

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Стробыкина Дмитрия Сергеевича «Исследование влияния полей температур и течений на формирование гидроакустических полей на шельфе Японского моря», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.06 – Акустика

Диссертационная работа Д.С. Стробыкина, посвященная исследованию влияния полей температуры и течений на формирование гидроакустических полей на шельфе Японского моря, относится к широко известному и активно развивающемуся направлению акустики океана - «акустическая томография». Уже это может свидетельствовать о безусловной актуальности работы Д.С. Стробыкина. В связи с этим хочу сделать короткий экскурс в историю отечественной науки об океане. Когда был организован в 1953 г Акустический институт АН СССР, его директор Л.М. Бреховских создал в институте лабораторию, называвшуюся сокращенно ЛАМИО, полное название которой – Лаборатория акустических методов исследования океана, звучит очень современно и в наше время. Этим самым подчеркивалось основное предназначение акустики океана – исследование океана акустическими методами. Диссертация Д.С. Стробыкина лежит в этом русле, и относится к совершенствованию методов акустической томографии в применении к мелкому морю, что является востребованным научным направлением современной гидрофизики. Стоит упомянуть также и географический ареал экспериментальных работ, отраженных в диссертации. Шельфовая зона Японского моря интересна разнообразием гидродинамических процессов, имеющих здесь место. Автору, проведшему на шельфе (вместе с коллегами) большое количество экспериментов с применением акустических методов, удалось продвинуться не только в совершенствовании инструмента акустического зондирования моря, но и в понимании процессов гидрофизики шельфа. Это обстоятельство усиливает значимость диссертационной работы соискателя.

Диссертация Д.С. Стробыкина, состоящая из введения, четырех глав, заключения и приложения, хорошо методически продумана. В первой главе, имеющей вводный характер, дается обширный обзор литературных источников по теме акустической томографии морской среды. Рассмотренные работы включают в себя основные теоретические и экспериментальные исследования влияний неоднородностей различных размеров и природы на формирование акустического поля. При этом автор концентрирует свое внимание на методике натуральных и численных экспериментов, которые с помощью акустического зондирования восстанавливают неоднородности среды (поля течений и температуры). Рассмотрены проблемные вопросы томографии и некоторые способы их решения. В обзор включены также вопросы, касающиеся использования комбинированных приемников в задачах исследования векторно-скалярных характеристик акустических полей в морской среде. В конце главы на основании проведенного анализа современного состояния акустической томографии морской среды автором ставятся три задачи, которые он будет решать в диссертационной работе. Это – 1) разработка методики натуральных и численных экспериментов для решения задач реконструкции поля температур и течений в мелком море по данным акустического зондирования; 2) экспериментальные и теоретические исследования влияния неоднородностей морской среды различного происхождения на формирование импульсных характеристик волновода при зондировании морской среды сложными псевдослучайными сигналами; 3) экспериментальные исследования векторных



характеристик акустических полей при решении задач мониторинга, контроля динамических процессов и наблюдения за подводными объектами в мелком море.

В главе 2 описываются методические и технические решения, которые применялись автором при решении поставленных в диссертации задач. Дается описание метода встречного зондирования, применяющегося для определения скорости течений. Рассматриваются преимущества применения стационарных акустических трасс на шельфе. Приводятся описания технических средств эксперимента на акустических трассах - излучающих, приемных и приемо-излучающих систем (трансиверов), использовавшихся на морском полигоне мыса Шульца и других районах морских экспериментов.

В этой же главе представлены данные о численном моделировании, которое было необходимо автору для сопоставления экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями распространения акустических сигналов. Численное моделирование проводилось на основе известной программы BELLHOP, авторство которой принадлежит американскому акустику Портеру, а также программ, разработанных самим автором. Для расчетов амплитуд и времен приходов по отдельным лучам автором использовался вейвлет Морле – способ, улучшающий сопоставление получаемых расчетных данных с экспериментальными. В целом по этому разделу можно заключить, что автором были успешно разработаны, отобраны и протестированы необходимые программные средства для проведения дальнейшего сопоставления с результатами натурных экспериментов. Также автором уже в натурном эксперименте была проведена необходимая работа по подбору оптимальных параметров излучения при акустическом мониторинге разных условий среды, а также подбору параметров сложных модулированных M-последовательностью сигналов с фазовой манипуляцией.

Главы 3 и 4 содержат результаты морских экспериментальных исследований, проведенных в течение 13 лет при участии автора. Содержание этих глав составляют сердцевину диссертационной работы.

Для Японского моря, имеющего связь с океаном, типична разномасштабная изменчивость, присущая всем водам Мирового океана. Шельфовая зона Японского моря особенно богата различными гидродинамическими процессами, ведущими к обмену энергией, смешением водных масс, генерации течений и др. Все гидродинамические процессы в морской толще накладывают свой отпечаток на распространение там акустических сигналов. Известное всем явление прилива имеет место и в Японском море. На акватории залива Посьет, где проводились морские эксперименты, представленные в диссертации, присутствует неправильный полусуточный прилив с относительно небольшими колебаниями уровня моря (несколько десятков сантиметров). Поскольку приливно-отливные явления присутствуют всегда важно было понять, как влияет изменение уровня моря (баротропный прилив) на импульсные характеристики волновода при проведении экспериментов по акустической томографии. Эта задача была успешно решена соискателем. Эксперимент проводился на полигоне ТОИ ДВО РАН в зимнее время года, когда в шельфовой зоне сезонный термоклин отсутствовал, чтобы исключить влияние на импульсные характеристики внутреннего (бароклинного) прилива, который присутствует здесь всегда при наличии плотностной стратификации, и бывает весьма интенсивным. Экспериментальные данные выявили, что максимальные и минимальные значения времен пробега импульса по выделенному одному характерному лучу соответствуют максимумам и минимумам уровня воды в фазе прилива и отлива соответственно. Проведенные параллельно расчеты показали, что в представленной схеме измерений в зимний период вариации уровня поверхности моря, связанные с приливно-отливными явлениями, изменяют времена прихода, времени, на  $\pm 1$  мс. В заключение по



этому разделу был сделан важный вывод о необходимости при проведении экспериментов по акустической томографии учета влияния изменений уровня моря на времена приходов собственных лучей.

Большой и важный раздел диссертации посвящен экспериментам по исследованию влияния вертикального распределения скорости звука и заходов холодных придонных вод приливного происхождения на характеристики подводного звукового канала. Эксперименты проводились в летне-осенние периоды в разные годы на акустических трассах разной длины и в разных районах Японского моря.

Измерения в августе 2005 г проводились на гидрофизическом полигоне близ мыса Шульца на стационарной акустической трассе длиной 2 км при глубине моря около 45 м. Гидрологические условия тогда характеризовались хорошо развитым придонным термоклином и наличием полусуточного баротропного прилива, который также сопровождался проходом по шельфу внутреннего прилива, вызывавшего значительные вертикальные смещения изотерм водной толщи. Непрерывные наблюдения в течение суток выявили особенности движений водной толщи с приливной периодичностью: подход холодных приливных вод у дна сопровождался одновременно опусканием теплых приповерхностных вод, что указывает на 2-ую бароклинную моду во внутреннем приливе. На эти изменения водной среды чутко реагировала картина распространения акустических приходов. Наблюдалась хорошая корреляция между изменениями температуры воды придонного слоя и временами поздних акустических приходов. При смещении теплой воды в глубинные слои уменьшалось время распространения ранних приходов.

В июне, июле и августе 2009 г были проведены эксперименты в заливе Посьета на трассе длиной 23 км при глубине моря около 110 м. В результате проведенных экспериментов была продемонстрирована зависимость импульсного отклика канала распространения акустической энергии от вертикального распределения скорости звука с глубиной. В сентябре 2010 г в Корейском проливе были проведены эксперименты на трассе длиной 615 м при глубине 8 м. Выявленные ранее особенности реагирования импульсного отклика акустического канала на изменения гидрологических условий были подтверждены в условиях мелководья.

Интересные результаты получены по исследованию особенностей формирования импульсной характеристики волновода на шельфе Японского моря в зависимости от сезонных изменений поля температур. Измерения проводились на акустической трассе у мыса Шульца ежемесячно в 2006 – 2007 годах.

Отдельный большой раздел диссертации посвящен измерению и расчету скорости и направления течений в море методом встречного зондирования. Эксперимент проведен на трассе длиной 2 км у мыса Шульца, ориентированной приблизительно на север на которой излучались и принимались сигналы во встречном направлении. Полученные импульсные характеристики волновода (максимумы которых соответствуют временам приходов акустических сигналов, распространяющихся по разным траекториям вдоль потока и против него) использовались для расчета проекций течений на акустическую трассу вдоль различных лучей и восстановления величины и направления горизонтальных течений. Акустические измерения сопровождалось параллельно независимыми измерениями течений акустическим профилометром течений (ADP), а также регулярными зондированиями CTD –зондом с заякоренной яхты вблизи дальней точки трассы. Также проводились численные расчеты на основании гидрологических данных. В результате анализа данных проведенного эксперимента было выявлено, что в придонном слое течение направлено от берега, а суммарное течение во всем волноводе к берегу. Эти данные оказались хорошо совпадающими с данными о течениях, полученные с помощью



ADP. Также был проведен тестовый эксперимент по исследованию поля течений методом встречного зондирования в б. Витязь. Этот эксперимент продемонстрировал стабильность работы и детектирования сигнала в условиях сильных помех, связанных с судоходством, малой протяженности акустической трассы, небольших глубин и малых скоростей течений. Выявленная погрешность определения скорости течения оказалась в пределах 5-7 см/с. Были продолжены эксперименты на трассе в очень мелком море. Было показано, что на удлиненной трассе (длиной около 1 км) погрешность течений, измеренная методом встречного зондирования достигает 1.5 – 3 см/с, что сопоставимо с погрешностью течений акустических доплеровских профилометров течений.

Небольшой, но важный раздел диссертации посвящен воздействию внутренних волн на характеристики распространения акустических сигналов в шельфовой зоне и на возможности реконструкции параметров этих волн. Шельфовая зона Японского моря по сравнению с материковыми окраинами других районов России отличается наиболее интенсивным полем внутренних волн. Это объясняется в первую очередь регулярным действием приливно-отливных движений и генерацией над материковым склоном внутренних приливных волн, которые распространяясь по шельфу в сторону берега часто распадаются на цуги интенсивных солитоноподобных волн. Как внутренние приливные, так и короткопериодные солитоноподобные внутренние волны достигают здесь больших амплитуд (10 м и более), что сопровождается различными эффектами, в том числе они сильно влияют на структуру акустических приходов и ведут к их сильной изменчивости. Детальный анализ импульсной характеристики зарегистрированной в момент подхода внутренней приливной волны на акустическую трассу выявил периодическое (с периодом около 15 минут) перераспределение акустической энергии между поздними приходами. Независимые измерения вблизи трассы проведенные с помощью ADCP выявили в это время проход по термоклину пакета интенсивных внутренних волн с таким же периодом. По разнице расстояний от точки приема антенны до ADCP и разнице времен проходов двух приборов была определена скорость распространения внутренних волн (28 см/с). Таким образом в приведенном эксперименте были продемонстрированы важные перспективные возможности акустической системой проводить дистанционно исследования внутренних волн и их параметров.

Последняя четвертая глава диссертации посвящена исследованиям пространственной векторно-скалярной структуры звуковых полей на шельфе Японского моря. В ней, в частности, приведены результаты исследования, которые подтвердили принципиальную возможность измерения углов с использованием фазоманипулированных сигналов при приеме на точечный комбинированный приемник. В этой главе автор показывает, что применение векторных приемников в томографических схемах может позволить получить независимый дополнительный параметр импульсной характеристики диагностируемого волновода и, таким образом, повысить эффективность решения прямых и обратных задач гидроакустики.

В целом диссертация Д.С.Стробыкина производит очень хорошее впечатление объемом и качеством представленных результатов. Диссертацию отличает новизна и достоверность результатов. Она написана на высоком научном уровне. У меня даже возникают затруднения в поисках недостатков работы, которые обычно обнаруживаются даже в очень сильных работах. Ниже перечисляю небольшие неточности в диссертации, которые в большинстве имеют редакционный характер и не умаляют общий высокий научный уровень работы.



По всему тексту диссертации, когда упоминается ADP или ADCP желательно указывать марку прибора, поскольку в этом случае для специалистов становится ясен диапазон работы этих приборов и другие его характеристики.

Стр. 44. При обсуждении статьи Гончарова и др. автор пишет: «измерения ADP в придонном слое давали неверные результаты ввиду отсутствия объемных рассеивателей». ADP на самом деле не давал неверные результаты, он просто был ограничен диапазоном рабочих глубин прибора.

Стр. 114. В подписи к Рис. 3.1. (б) правильнее написать «ход изотерм во времени».

Стр. 120. Во фразе «...уменьшается время распространения ранних приходов, это соответствует опущению теплой воды...», лучше заменить «опущение» на «смещение вниз».

Стр. 137. Опечатка на оси времени Рис. 3.13.

Отдельные работы автора, входящие в диссертацию, прошли научную апробацию на многих всероссийских и международных конференциях. Автором опубликовано 18 работ в рецензируемых журналах, из них 16, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертаций. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Исследование влияния полей температур и течений на формирование гидроакустических полей на шельфе Японского моря» полностью соответствует требованиям п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор, **Стробыкин Дмитрий Сергеевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.06 – Акустика.

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук,

Главный научный сотрудник Лаборатории Акустики океана

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук

Тел +79161106453, Эл. почта [serebryany@hotmail.com](mailto:serebryany@hotmail.com)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва 117997, Нахимовский проспект, 36.



Серебряный Андрей Нинелович

3 декабря 2020 г

Подпись д-ра физ.-мат. наук А.Н. Серебряного удостоверяю

Ученый секретарь Института океанологии им. П.П. Ширшова,

канд. геогр. наук

А.С. Фалина

