранных на шельфе о. Сахалин в многолетних морских биолого-акустических экспедициях, проведенных на судах РАН. Достоверность результатов моделирования подтверждается высокой степенью согласованности теоретических оценок с результатами натурных измерений, также тем, что используемые в диссертации математические методы и основанные на них комплексы прикладных программ прошли всестороннюю верификацию при решении модельных задач распространения звука.

Новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые применена модель модового параболического уравнения в приближении нормальных взаимодействующих мод в вертикальной плоскости и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости с учетом упругих свойств слагающих дно пород, а также адиабатического широкоугольного МПУ для численного моделирования акустических полей, формируемых тональными и импульсными источниками в море и на берегу в неоднородных геоакустических волноводах в районах континентального шельфа. Для достижения необходимой для практики точности численного моделирования применена новая методика построения эквивалентной точечной функции источника по результатам опорных измерений. Несомненным достоинством диссертационной работы Д.С. Манульчева является экспериментальная апробация развитых методик оценок уровней антропогенных шумов в рамках новых акустических трасс на северо-восточном шельфе о. Сахалин и в заливе Посъета с включением береговых участков в обоих случаях. При этом получено согласование экспериментальных и модельных акустических данных для всех рассматриваемых акустических трасс.

Теоретическая и практическая значимость работы определяются важностью разработанных автором методов оценки антропогенного воздействия на морских

млекопитающих с целью проведения комплексного мониторинга состояния окружающей среды и контроля степени влияния индустриальной деятельности на нее. Практическая значимость работы определяется, в том числе, и возможностью применения результатов диссертации при планировании сейсморазведочных работ в шельфовых районах, а также при проведении инженерных и строительных работ на шельфе, особенно в тех случаях, когда требуется минимизация вредного воздействия акустических сигналов на морскую экосистему. Следует отметить, что в ходе подготовки диссертационной работы Д.С. Манульчевым сформирована уникальная база данных значений геоакустических параметров моделей волноводов, соответствующих районам залива Посыета и северо-восточного шельфа о. Сахалин. Это практически значимый результат, поскольку применение сформированных баз данных может существенно упростить планирование и проведение модельных экспериментов в этих районах.

Рецензируемая работа не лишена недостатков.

1. В работе практически не уделено внимание анализу ограничений предлагаемых методов для моделирования акустических сигналов. Область применимости желательно было отметить более внятно. Например, при наличии «мешающих» шумов судна (раздел 2.1.1, рис. 2.2), методика не позволяет достичь приемлемой точности соответствия экспериментальным данным. Также, не учитываются гидродинамические процессы, которые будут влиять на характер распространения сигнала, например, в случае выраженных приливно-отливных явлений на шельфе.

2. В случае забивки свай или при использовании приповерхностных источников ключевую роль в распространении энергии акустических волн должны играть поверхностные волны. В предлагаемых же методах расчета зачастую используется приближение «жидкого дна», а упругие свойства дна, по-видимому, заменяются дополнительным поглощением. Такая замена требует собственной аккуратной оценки точности или, по крайней мере, ссылок на работы, где такой подход обоснован.

3. Ключевым элементом развиваемых в диссертации методов является оценка спектральной функции источника. Эта задача является частным случаем обратных задач излучения, известных также как голография. Решение этой задачи по данным с одного приемника требует исследования точности такого подхода и области его применимости, например, когда требуется учитывать диаграмму направленности излучателя. В диссертации этим вопросам уделяется недостаточно внимания.

4. Другим важным этапом реализации методики моделирования является оценка параметров волновода. Фактически, изменение этих параметров позволяет добиться хорошего соответствия экспериментальных данных и численного моделирования. В каких пределах изменялись параметры волновода относительно данных независимых геофизических исследований для достижения заявленной точности 2 дБ?

5. В работе встречаются неточности в оформлении. Например, в списке литературы дублируются ссылки [92] и [93], опубликованный вариант статьи [153] имеет

название, отличающееся от приведенного в диссертации, также используются разные способы оформления цитируемой литературы даже в одном журнале, например, [149] и [150].

Отмеченные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы Д.С. Манульчева и могут относиться к перспективам дальнейших исследований. Результаты работы актуальны, представляют не только теоретическое, но и практическое значение и могут быть применены при разработке и реализации схем прогнозирования и мониторинга антропогенной шумовой обстановки на акваториях при проведении хозяйственной деятельности. Работа выполнена на высоком содержательном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию как на этапе теоретического анализа рассматриваемой проблемы, так и при разработке численных алгоритмов и обработке экспериментальных данных. Выводы и научные положения диссертационной работы представляются достоверными, обоснованными, обладают определенной степенью новизны.

Диссертационная работа в целом представляет собой законченный научный труд, основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в печатных работах Д.С. Манульчева, которые опубликованы в ведущих рецензируемых российских научных изданиях, в том числе в 11 статьях, опубликованных в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на российских и международных конференциях. Автореферат работы и публикации Д.С. Манульчева достаточно полно передают содержание и основные выводы работы.

Личный вклад автора в постановку задачи, получение результатов и их интерпретации не вызывает сомнений. Соискатель продемонстрировал высокий научный уровень, глубокие знания предмета исследования, показал высокий уровень владения методами численного моделирования сигналов и полей, обработки экспериментальных данных, решения прямых и обратных задач акустики. Диссертационная работа Дениса Сергеевича Манульчева соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а сам автор, безусловно, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,

доцент кафедры акустики физического факультета Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский

государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Шуруп Андрей Сергеевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет, кафедра акустики
Тел.: 8-495-939-30-81
E-mail: shurup@physics.msu.ru

Я, Шуруп Андрей Сергеевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в материалы защиты диссертационной работы Манульчева Д.С., а также их размещение на сайте ТОИ ДВО РАН и дальнейшую обработку.



И.о. декана
физического факультета МГУ,
профессор

В.В. Белокуров

«06» сентября 2024 г.