

УДК 534.23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКАЛЯРНО-ВЕКТОРНОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ЗАЛИВЕ ПОСЬЕТА

**Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин,
Г.В. Косарев, Ю.Г. Ларионов, Д.В. Злобин**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

В работе выполнено экспериментальное исследование звуковых полей в мелком море. Эксперимент проводился в заливе Посьета с использованием комбинированных приемников и буксируемого заглублённого источника звуковых сигналов. Исследуемый диапазон рабочих частот составлял 83–243 Гц. Измерения выполнялись для различных глубин буксировки источника звука и различных горизонтов приёма. Целью эксперимента являлось изучение пространственно-частотной структуры звукового поля в мелком море в скалярно-векторном описании его основных характеристик, а также сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими оценками, полученными в рамках обобщённой теории волновых процессов в слоистых средах. Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими оценками позволило выявить существенную нерегулярность звукового поля в горизонтальной плоскости и наличие значительной по уровню реверберационной помехи, связанной с присутствием берегового клина вблизи приёмной системы и вблизи самой трассы буксировки источника звуковых сигналов. Анализ шумового поля позволил выявить анизотропную составляющую, связанную, по мнению авторов, с наличием техногенных источников шумовой помехи, расположенных в бухте Троицы.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментально-теоретическому исследованию скалярно-векторной структуры звуковых полей посвящено достаточно большое количество работ, включая монографии известных специалистов [1–4]. Основным недостаток экспериментальных работ, на которые ссылаются авторы монографий, посвящённых исследованию скалярно-векторной структуры звуковых полей, заключается в том, что в них приводятся результаты единичных экспериментов, полученных в конкретных условиях, затрудняющих сопоставительный анализ экспериментальных данных. Однако сами результаты, как правило, не содержат экспериментальной оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника и описания конкретной методики её определения.

Исключение составляет работа [2], в которой приведены достаточно полные и систематизированные исследования скалярно-векторной структуры звуковых полей по результатам многочисленных экспериментальных исследований. В этой же работе даны оценки помехоустойчивости комбинированного приёмника, полученные экспериментально, но её результаты относятся к условиям глубокого моря и сравнительно высоким частотам. В последние годы значительно возрос интерес к исследованию звуковых полей в шельфовой зоне с использованием комбинированных приёмников, которые позволяют получить наиболее полное и соответственно наиболее информативное описание звукового поля. Кроме того, крайне желательно сопоставление экспериментальных результатов

с теоретическими оценками, которые в известных работах [1–4] фактически отсутствуют.

1. Гидрофизические условия проведения эксперимента

Экспериментальные исследования скалярно-векторной структуры звукового поля проводились сотрудниками лаборатории гидроакустических навигационных систем Института проблем морских технологий ДВО РАН на акватории залива Петра Великого Японского моря осенью 2014 г. совместно с сотрудниками Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН. В качестве источника звуковых сигналов ис-

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.
Тел.: (423) 243-25-78. E-mail: kasatkas@marine.
febras.ru, zlobina@marine.febras.ru

пользовался пьезокерамический буксируемый излучатель (изделие «Днестр») с рабочими частотами 83, 123, 163, 203, 243 Гц, представленный для выполнения экспериментальных работ сотрудниками Отдела технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН. На рис. 1 показаны его внешний вид и момент подготовки излучателя к работе.

Уровень излучения, приведённый к расстоянию в 1 м, на частоте 243 Гц составлял 1300 Па, с понижением частоты уровень излучения уменьшался, а на частоте 83 Гц составлял 100 Па. В качестве приёмной системы использовалась пара комбинированных приёмников, подготовленных к работе сотрудниками лаборатории акустических шумов океана ТОИ ДВО РАН. Комбинированные приёмники установлены на горизонтах $z_0 = 11$ м, $z_0 = 17$ м при глубине места 34 м. Основная цель такого эксперимента заключалась в организации системных исследований помехоустойчивости комбинированного приёмника в условиях мелкого моря на низких частотах. Схема расположения трасс на акватории залива Петра Великого поясняется рис. 2. Место расположения приёмной системы помечено буквой П. Нумерация трасс 1–5 со-

ответствует рабочим частотам 243, 203, 163, 123, 83 Гц. Протяжённость каждой из первых трёх трасс составляет 8 миль, протяжённость каждой из двух последних трасс составляет 10 миль, скорость буксировки излучателя составляла 2 узла. Стрелки на трассах указывают направление движения судна с буксируемым излучателем.

Средняя глубина моря на трассах 1–3 составляла 40 м, средняя глубина моря на трассах 4, 5 составляла 50 м. Буксируемый излучатель работал либо в тональном режиме, либо в импульсном режиме. Длительность сеанса в каждом из режимов составляла 30 минут, так что протяжённость трассы для каждого сеанса соответствовала 1 миле. В импульсном режиме длительность импульса составляла 2 с, а пауза между импульсами равнялась 20 секундам. Можно отметить, что во время сеанса импульсного излучения уровень фоновых шумов во время паузы увеличивался на 3–5 дБ за счёт реверберации, связанной с отражением импульсного сигнала от береговой черты, а также с генерацией сходящихся волн отдачи при распространении расходящихся волн. Волнение моря во время проведения эксперимента не превышало 2–3 баллов.

По результатам многолетних наблюдений, изложенных, например, в монографии [5], приповерхностный слой морского дна в районе залива Посьета сложен в основном известняковой щебёнкой, перемешанной с песком, параметры которого и используются в модельных расчётах. Скорость звука в осенний период изменяется с глубиной в районе проведения эксперимента в пределах 1495–1505 м/с, а в модельных расчётах принимается её среднее значение. Такое упрощение модельного описания связано с тем, что профиль скорости звука $c(z)$ и связанные с ним эффекты фокусировки звука на низких частотах эксперимента не играют существенной роли.

Первая, довольно простая, но достаточно универсальная физическая модель рабочей среды при исследовании звуковых полей в мелком море была предложена К.Л. Пекерисом в 1948 г. [6] и получила в дальнейшем название модельного волновода Пекериса. В этом модельном описании волновод Пекериса представляет собой жидкий однородный слой толщиной h , лежащий на жидком однородном полупространстве. Физические потери звуковой волны при распространении в этом модельном описании не учитыва-

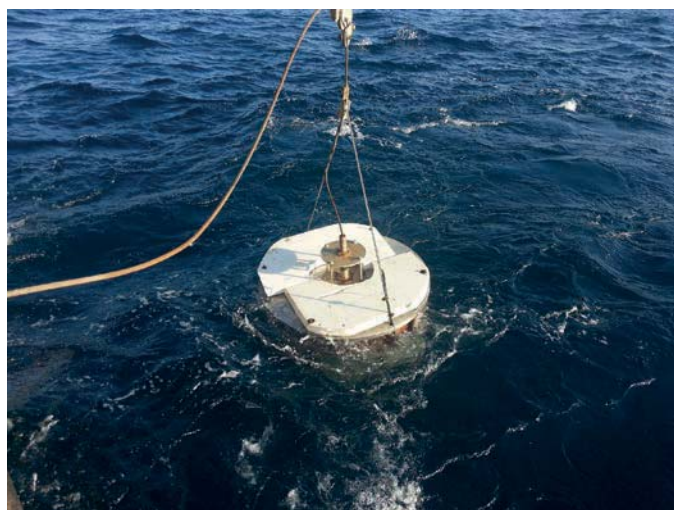


Рис. 1. Внешний вид излучателя и его подготовка к работе

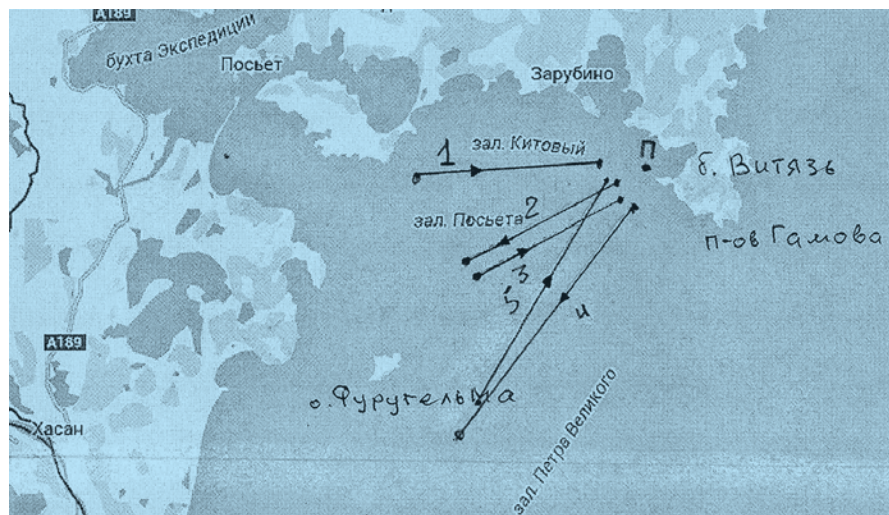


Рис. 2. Схема расположения трасс на акватории залива Петра Великого

некорректными, а потому не имеют единственного решения.

При определении математической модели процесса распространения звуковых волн в слоистой среде, как правило, используется волновое уравнение, записанное относительно звукового давления или потенциала скорости, которое сводится к уравнению Гельмгольца при гармонической зависимости от времени всех искомых величин. Соответствующая граничная задача, описывающая процесс распространения звуковых волн в модельном волноводе Пекериса, впервые была сформулирована в работе Пекериса [6]. Среди известных решений граничной задачи Пекериса наиболее простым является решение Л.М. Бреховских, впервые предложенное в работе [7]. Более универсальным является обобщённое решение граничной задачи Пекериса, изложенное в работе [8]. При выполнении модельных расчётов звуковых полей мы будем использовать обобщённое решение.

Шумовая обстановка в районе проведения эксперимента в дневное время сильно зависит от присутствия в нём посторонних судов различного класса, которые увеличивают уровень фонового шума. Поэтому уровень фоновых шумов моря измерялся в ночное время, когда посторонние источники шума отсутствовали. Спектральная плотность мощности шума в гидрофонном канале в районе проведения эксперимента представлена на рис. 3 (логарифмическая шкала произвольная).

2. Полный набор характеристик, описывающих скалярно-векторную энергетическую структуру звукового поля (модельное описание)

При буксировке излучателя вдоль трассы на выходе комбини-

ются. Физическая модель полностью характеризуется заданием плотности и скорости звука в жидком слое ρ_1 , c_1 , плотности и скорости звука в жидком полупространстве ρ_2 , c_2 , горизонтом излучения z_0 и толщиной волновода h_1 .

Дальнейшее усложнение физической модели сводится к учёту неоднородности волновода по скорости звука, которая задаётся профилем вертикального распределения скорости $c_1(z)$, учёту слоистой структуры донного полупространства и наличию в нём сдвиговой упругости, а также к учёту нерегулярности самого волновода. В этом усложнённом модельном описании каждый слой слоистого полупространства характеризуется заданием его толщины h_n , плотности ρ_n и скорости продольных и поперечных волн c_{Ln} , c_{tn} в каждом слое. Учёт нерегулярности волновода сводится, как правило, к учёту клиновидности собственно волновода, что существенно только при рассмотрении звуковых полей в шельфовой зоне и при распространении звуковых волн в направлении, перпендикулярном береговой черте. Физические потери на распространение звуковой волны учитываются соответствующими коэффициентами затуха-

ния продольных и поперечных волн α_{Ln} , β_{tn} .

Понятно, что любое усложнение физической модели рабочей среды связано с необходимостью определения всех параметров усложнённой модели по результатам дополнительных экспериментальных и теоретических исследований. Как правило, такие дополнительные параметры могут быть найдены на основе решения обратных задач, которые по определению являются некорректными, а потому служат источником дополнительных погрешностей определения самой физической модели. С учётом этого можно утверждать, что параметры простейшего волновода Пекериса можно вычислить по результатам прямых измерений глубины моря и акустических параметров водной среды и грунта в месте проведения эксперимента, и в этом смысле они являются физически определяемыми. В усложнённой модели слоистого волновода все параметры физической модели являются, по существу, виртуальными. Они рассчитываются не по результатам прямых физических измерений, а на основе решения некоторых обратных задач, которые, как отмечено выше, являются

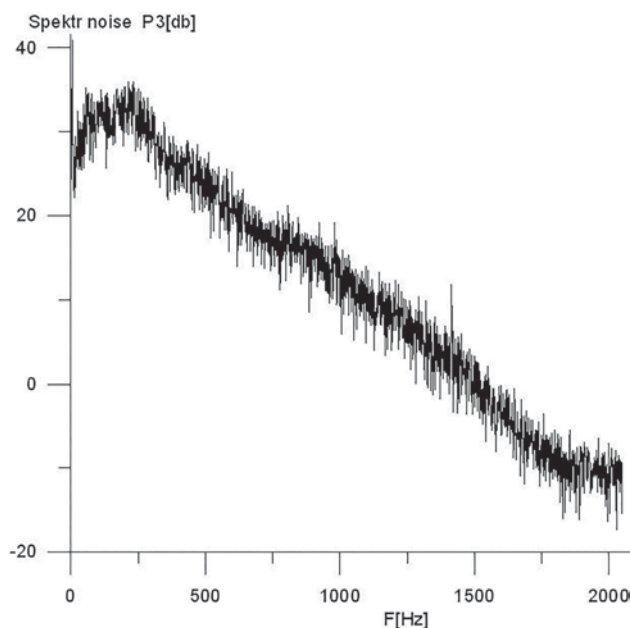


Рис. 3. Спектральная плотность мощности шума в районе проведения эксперимента

интенсивности от расстояния достаточно хорошо коррелированы. Горизонтальные компоненты вектора интенсивности в основном сохраняют свой знак на горизонтальном разрезе. Исключение составляют случаи перехода источника звука в другой квадрант и возможная инверсия горизонтального потока мощности. Вертикальная компонента вектора интенсивности в основном является знакопеременной величиной с нулевым средним. Исключение составляет случай появления в суммарном сигнале шумовой составляющей, которая генерируется на поверхности моря и всегда направлена в сторону морского дна. Для учёта знака векторных величин на проходных характеристиках знак векторной величины присваивался знаку логарифма.

Аналогами проходных характеристик в модельных расчётах являются горизонтальные разрезы звукового поля для соответствующих полевых величин при фиксированных значениях горизонтов излучения и приёма. Горизонты излучения и приёма, принятые в расчётах, соответствуют экспериментальным. Результаты модельных расчётов поясняются рис. 4–9. Диапазон изменения горизонтальной координаты на рис. 4–8 примерно соответствует максимальному расстоянию 10 миль на экспериментальных трассах буксировки излучателя. На рис. 4–8 все величины представлены в логарифмическом масштабе, что удобно для сравнения их с экспериментальными результатами.

Модельные расчёты основных характеристик звукового поля описывают наиболее характерные особенности звукового поля в модельном волноводе, параметры которого заведомо отличаются от параметров реального волновода. Можно полагать, что модельные

рованного приёмника регистрируются сигналы, пропорциональные звуковому давлению и компонентам вектора колебательного ускорения. Принимаемые сигналы содержат шумовую помеху (шумы моря и шумы судна), которая представлена в основном сплошным спектром, и рабочий (узкополосный) сигнал, представленный дискретной составляющей. Полоса частот, соответствующая дискретной составляющей, определяется исключительно эффектом Доплера и составляет величину порядка 0,1% от частоты рабочего сигнала. После выделения дискретной составляющей методами БПФ вычисляются проходные характеристики в виде зависимостей модуля комплексной амплитуды соответствующей спектральной составляющей для звукового давления и компонент вектора колебательного ускорения от времени наблюдения на трассе, которое всегда может быть пересчитано в расстояние от излучателя до приёмной системы по средней скорости буксировки.

Затем вычисляются так называемые «проходные характе-

ристики» для квадрата звукового давления, вещественной и мнимой составляющих комплексного вектора интенсивности. Они представляют собой зависимости соответствующих полевых величин от времени прохода судна с буксируемым источником сигнала мимо приёмной системы. Соответствующие расчётные формулы для мультипликативной обработки являются типичными и приведены, например, в монографии [2]. При анализе энергетической структуры звукового поля наибольший интерес представляют проходные характеристики по квадрату звукового давления $|p|^2$ (по скалярной интенсивности) и компонентам вектора интенсивности

$$I_x = \text{Re}(pv_x^*), I_y = \text{Re}(pv_y^*), \\ I_z = \text{Re}(pv_z^*),$$

которые являются вещественными составляющими соответствующих комплексных величин, v_x , v_y , v_z — компоненты вектора колебательной скорости.

Как правило, зависимости уровня звукового давления и горизонтальных компонент вектора

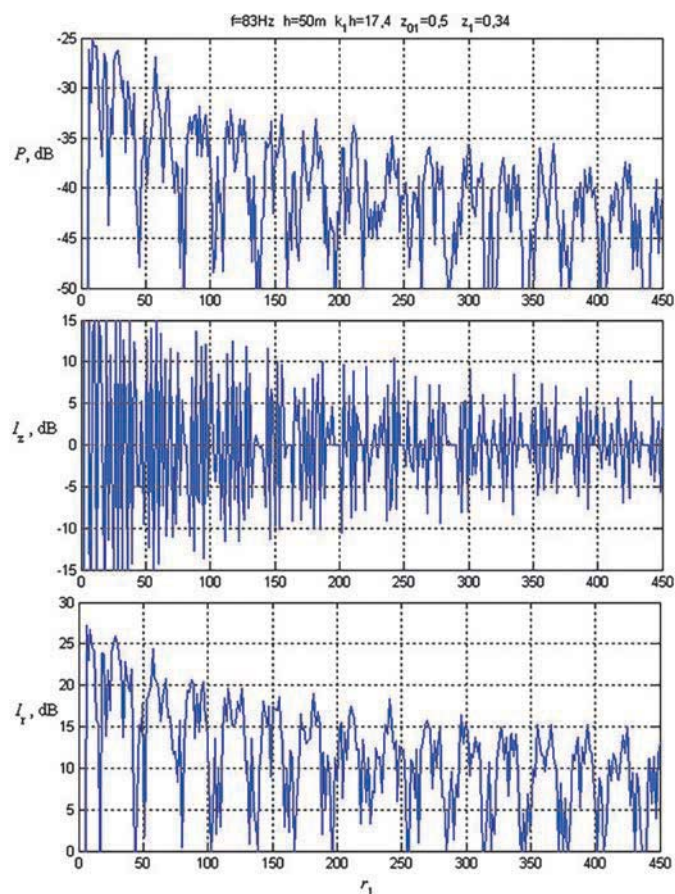


Рис. 4. Горизонтальные разрезы звукового поля на частоте 83 Гц

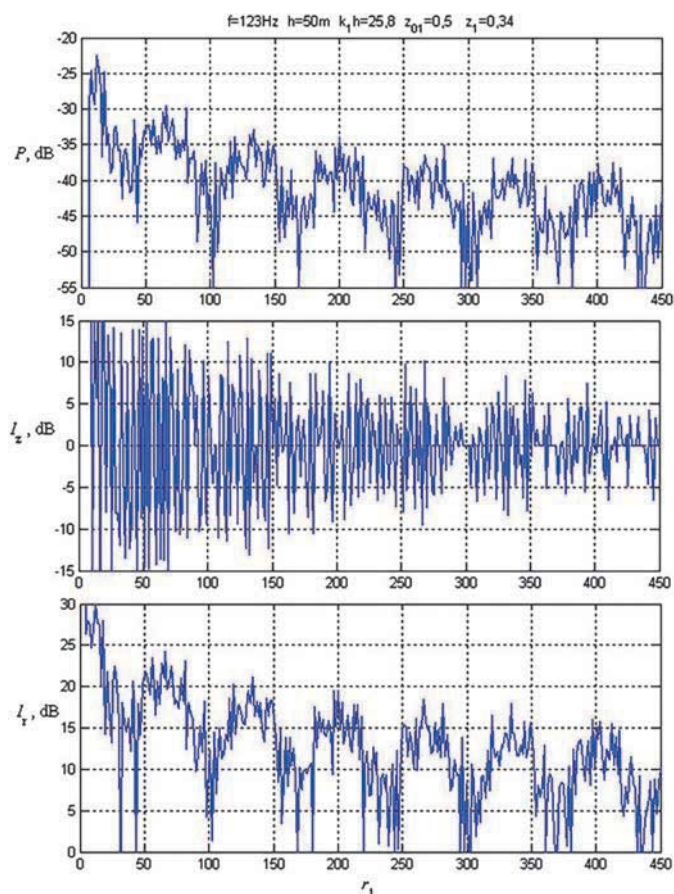


Рис. 5. Горизонтальные разрезы звукового поля на частоте 123 Гц

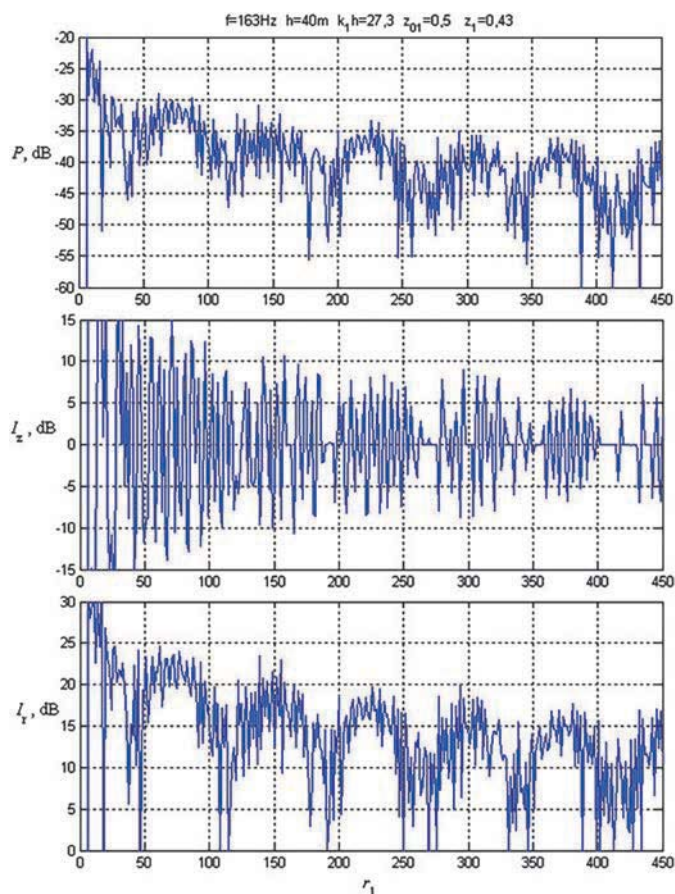


Рис. 6. Горизонтальные разрезы звукового поля на частоте 163 Гц

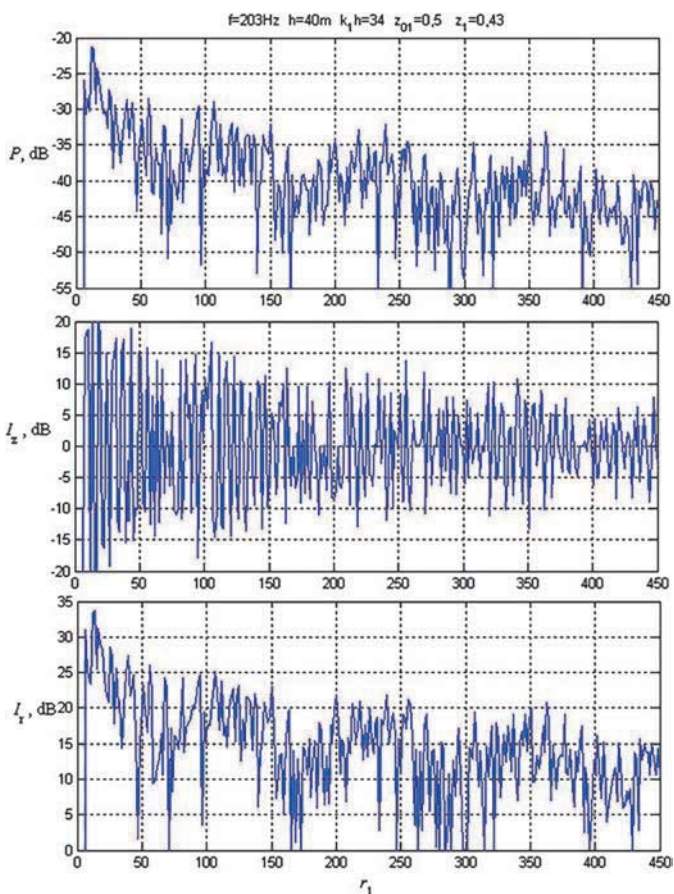


Рис. 7. Горизонтальные разрезы звукового поля на частоте 203 Гц

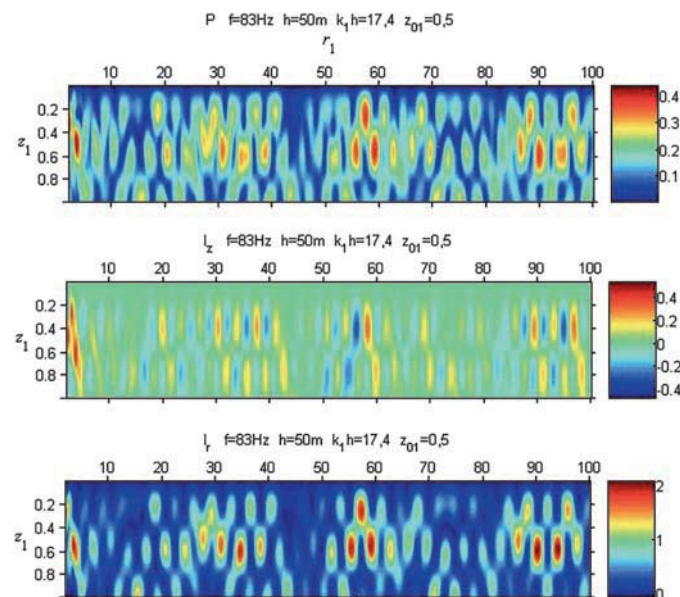
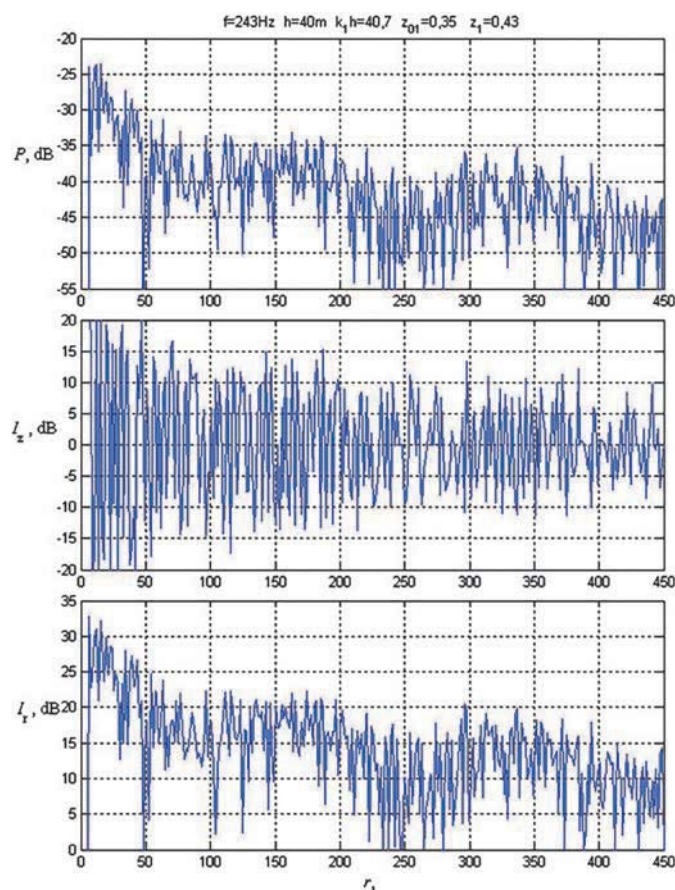


Рис. 9. Трёхмерная структура звукового поля для компонент $|p|$, I_x , I_y на частоте 83 Гц

Рис. 8. Горизонтальные разрезы звукового поля на частоте 243 Гц

расчёты будут качественно соответствовать экспериментальным результатам только при описании интерференционной структуры звукового поля различных пространственных масштабов. Крупномасштабная интерференционная структура определяется в основном числом нормальных волн, формирующих звуковое поле, которое зависит от частотного параметра $k_1 h$ и от типа модельного описания.

На рисунках отчетливо проявляется крупномасштабная интерференционная структура звукового поля, причём максимальный период интерференции тем больше, чем больше значение частотного параметра $k_1 h$. Мелкомасштабная интерференционная структура звукового поля определяется наличием в модельном описании сходящихся волн отдачи, которые присутствуют только в обобщённой теории [8] и отсутствуют в

классическом описании [7]. Минимальный период интерференции, соответствующий мелкомасштабной интерференционной структуре, составляет половину длины волны.

3. Первичная цифровая обработка экспериментальных результатов

По результатам эксперимента был получен большой объём экспериментальных данных, записанных в цифровом виде на выходе каждого из двух комбинированных приёмников. Для текущего контроля за ходом эксперимента в реальном масштабе времени вся информация передавалась по кабелю на береговой пост обработки данных. Вся последующая обработка экспериментальных данных проводилась в лабораторных условиях на основе массива цифровых

данных, полученных в лаборатории акустических шумов океана ТОИ ДВО РАН. Нами была выполнена цифровая обработка сигналов на всех пяти трассах для двух комбинированных приёмников (приёмник № 2 и приёмник № 3) и двух режимов работы излучателя, тонального и импульсного.

Можно отметить близкое соответствие проходных характеристик для двух комбинированных приёмников по уровню регистрируемого сигнала, а также по интерференционной структуре звукового поля на проходных характеристиках. Однако имеют место и принципиальные особенности, которые ниже будут обсуждаться более подробно. Следует отметить, что интерференционная структура, регистрируемая в вертикальных каналах двух векторных приёмников, отличающихся горизонтом расположения, также может иметь принципиальные различия.

Уровень сигнала на первых трёх трассах, соответствующих рабочим частотам 243 Гц, 203 Гц, 163 Гц, достаточно велик, поэтому ниже представлены только участки проходных характеристик, соответствующие максимальному

удалению излучателя от приёмной системы ($r = 8-9$ миль). Соответствующие фрагменты проходных характеристик приведены на рис. 10–12. Для таких расстояний отношение сигнал/шум составляет не менее 20 дБ. На этих трассах влияние шумовой помехи минимально, а сами они представляют определённый интерес для сравнения экспериментальных результатов с модельными расчётами звукового поля. По результатам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы.

Проходные характеристики для горизонтальных компонент вектора интенсивности содержат аномальные участки, на которых горизонтальные компоненты становятся знакопеременными при сохранении прямолинейного движения судна, буксирующего излучатель. Подобная инверсия

горизонтального потока мощности отмечалась ранее в работе [9] в качестве локальной особенности поля вектора интенсивности. Однако никакого объяснения этому явлению работа не содержит. Необычность самого явления инверсии горизонтального потока мощности заключается в том, что в модельном описании, предполагающем осевую симметрию звукового поля, горизонтальная компонента вектора интенсивности остаётся в основном положительно определённой и изменяется только по величине. Исключение из этого правила имеет место при наличии в суммарном поле сходящихся волн отдачи, которые появляются в обобщённом описании звуковых полей в слоистых средах.

Наблюдаемую аномалию звукового поля можно также объ-

яснить наличием в точке приёма значительной реверберационной помехи. Такая помеха связана с присутствием в суммарном сигнале лучей, идущих с отражением от береговой черты (от берегового клина), что также ведёт к появлению встречных волн (сходящихся волн отдачи). Реверберационная помеха проявляется в наибольшей степени на удалённых от приёмной системы участках трассы, где уровни помехи и прямого сигнала оказываются соизмеримыми. По этой причине влияние реверберационной помехи в наибольшей степени сказалось на трассе № 1, которая проходит вдоль береговой черты на минимальном расстоянии от берегового клина, и в наименьшей степени – на трассе № 3, удалённой от берегового клина.

Иначе говоря, исследуемое звуковое поле в мелком море

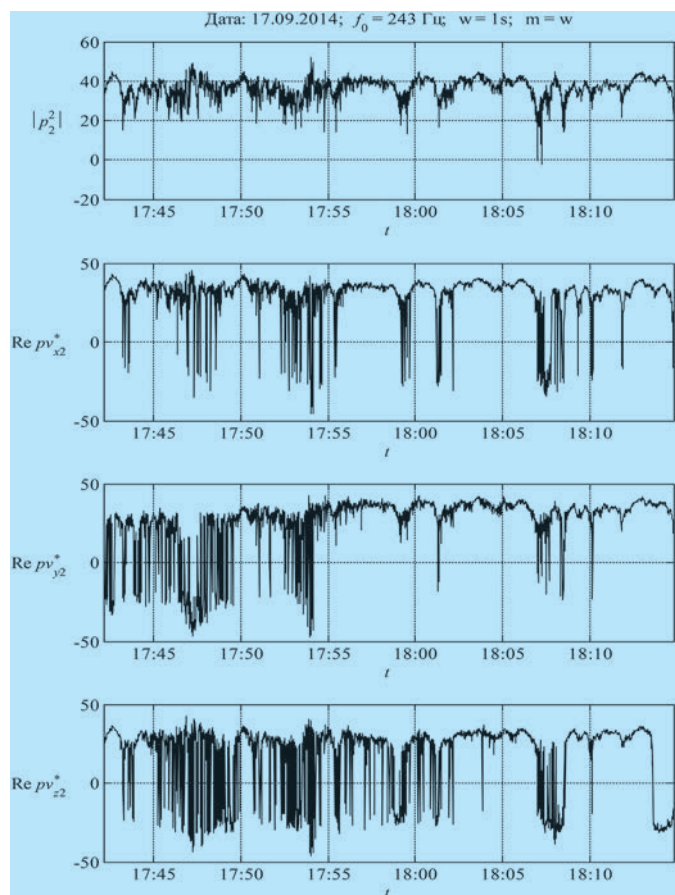


Рис. 10. Проходные характеристики на трассе № 1 (рабочая частота 243 Гц), $r = 8-9$ миль

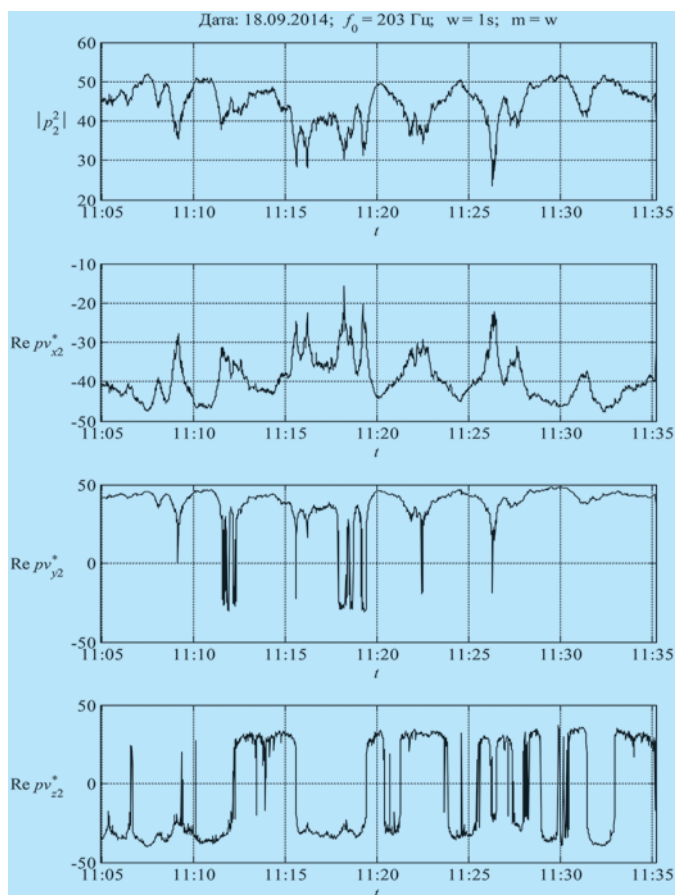


Рис. 11. Проходные характеристики на трассе № 2 (рабочая частота 203 Гц), $r = 8-9$ миль

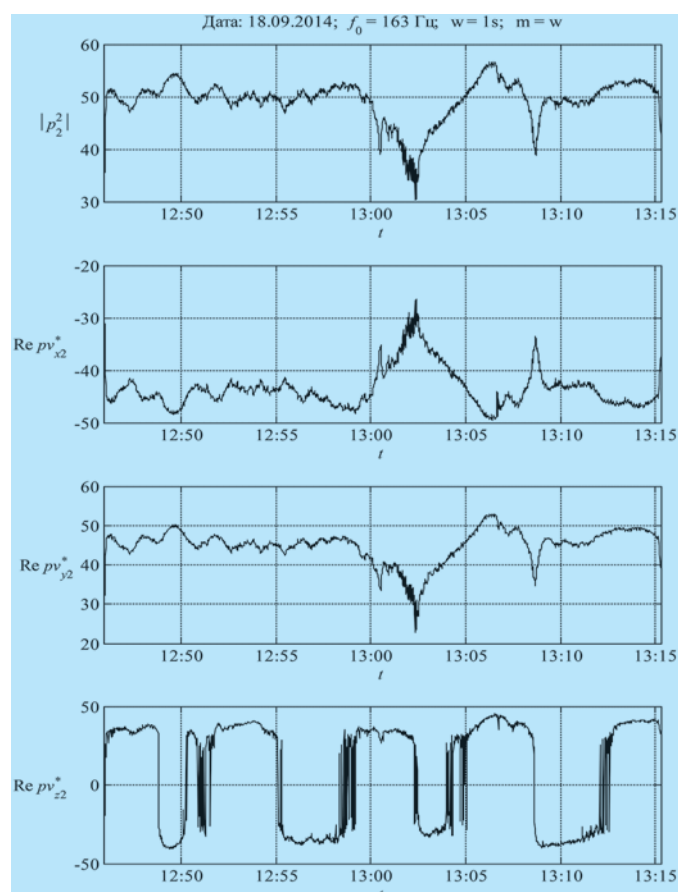


Рис. 12. Проходные характеристики на трассе № 3 (рабочая частота 163 Гц), $r = 8-9$ миль

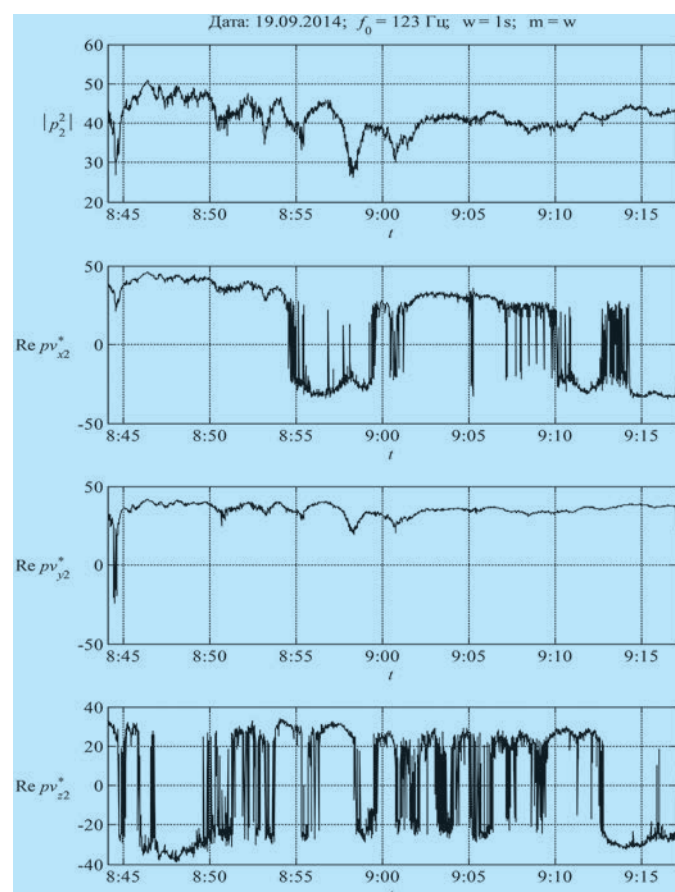


Рис. 13. Проходные характеристики на трассе № 4 (рабочая частота 123 Гц), $r = 2-3$ мили

принципиально является трёхмерным, нерегулярным в горизонтальной плоскости, причём нерегулярность связана в основном с наличием берегового клина вблизи приёмной системы либо вблизи самой трассы. В модельном описании звуковое поле считается осесимметричным, а волновод – однородным по глубине, однако такие модельные условия могут быть реализованы только в условиях открытого моря вдали от береговой черты. К сожалению, модельные описания трёхмерных звуковых полей, нерегулярных в горизонтальной плоскости, практически отсутствуют.

Для двух других трасс, соответствующих рабочим частотам 123 Гц, 83 Гц, уровень сигнала существенно ниже, а отношение сигнал/шум для максимально удалённых участков трасс приближается

к нулю. Соответствующие проходные характеристики поясняются рис. 13–15. На этих трассах влияние шумовой помехи весьма существенно, а сами они представляют определённый интерес для отработки алгоритмов, повышающих помехоустойчивость комбинированного приёмника. Для сравнения экспериментальных результатов с модельными расчётами на рис. 16 приведён фрагмент горизонтального разреза поля звукового давления для частоты 83 Гц, соответствующий проходной характеристике, представленной на рис. 15.

Малое отношение сигнал/шум на проходной характеристике затрудняет сопоставление в деталях экспериментальных данных и данных модельных расчётов. Можно отметить только качественное соответствие результа-

тов модельных расчётов экспериментальным данным, которое проявляется в близком соответствии максимального периода интерференционных структур. По нашим оценкам, он составляет примерно 1500 м. Выше отмечалось, что максимальный период интерференционных структур определяется числом нормальных волн, формирующих звуковое поле, которое, в свою очередь, зависит от частотного параметра $k_1 h$ и типа модельного решения. В обобщённом модельном решении, которое используется нами для моделирования звуковых полей, число нормальных волн, формирующих суммарное звуковое поле, вдвое больше, чем в классическом модельном решении [7]. Это означает, что при выборе классического модельного описания максимальный период

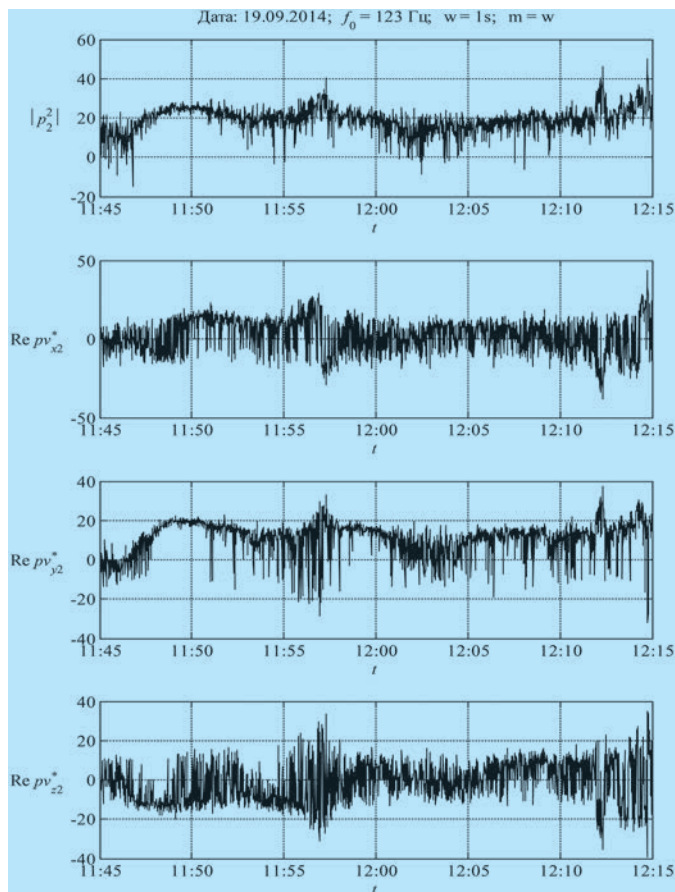


Рис. 14. Проходные характеристики на трассе № 4 (рабочая частота 123 Гц), $r = 8\text{--}9$ миль

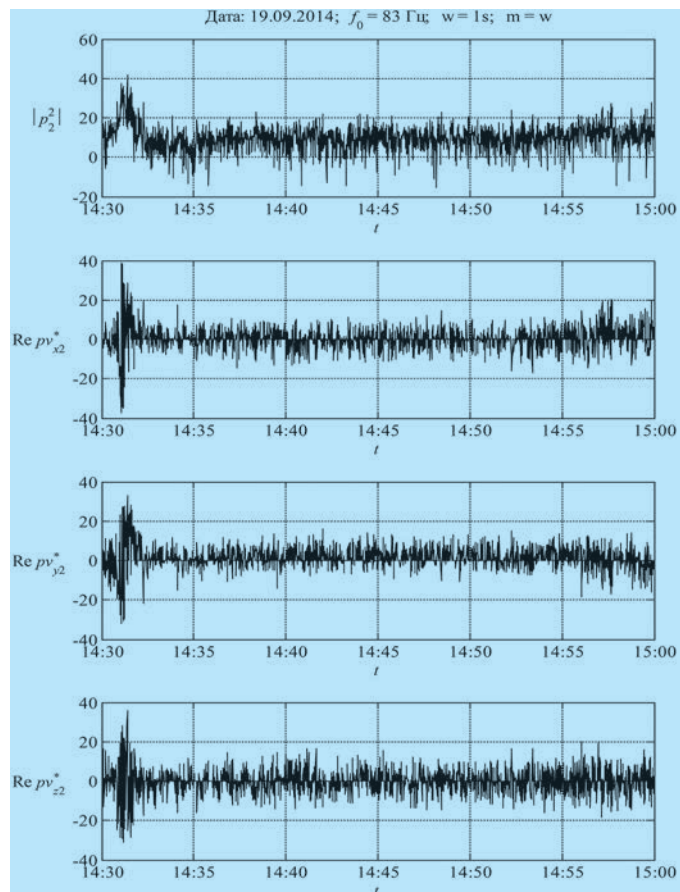


Рис. 15. Проходные характеристики на трассе № 5 (рабочая частота 83 Гц), $r = 9\text{--}10$ миль

интерференции составил бы 750 м, что хуже соответствует экспериментальным результатам.

Кроме того, обобщенное модельное описание предсказывает формирование мелкомасштабных интерференционных структур в суммарном звуковом поле с периодом в половину длины вол-

ны. Такие структуры хорошо наблюдаются в экспериментальных данных, приведённых, например, в работе [9] и полученных при высоком отношении сигнал/шум, а также на проходных характеристиках, приведённых на рис. 10–15, полученных при самых различных величинах отношения

сигнал/шум. Наиболее отчетливо мелкомасштабные интерференционные структуры наблюдаются в вертикальном канале векторного приёмника в виде вихревой составляющей вектора интенсивности, формирующей структуры типа стоячей волны с периодом $\lambda/2$.

Ещё одна особенность проходных характеристик на трассе № 5 заключается в том, что уровень сигнала в векторных каналах, зарегистрированного в присутствии шумовой помехи, т.е. уровень сигнала плюс шума заметно ниже уровня собственно шумовой помехи, зарегистрированного в отсутствие сигнала в тех же векторных каналах соответственно. Такая ситуация невозможна, например, на выходе гидрофонного канала, где сигнал и шумовая помеха складываются энергетически

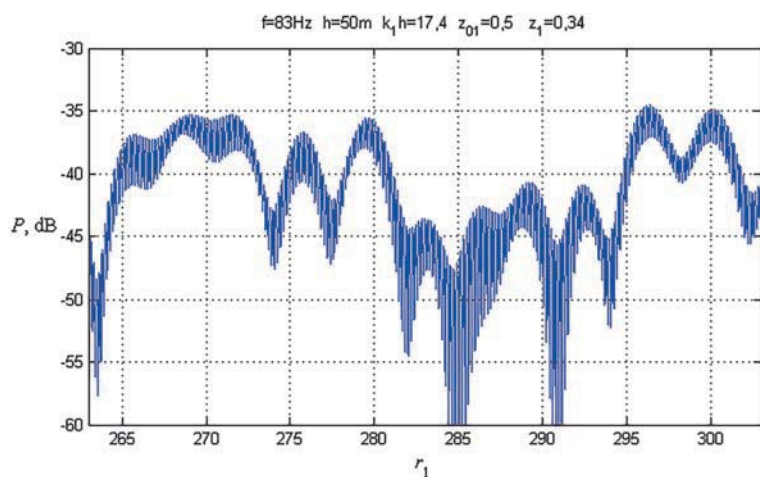


Рис. 16. Горизонтальный разрез поля звукового давления на частоте 83 Гц

с увеличением уровня суммарного сигнала плюс шум. Однако в векторных каналах суммируемые потоки мощности могут быть либо однонаправленными, либо встречными. При суммировании однонаправленных потоков мощности происходит увеличение уровня суммарного потока мощности, и в этом смысле векторный канал ведёт себя аналогично гидрофонному каналу. При суммировании встречных потоков мощности суммарный поток мощности уменьшается с одновременным образованием структуры типа стоячей волны с периодом $\lambda/2$ с нулевым средним потоком мощности. Такое явление можно назвать компенсацией горизонтальных потоков мощности, которая может быть либо полной, либо частичной.

Явление компенсации потоков мощности в вертикальном канале векторного приёмника впервые было описано в монографии [2]. В этой работе подробно рассмотрен случай, когда поток мощности в поле шумовой помехи, генерируемый поверхностными источниками звука, связанными, например, с атмосферными явлениями, компенсировался потоком мощности в поле тонального источника после его отражения от морского дна. Явление компенсации встречных потоков мощности, описанное в этой работе, приводило к уменьшению на 30 дБ суммарного потока мощности в вертикальном канале. Само явление компенсации встречных потоков мощности, по мнению автора работы [2], может служить надёжным информационным признаком присутствия источника сигнала в шумовом поле помехи. Наблюдаемая на трассе № 5 компенсация горизонтальных потоков мощности сигнала

и помехи имеет ту же самую физическую природу и может иметь аналогичное прикладное применение. Для выяснения физической природы компенсации горизонтальных потоков мощности необходимо выяснить природу шумового поля, в котором в простейшем случае можно выделить изотропную и анизотропную составляющие.

4. Вторичная цифровая обработка экспериментальных результатов

Следуя работе [10], для увеличения помехоустойчивости комбинированного приёмника можно усреднить изотропную составляющую помехи, полагая, что уровень сигнальной составляющей, которая по своей природе является анизотропной, при таком усреднении не изменится. Шумовые характеристики на выходе комбинированного приёмника на частоте 83 Гц до усреднения изотропной помехи показаны на рис. 17. Изотропная составляющая помехи на проходных характеристиках проявляется в виде знакопеременной составляющей и присутствует во всех трёх векторных каналах, что подтверждает равную вероятность её появления во всём угловом пространстве.

Результат усреднения изотропной составляющей помехи за время усреднения 50–150 с представлен на рис. 18. Можно отметить, что усреднение изотропной составляющей помехи уменьшает её уровень на 5–7 дБ и соответственно увеличивает помехоустойчивость комбинированного приёмника на 5–7 дБ при прочих равных условиях. Этот результат хуже описанного в работе [10], что можно объяснить большим уров-

нем анизотропной составляющей в поле шумовой помехи. Сама анизотропная составляющая связана, по-видимому, с наличием источника техногенных шумов в бухте Троицы, где расположены рыбный порт, портовые сооружения, железная дорога и прочие технические объекты.

Шумы техногенного происхождения генерируются на побережье б. Троицы и создают поток мощности, направленный в целом в сторону открытого моря, т.е. в южном направлении. Понятно, что наличие большой по уровню анизотропной составляющей в поле помехи, которая не усредняется при любом разумном времени усреднения, затрудняет выявление полезного сигнала. С другой стороны, само явление компенсации горизонтальных потоков мощности в суммарном поле сигнала и анизотропной составляющей поля помехи может иметь определённое полезное применение, как это отмечено в работе [2] на примере компенсации вертикальных потоков мощности в суммарном поле сигнала и помехи.

ВЫВОДЫ

В результате проведённых исследований получен обширный экспериментальный материал, обработка которого позволит получить новые знания относительно скалярно-векторной структуры звуковых полей, формируемых в наиболее сложных условиях шельфовой зоны. Новизна экспериментального материала заключается в том, что он получен в широком диапазоне частот, в широком диапазоне изменения расстояний между приёмной системой и источником сигнала, а также в известных гидрофизических условиях и известной

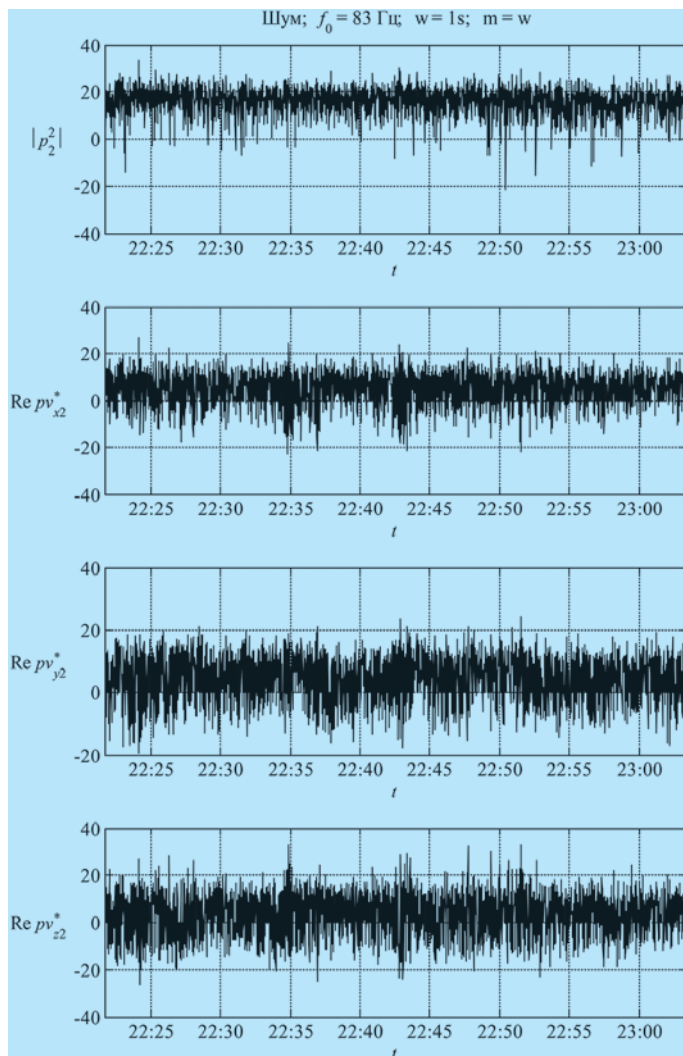


Рис. 17. Шумовая составляющая на выходе комбинированного приёмника

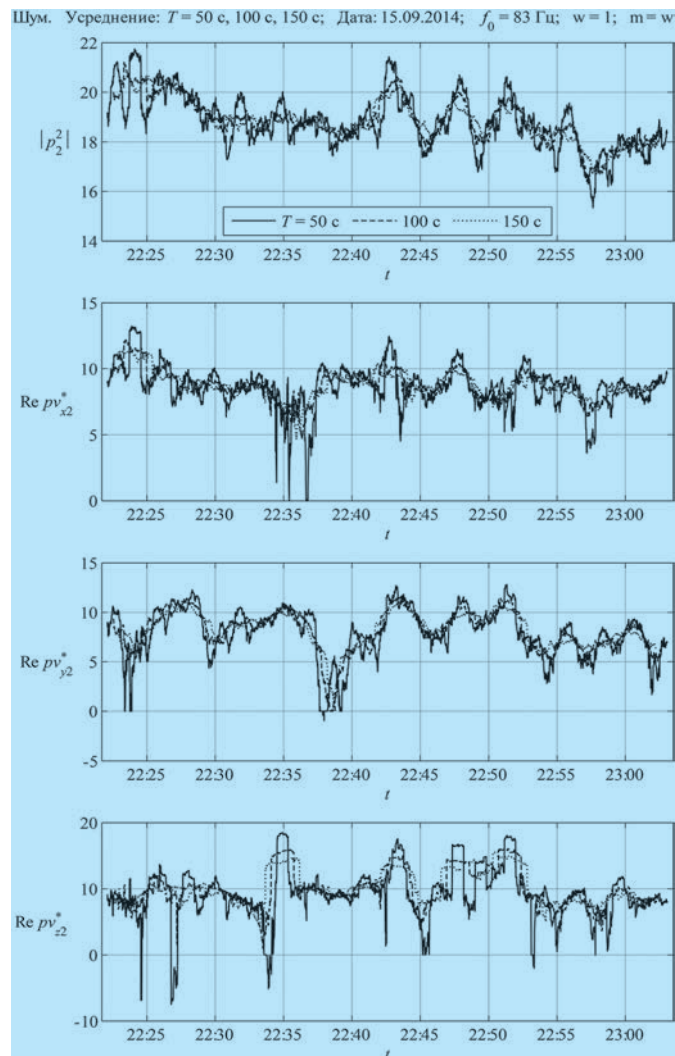


Рис. 18. Анизотропная составляющая шума на выходе комбинированного приёмника после усреднения изотропной составляющей

шумовой обстановке в районе проведения эксперимента. Первичная обработка экспериментального материала показала всю сложность скалярно-векторных звуковых полей в шельфовой зоне на низких частотах, которые имеют трёхмерную нерегулярную структуру. Отсутствие адекватного модельного описания столь сложных звуковых полей затрудняет их физическую трактовку и разработку достаточно эффективных алгоритмов обработки сигналов.

Анализ шумовых полей в районе проведения эксперимента также подтвердил их сложную структуру. Принципиальная особенность

шумового поля заключается в существовании анизотропной составляющей, связанной с наличием техногенных источников шума в соседней с районом проведения эксперимента бухте Троицы. Наличие анизотропной составляющей в шумовом поле также затрудняет обработку сигналов.

На основе первичной обработки экспериментальных данных можно с уверенностью утверждать, что достаточно полный и физически осмысленный анализ низкочастотных звуковых полей в шельфовой зоне возможен при условии использования всей доступной информации о скалярно-

векторной структуре звукового поля, которая может быть получена только с использованием комбинированных приёмников.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Отдела технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН за помощь в организации и проведении экспериментальных работ, а также сотрудникам лаборатории акустических шумов океана ТОИ ДВО РАН за организацию работы приёмной системы на основе комбинированных приёмников и за предоставление цифрового массива данных для последующей обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко В.А., Ильичёв В.И., Захаров Л.Н. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 224 с.
2. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 308 с.
3. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы в акустике. Владивосток: Дальнаука, 2006. 194 с.
4. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
5. Свининников А.И. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2004. 235 с.
6. Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water // Geol. Soc. Am. Mem. 1948. № 27. P. 48–156.
7. Бреховских Л.М. О поле точечного излучателя в слоисто-неоднородной среде // Изв. АН СССР. Серия физическая. 1949. Т. 13, № 5. С. 505–545.
8. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Медленные обобщённые волны и генерация вихревых структур в акустике слоистых сред // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (18). С. 37–51.
9. Щуров В.А., Ляшков А.С., Щеглов С.Г., Ткаченко Е.С., Иванова Г.Ф., Черкасов А.В. Локальная структура интерференционного поля мелкого моря // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 58–67.
10. Щуров В.А., Щуров А.В. Помехоустойчивость гидроакустического комбинированного приёмника // Акуст. журн. 2002. Т. 48, № 1. С. 110–119.

УДК 53.088.228

КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ ГЛУБОКОВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СТД-ЗОНДАМИ «SEA-BIRD» В ЯПОНСКОМ МОРЕ

**Д.Д. Каплуненко¹,
А.Ю. Лазарюк^{1,2},
В.Б. Лобанов¹,
С.Г. Сагалаев¹**

Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образова-
ния Дальневосточный федеральный университет²

Данные современных высокоточных гидрологических зондов (SBE 911 plus) нуждаются в дополнительной коррекции из-за конструктивных особенностей используемых датчиков температуры (SBE 3 plus), электропроводности (SBE 4C) и содержания растворенного кислорода (SBE 43 и Rinko III). В данной работе рассматриваются результаты глубоководных измерений СТД-зондами, выполненных в Японском море в 2012–2014 гг. Основное внимание уделено повышению точности исходных данных, а именно вертикальных профилей основных гидрологических параметров: температуры, солёности, содержания кислорода, необходимых для изучения климатических изменений в Мировом океане и Японском море.

1. ВВЕДЕНИЕ

Японское море является водным бассейном окраинного типа, находящимся в субарктической и субтропической зонах, с ярко выраженным муссонным климатом. Структура циркуляции его вод и наличие фронтальных разделов делает его похожим на Мировой океан в миниатюре [1, 2]. При этом характеристики глубинных вод моря (температура, солёность и содержание растворённого кислорода) подвержены сравнительно малым изменениям. Наиболее однородное распределение характеристик, как по вертикали, так и по площади бассейна отмечается в придонном слое на глубинах более 2000 м, известном как адиабатический слой [1, 3]. Согласно нашим наблюдениям, вертикальные из-

менения потенциальной температуры воды в пределах адиабатического слоя не превышают 0,002°C, а горизонтальное – 0,010°C. Анализ натурных данных, полученных в 1969–2007 гг., показал рост потенциальной температуры глубинных вод Японского моря на 0,050°C [4], а за период 1995–2013 гг. – на 0,031°C [5], в то время как для Мирового океана аналогичный тренд с 1955 по 1998 г. составил 0,037°C [6]. Содержание кислорода в глубинных слоях моря подвержено двадцатилетним колебаниям с максимальными изменениями до 0,7 мкмоль/кг в год [7]. Соответственно для оценки пространственно-временных мас-

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43.
Тел.: (423) 231-14-00. E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8.
Тел.: (423) 243-32-80.

