

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Лунькова Андрея Александровича на диссертационную работу Манульчева Дениса Сергеевича «Методика моделирования антропогенных акустических сигналов на шельфе на основе экспериментальных измерений», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика

В диссертационной работе Д.С. Манульчева проведено комплексное исследование особенностей распространения тональных и широкополосных звуковых сигналов в заливе Посъета и на северо-восточном шельфе о. Сахалин, которое содержит в себе как уникальные экспериментальные данные, так и результаты численного моделирования с применением наиболее передовых методик. Данное исследование направлено на получение максимально точных прогнозных оценок параметров звукового поля, создаваемого антропогенными источниками разных типов в трёхмерно неоднородных мелководных акваториях, с учётом возмущений в толще воды и осадочного слоя, неровностей донного рельефа, наличия сухопутных участков и т.д.

Промышленная активность человека на морском шельфе, связанная, в частности, с добычей углеводородов, сопровождается повышением уровня шума под водой, что может приводить к негативному воздействию на морских животных, вплоть до летального исхода. Поэтому в настоящее время все работы, вызывающие повышение шумового фона и проводящиеся в экологически чувствительных районах, сопровождаются подводным акустическим мониторингом с использованием одиночных гидрофонов и других более сложных систем, располагаемых в окрестности антропогенного источника и нацеленных на определение границ опасной зоны. Размещение акустических датчиков по всей акватории чрезвычайно затратно и сложно, поэтому измерения проводят в опорных точках, а в остальной области уровни шума получают путём численного моделирования. Численное моделирование в свою очередь требует знания как акустических характеристик источника шума, так и среды распространения. Именно эти вопросы Д.С. Манульчев исследовал в своей работе. Систематическое изучение шумового фона вблизи о. Сахалин, описанное в данной диссертации, является первым примером подобного мониторинга в России, а

по масштабу исследований и в мире. Актуальность, новизна и практическая значимость выбранной темы исследования сомнений не вызывают.

Диссертационная работа Д.С. Манульчева включает в себя введение, одну обзорную и две содержательные главы, заключение и список цитируемой литературы. Небольшое количество содержательных глав является оправданным и компенсируется их достаточно большим объёмом.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы с точки зрения контроля уровней антропогенного шума под водой и его воздействия на морских млекопитающих, раскрыты цели, задачи, практическая значимость и новизна исследования. Три положения, которые вынесены на защиту, отражают все необходимые этапы современного исследования в области подводной акустики, а именно: 1) построение трёхмерной модели среды распространения звука на основе экспериментальных данных, 2) получение эффективных характеристик источника звука по опорным измерениям, 3) непосредственно проведение численного моделирования звукового поля с учётом первых двух пунктов.

В Главе 1 дан достаточно полный обзор известных средств и методов акустического мониторинга, рассмотрены основные типы источников антропогенного шума (морские суда, пневмопушки, сваебойные работы), представлены определения используемых акустических величин для узкополосных и широкополосных сигналов, включая уровень звукового давления (*SPL*) и уровень звукового воздействия (*SEL*), приведены опасные уровни шума для различных видов морских животных. Помимо этого, описаны используемые в работе уникальные технические средства для автономной регистрации акустических сигналов на шельфе (*АПАР*), а также ряд методов трёхмерного численного моделирования на основе модовых параболических уравнений.

В Главе 2 диссертационной работы рассмотрено распространение тональных и импульсных сигналов в неоднородных мелководных волноводах при разных гидрологических условиях, при наличии пространственных неоднородностей осадочного слоя, а также в присутствии сухопутного участка в конце акустической трассы. Нужно особо подчеркнуть, что в каждом случае приведены и экспериментальные данные и результаты численного моделирования, сопоставление которых позволило уточнить геоакустические модели волноводов для указанных сценариев. Параллельно с этим обнаружен ряд новых эффектов, что представляет самостоятельный интерес. Если влияние гидрологии на дальнейшее распространение звука изучалось и ранее, то результаты измерения вариаций интенсивности звукового поля, обусловленные присутствием пространственно

локализованной неоднородности с низкой скоростью звука в толще осадочного слоя, являются пионерскими. Не менее ценны данные по формированию «двойного» волновода, в котором часть энергии распространяется в водном слое, а часть в водном и осадочном слое. Это приводит к тому, что на приёмник приходит два близких по форме импульса, а не один. Важным как с научной, так и с практической точки зрения является результат, который относится к выходу акустической энергии за береговую линию и который может быть использован для оценки (на основе принципа взаимности) интенсивности звукового поля в водной среде, если возбуждение осуществляется находящимся на суше источником.

В Главе 3 предложены и апробированы оригинальные методики оценки спектра антропогенных импульсных источников по измерениям звукового давления на удалённом одиночном гидрофоне в мелководной акватории, а также методики моделирования уровней звукового давления и звукового воздействия широкополосных антропогенных сигналов в волноводах с трёхмерными неоднородностями. Существенно, что указанные методики применимы не только для источников, расположенных в воде (батарея пневмоизлучателей), но и для источников, находящихся на берегу (забивка свай). Апробация методик выполнена путём сопоставления экспериментальных и модельных спектров в различных точках на шельфе о. Сахалин.

Несмотря на общий высокий уровень диссертационной работы, по тексту имеются следующие замечания:

1. В Главе 1 при определении акустических величин допущен ряд неточностей:
 - а. Потери при распространении, введённые формулой (1.2), имеют отрицательный знак, а они должны быть положительными.
 - б. Используется ряд нестандартных терминов: «акустическая экспозиция», «непропорциональные частотные полосы», «индекс рефракции» - вместо традиционных «звуковое воздействие» (иногда «доза шума»), «третьоктавные полосы частот», «коэффициент преломления».
 - с. Формула (1.4) имеет смысл энергии, только если в знаменатель добавить импедансный множитель ρc . Аналогичный множитель должен быть в формуле (1.7), чтобы она определяла мощность.
2. В Главе 2 не приведена методика оценки (уточнения) параметров модельного волновода на основе натуральных акустических данных, а показаны только конечные результаты. Не обозначены доверительные

- интервалы. Положение, выносимое на защиту под номером 1, обосновано недостаточно полно.
3. В Главе 2 для залива Посьета при одних расчётах (где рассматривается эффект «оползня») учитываются сдвиговые волны, а при других расчётах (выход звуковых волн на берег) нет. С чем это связано?
 4. Не совсем понятно, учитывалась ли направленность группы пневмоисточников при расчётах в Главе 3.
 5. В одних моделях геоакустических волноводов границы донных слоёв являются строго горизонтальными (Рис. 3.3), а в других повторяют профиль дна (Рис. 2.26). Чем объясняется такое различие?
 6. В диссертации содержатся опечатки, основные из которых:
 - a. В формулах (1.10), (1.12), (1.13) множители взяты для дискретного варианта, а должны быть для непрерывного.
 - b. В формуле (1.19) ∇ должен обозначать оператор набла, включающий не только частные производные, но и единичные вектора вдоль осей.
 - c. В формуле (1.24) производные давления должны быть не по z , а по нормали к границе раздела вода/дно.
 - d. В формуле (1.34) вместо p_z должно быть $\phi_{j,z}$.
 - e. На стр. 43, в определении вертикального волнового числа пропущен знак корня.
 - f. В определении (1.38) α должна быть с индексами j и m ; в правой части (1.38) индекс m нигде не встречается.
 - g. В названии части 2.1.2 между «потери» и «звука» пропущено «при распространении»; в названии части 2.3 вместо «Геоакустических» должно быть «Геоакустический».

Указанные замечания не меняют общего положительного впечатления от представленной диссертации Д.С. Манульчева и не подвергают сомнению сделанные в ней выводы. Результаты диссертационной работы являются оригинальными, имеют практическую значимость и научную новизну. Они были опубликованы в известных российских и зарубежных рецензируемых журналах («Акустический журнал», «Подводные исследования и робототехника», «Journal of Marine Science and Engineering»), доложены на тематических российских конференциях (Школа-семинар им. акад. Л.М. Бреховских, Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики). Достоверность результатов не вызывает сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Исходя из вышеперечисленного, диссертация Д.С. Манульчева «Методика моделирования антропогенных акустических сигналов на шельфе на основе экспериментальных измерений» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Денис Сергеевич Манульчев заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Луньков Андрей Александрович

кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией гидрофизики
Научного центра волновых исследований
Института общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук (НЦВИ ИОФ РАН)
119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова 38
тел.: (499) 503-87-77 (доб. 3-84)
e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

3 сентября 2024 года

Подпись Лунькова Андрея Александровича заверяю:

ВРИО директора Научного центра волновых исследований
Института общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук (НЦВИ ИОФ РАН)

М.Л. Лямшев

