

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

«Влияние динамических процессов на поверхности и в приповерхностном слое
моря на рассеяние звуковых волн»

Аспирант: Разумов Дмитрий Дмитриевич

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Салин Михаил
Борисович кандидат физ.-мат. наук

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.06 Акустика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород
2020

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Для начала хотелось бы сказать, что дифракция волны на неровной границе произвольной формы – фундаментальная научная проблема, которая актуальна не только для акустики, но также встречается и в оптике, радиофизике. Существует несколько приближенных методов решения этой задачи[1,2,3,4,5].

Изучение низкочастотного звука важно, потому что именно этот вид сигнала обладает наибольшей дальностью распространения в океане. Наиболее популярным методом описания рассеяния низкочастотного на поверхности моря является метод малых возмущений[1]. Классический результат, которого - резонанс Брэгга между волновыми векторами падающей звуковой, поверхностной гравитационной и отраженной звуковой волн. Пределы применимости такого подхода – случай малого параметра Релея $P = 2k_{\perp} \langle a^2 \rangle \ll 1$, удвоенного произведения поперечной к границе компоненты волнового вектора звуковой волны на среднеквадратичную амплитуду поверхностных волн. Таким образом, методом малых возмущений можно описывать рассеяние на развитом морском волнении длинных звуковых волн в диапазоне частот до 1кГц, а при описании рассеяния звука частотой в несколько килогерц (1 – 4 кГц) на этот метод можно полагаться лишь в случае спокойного моря или озёрных водоёмов.

С другой стороны развиваются методы измерения и предсказания формы морской поверхности. Классический подход задание морской поверхности: использование эмпирического спектра $S(f)$ [6], описывающего распределение энергии морских волн по частоте в зависимости от скорости ветра, вместе с дисперсионным соотношением $\omega(k)$ получаемым из линеаризованных уравнений гидродинамики[7]. Оно выводится в предположении малости $a/\lambda \ll 1$ амплитуды колебаний в волне на поверхности воды по сравнению с длиной волны. В условиях открытого моря и развитого волнения волны на поверхности воды уже некорректно описывать виде линейной суперпозиции невзаимодействующих гармоник. Зависимость частоты от волнового числа для реальных волн может отличаться от дисперсионного соотношения, полученного в линейном приближении. В XXI веке появилась возможность накопление новых цифровых данных о форме морской поверхности в результате экспериментов[8,9] (ключевая особенность таких экспериментов - возможность одновременно определять высоту поверхности в большом числе точек пространства) и численного моделирования[10,11]. Эти исследования позволяют установить форму поверхности при моделировании акустических задач не только с помощью среднего временно спектра, но и с помощью дискретизированной по пространству и времени функции, цифровых данных. Результаты численного моделирования гидродинамической задачи будут использованы как входные данные для моделирования акустической задачи в настоящей работе.

В третьих, известно, что находящиеся под поверхностью пузыри необходимо учитывать для объяснения особенного поведения интегральных характеристик рассеяния низкочастотного звука, таких как сила обратного рассеяния[12,13]. Рассеяние на движущихся в приповерхностном слое неоднородностях влияет на спектр сигнала реверберации.

Исследование искажения спектра рассеянного на поверхностном волнении и приповерхностных неоднородностях сигнала имеет практическую значимость для таких задач, как акустическое зондирование морской среды[14], фокусировка акустического поля в волноводе[15] и оценка дальности работы гидроакустического локатора[16]. В последнем случае рассеяние на поверхностном волнении играет роль маскирующей помехи.

Не смотря на то, что исследования в этом направлении начаты уже больше века назад[17], научный интерес к этой теме не угасает. Например, в недавних работах исследователи обращаются к таким вопросам как: насколько хорошо работает метод касательной плоскости Бреховских при малых углах скольжения[18], траектории одиночного пузыря под морской поверхностью[19], рассеяние в среде из пузырей[20], строят численные[21] и аналитические[13] модели рассеяния на пузырях и поверхности и т.д.

Цели работы: Изучить особенности спектра морских волн(в сечении ω к частота волновое число), влияющих на рассеяние звука. Построить модель рассеяния звука на динамической поверхности воды, которая будет работать при параметрах Релея порядка единицы и больше, в случае затенения, многократного рассеяния и может учитывать движение пузырей в приповерхностном слое. Провести акустическое моделирование рассеяния звука на динамической поверхности, полученной по результатам численного моделирования нелинейных уравнений гидродинамики при различных режимах волнения. Экспериментальное исследование доплеровского спектра реверберации узкополосных импульсов низкочастотного звука.

Научная новизна научно-квалификационной работы заключается в новых методах исследования и оригинальных результатах.

Предложена оригинальная модификация метода граничных элементов для решения задачи дифракции плоской звуковой волны на ограниченной неровной поверхности произвольной формы. Стоит сказать, что сама идея использовать метод граничных элементов не нова, Доусон и Фавсет в 1990 продемонстрировали, что метод граничных элементов очень гибкий и мощный инструмент для решения задачи рассеяния в волноводе с деформацией границы[22]. В настоящей работе задача специально рассмотрена в такой постановке, чтобы исследовать рассеяние на поверхности воды отдельно от волноводных эффектов. Новым является полуаналитический подход, в котором интеграл Гельмгольца, дополняется системой выведенных из соображений симметрии интегральных граничных условий, что должно быть удобнее для реализации и возможно вычислительно быстрее стандартного двух-областного метода граничных элементов[23].

Получены количественные оценки на ширину спектра поверхностных волн.

В численном моделировании продемонстрировано, что с нарушением резонансного характера рассеяния размывается «Брэгговский пик».

Для двумерной модели с пузырями воспроизведён эффект приводящий к уширению спектра вокруг несущей частоты.

Приводятся результаты экспериментов по моностатическому и бистатическому рассеянию, в которых тонкая структура доплеровского спектра реверберации соответствует не классическому резонансному рассеянию на поверхностных волнах, а как раз может быть объяснена исходя из новой модели рассеяния на пузырях и нерезонансного рассеяния на поверхности.

Положения, выносимые на защиту:

1. При рассмотрении задач рассеяния акустических волн следует применять модель поверхности, в рамках которой спектр поверхностных волн в сечении частота - волновое число имеет максимум конечной ширины вокруг дисперсионной кривой. Частотный интервал ширины этого максимума может быть аппроксимирован зависимостью с прямой пропорциональностью волновому числу и среднеквадратичному значению горизонтальной компоненты орбитального течения на поверхности.

2. Предложенным численным методом граничных элементов возможно находить рассеяние плоской волны на поверхности в случае параметра Релея порядка единицы и больше, в случаях, когда имеют место затенение и многократное рассеяние. Модель дополнена пузырями посредством введения неодносвязной границы.

3. При нелинейном режиме волнения в спектре рассеянного сигнала размывается «Брегговский пик», вместо него будет наблюдаться «плато» из частот Доплера.

4. Рассеяние на динамической, изменяющейся во времени поверхности можно моделировать через набор статичных состояний, когда скорость поверхности много меньше скорости звука в воде.

5. Для корректного сравнения результатов моделирования и результатов экспериментов к последним следует применять предложенную методику обработки сигналов, заключающуюся в гетеродинировании, фазировании, вычислении текущих спектров (с длиной окна, подобранной под длительность сигнала зондирования) и усреднения спектрограмм импульсов с подстройкой по времени прихода каждого из них.

Научная и практическая значимость

Сам по себе предложенный метод решения задачи рассеяния имеет высокую научную значимость, так как имеет более широкие пределы применимости, чем ранее известные прибли-

женные методы, опирающиеся на предположения о форме поверхности. Мы собираемся применять его на практике в проекте по дистанционному мониторингу состояния акватории.

Усовершенствованная методика обработки импульсных сигналов с определением времени прихода доведена до автоматического режима и будет применена в натурном эксперименте этим летом 2020.

Степень достоверности.

Главы 1 и 3 полностью основываются на результатах опубликованных автором в соавторстве с коллегами в рецензируемых российских научных журналах, входящих в перечень ВАК. Статья с методом, описываемым в главе 2, «Multi-domain Boundary Element Method for Sound Scattering on a partly perturbed Water Surface» принята в печать в журнал Journal of Theoretical and Computational Acoustics. Результаты докладывались на научной школе «Нелинейные волны» (2018) (2020), школе-семинаре им. акад. Л.М. Бреховских(2018), международной конференции «Days on Diffraction»(2019).

Структура и объем научно-квалификационной работы. Работа состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 82 страницы, включая 32 рисунка. Список литературы содержит 67 наименования, включая работы автора.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** рассматриваются поверхностные волны. Изучается проявление модуляционных эффектов с точки зрения отклонения спектральной плотности на плоскости частота - волновое число (ω и k соответственно) от дисперсионной кривой. В качестве метода выбрано численное моделирование, результаты которого затем сравниваются с экспериментом.

В разделе 1.1. Кратко излагается метод численного моделирования. Вода рассматривается как идеальная и несжимаемая жидкость, ее движение считается потенциальным и полагается, что для волн выполняется приближение глубокой воды. Волнение считается одномерным. В качестве исходных уравнений взяты точные уравнения Эйлера в формулировке Дьяченко [10]

В разделе 1.2. Приводятся результаты численного моделирования

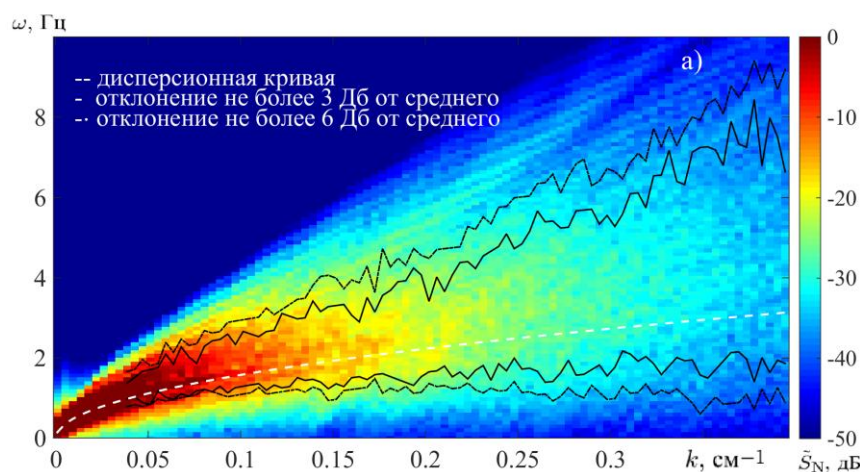


Рис.1. Спектр высот волнения, полученные по результатам численного моделирования, нормированные на максимум и построенный в децибелах в масштабе по цветовой шкале.

Для того, чтобы количественно оценить уширение «спектральной линии» на усреднённых зависимостях, аналогичных представленным на рис. 1., была применена следующая методика. Для каждого k находится максимальное значение и определяется диапазон частот $\Delta f(k)$, где спектральная интенсивность спадает в заданное число раз. На рис. 1. показаны линии, ограничивающие области спектра, выделенные указанным образом по уровню интенсивности 1/2 (сплошные линии) или 1/4 (пунктирные линии). Результаты серии расчётов были обобщены в виде аналитической зависимости:

$$\Delta f = \frac{\gamma}{2\pi} k u_{STD} \quad (1)$$

Где γ – параметр данный в таблице, $u_{STD} = \sqrt{\int S(\omega) \omega^2 d\omega}$ – среднеквадратичное значение горизонтальной компоненты орбитального течения на поверхности.

В качестве аргумента за то что основным механизмом уширения спектра в численном эксперименте действительно является эффект Доплера и длинная волна играет роль движущейся подстилающей поверхности, выполнен оконный спектральный анализ с достаточно коротким окном по координате и по времени, таким, чтобы оно вмещало менее четверти периода энерго-несущей волны. Продемонстрировано, что в различные моменты времени высокочастотная часть спектра испытывает «красное» или «синее» смещение.

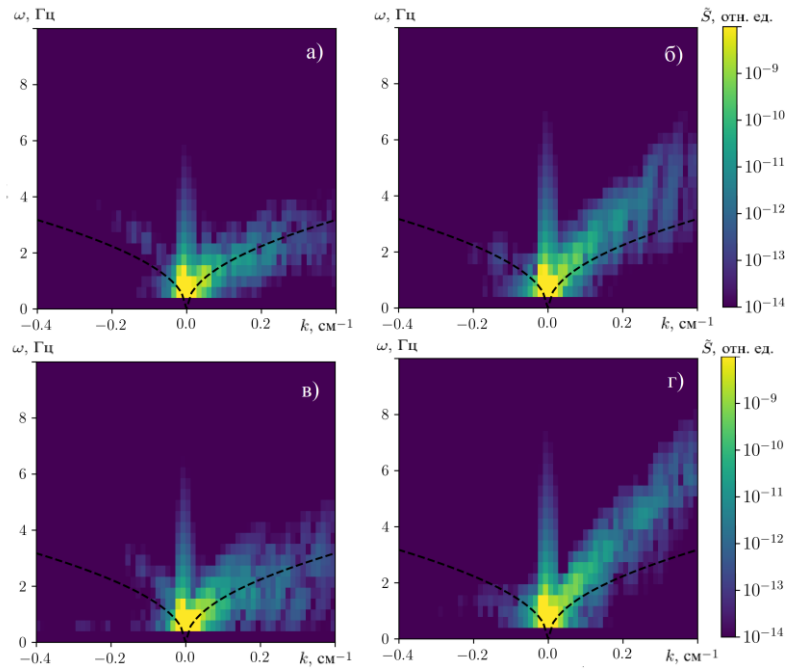


Рис.2. Результат моделирования: несколько узких оконных спектров, вычисленных с интервалом 3 с (пунктирной линией показано дисперсионное соотношение для линейных волн): $t = 37$ с (а), $t = 40$ с (б), $t = 43$ с (в) и $t = 46$ с (г)

В разделе 1.3. проводится сравнение результатов моделирования со спектрами волнения, измеренными в естественных условиях. Экспериментальные спектры, с которыми мы сверяемся количественно, получены с помощью многоканального волнографа на Горьковском водохранилище[24] и обработки видеосъемки[9] на Черном море.

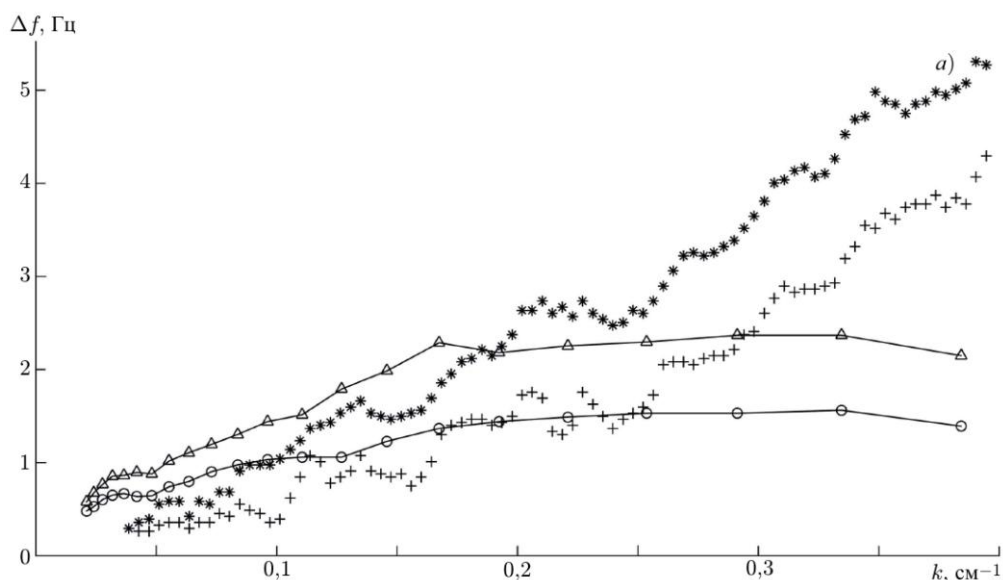


Рис.3 Ширина распределения спектральной плотности мощности вокруг дисперсионного значения: сравнение экспериментальных значений и результатов расчёта. Измерения проводились на Горьковском водохранилище с помощью многоканального струнного волнографа (а) измерениям соответствуют маркеры \circ (порог -3 дБ) и Δ (порог -6 дБ), моделированию – маркеры $+$ (-3 дБ) и $*$ (-6 дБ). На

В диапазоне волновых чисел до $0,2\text{см}^{-1}$ наблюдается согласие между результатами расчётов и экспериментов. В коротковолновой части спектра моделирование предсказывает более широкий разброс по частоте, чем реализуется в природе.

В разделе 1.4. делается заключение к главе 1.

В Главе 2 речь пойдёт об акустическом моделировании рассеяния плоской волны на поверхности произвольной формы. В разделе 2.1 Подробно излагается оригинальный метод граничных элементов. Суть метода в специальной постановке задачи – вне области деформации

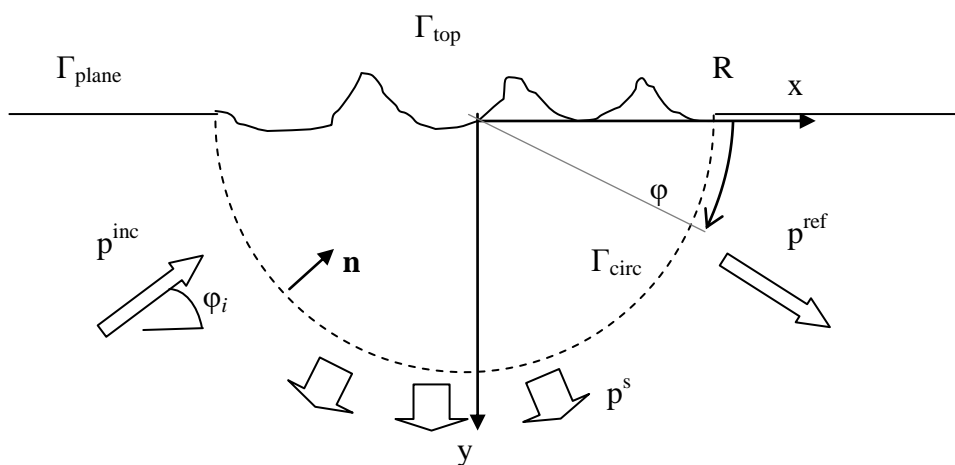


Рис. 3. Геометрия задачи рассеяния на частично неровной поверхности.

граница воды считается плоской. Вводится искусственная граница Γ_{circ} в виде полуокружности разделяющая внутреннюю область под искривленной поверхностью и симметричную внешнюю.

В подразделе 2.1.1 рассматривается внутренняя область, для точки на границе записывается интегральное уравнение Гельмгольца[25]. Существенно, что для внутренней области можно выбрать функцию Грина свободного пространства, не содержащую отражений[26].

В подразделе 2.1.2 из разложения рассеянного поля во внешней области по расходящимся волнам, симметрии внешней области и разложения исходной плоской волны и её зеркального отражения выводится система интегральных граничных условий на искусственной границе, соответствующая излучению во внешнюю область.

В подразделе 2.1.3 описывается метод дискретизации с помощью которого система интегральных уравнений сводится к системе линейных уравнений на значения давления и колебательной скорости в точках контура. Весь контур разбивается на участки, в пределах которых давление считается постоянным, участок контура заменяется на две прямых линии, соединяющие его центр и края. Приведём итоговые соотношения метода:

$$\left. \begin{aligned} 0 \Big|_{1 \leq n \leq N_{top}} \\ 0.5 p(\mathbf{x}_n) \Big|_{N_{top}+1 \leq n \leq N_{top}+N_{circ}} \end{aligned} \right\} = \sum_{m=1}^{N_{top}} -\partial_n p(\mathbf{x}_m) \int_{\Delta\Gamma_m} G(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}) d\Gamma + \sum_{m=N_{top}+1}^{N_{top}+N_{circ}} \left(p(\mathbf{x}_m) \int_{\Delta\Gamma_m} \partial_n G(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}) d\Gamma - \partial_n p(\mathbf{x}_m) \int_{\Delta\Gamma_m} G(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}) d\Gamma \right) \quad (2)$$

В дискретизированном уравнении Гельмгольца (2) индекс n соответствует точке наблюдения, она может лежать на каждом участке $n=1 \dots (N_{top}+N_{circ})$ как верхней так и нижней части контура. Неизвестны здесь $(N_{top}+2N_{circ})$ переменных, нормальная производная давления на всём контуре $\partial_n p(\mathbf{x}_m)$ и давление $p(\mathbf{x}_m)$ на нижней части контура. Эта система (2) дополняется системой интегральных граничных условий в дискретном виде:

$$\sum_{m=1}^{N_{circ}} \left(p(\mathbf{x}_m) + \partial_n p(\mathbf{x}_m) \frac{H_n^{(1)}(kR)}{kH_n^{(1)'}(kR)} \right) \int_{\Delta\varphi_m} \sin n\varphi d\varphi = \frac{4i^{n-1} p_0 \sin n\varphi_i}{kRH_n^{(1)'}(kR)}. \quad (3)$$

Далее система линейных уравнений формулируется в матричном виде и мы подробно описываем метод расчёта каждого элемента матрицы, оценивая интегралы от функции Грина G . Обсуждаются приёмы, которые помогают ускорить численный счёт.

В подразделе 2.1.4 Показано как можно учесть пузыри в двумерной модели, рассмотрев неодносвязную границу внутренней области. Размеры пузыря, как правило, много меньше длины волны и даже шага дискретизации контура (десятой части длины волны). В случае, когда

учитываются только радиальные колебания пузыря, для описания пузыря потребуется ввести всего одну новую неизвестную – давление на пузыре, а интегралы по границе пузыря можно оценить аналитически, таким образом, не требуется вводить мелкую сетку на границе пузыря.

В подразделе 2.1.5 показано, как основное соотношение метода – систему интегральных граничных условий можно получить в трёхмерном случае.

В заключении к разделу 2.1 мы показываем, как после того как найдено решение на контуре, его можно пересчитать во всё пространство используя интеграл Гельмгольца.

В разделе 2.2 приводятся примеры моделирования. Сначала приводятся статичные примеры. При малом параметре Релея метод отлично согласуется с методом малых возмущений.

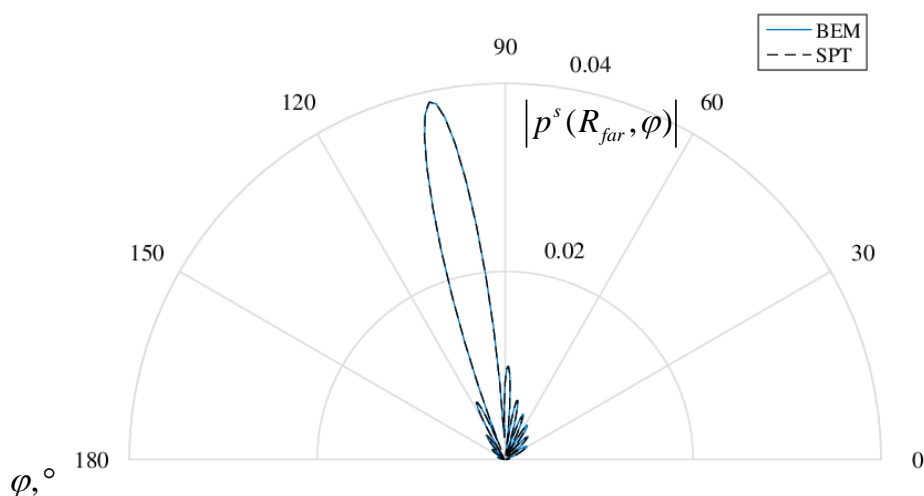


Рис. 4 Модуль комплексной амплитуды рассеянного давления на расстоянии соответствующем дальней зоне в зависимости от угла рассчитанный двумя методами. Синяя линия – метод граничных элементов, черная пунктирная – метод малых возмущений.

Демонстрируется работа метода в случае затенения и переотражения рис. 6 7

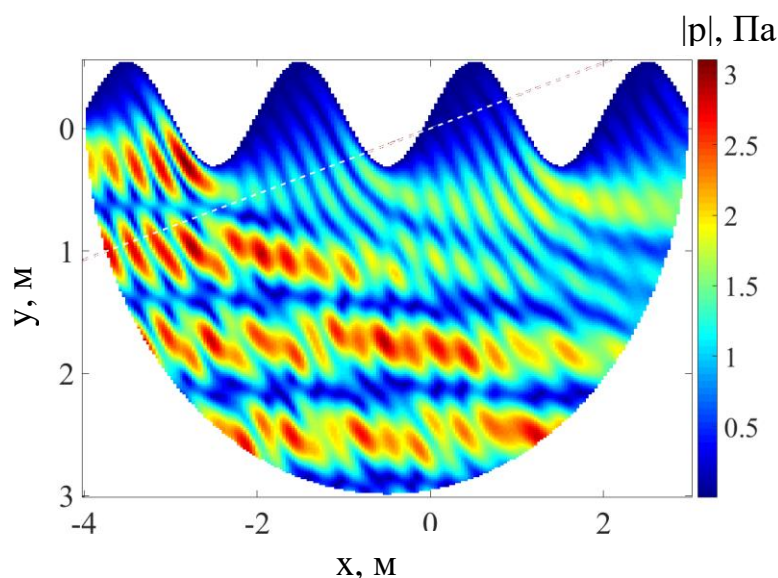


Рис. 6. Модуль комплексной амплитуды давления во внутренней области, случай затенения. Параметры звуковой волны: $k=4\pi \text{ м}^{-1}$, $\varphi_i=15^\circ$, амплитуда $p_0 = 1 \text{ Па}$. Параметры поверхности воды: ширина возмущения $2R = 6 \text{ м}$, $\kappa = 7\pi / 6 \text{ м}^{-1}$, амплитуда $a=0,5 \text{ м}$.

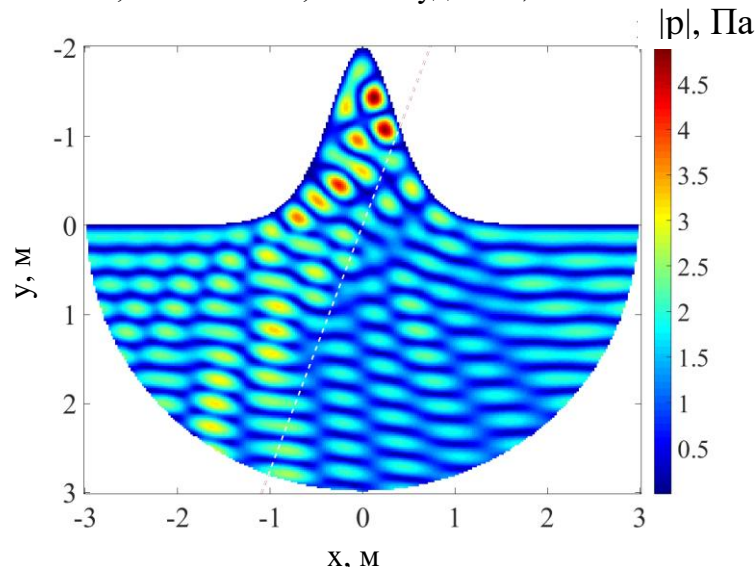


Рис. 7 Модуль комплексной амплитуды давления во внутренней области, случай многократного рассеяния. Параметры звуковой волны: $k=4\pi \text{ м}^{-1}$, $\varphi_i=70^\circ$, амплитуда $p_0 = 1 \text{ Па}$. ширина возмущения поверхности $2R = 6 \text{ м}$, амплитуда солитона $a = 2 \text{ м}$.

Проводится параметрическое исследование, зависимости рассеяния от амплитуды ограниченной синусоидальной гребенки.

В подразделе 2.2.1 обосновывается переход к моделированию на движущейся поверхности через набор статичных состояний поверхности. Полученный временной ряд (в зависимости от номера поверхности) комплексных амплитуд давления (рассчитанный в точке методом граничных элементов) обрабатывается, так как если бы это был сигнал гидрофона с гетеродинированием. Постоянная комплексная амплитуда относится к сигналу на несущей частоте (см. рис. 8), а все отклонения определяются как эффект Доплера.

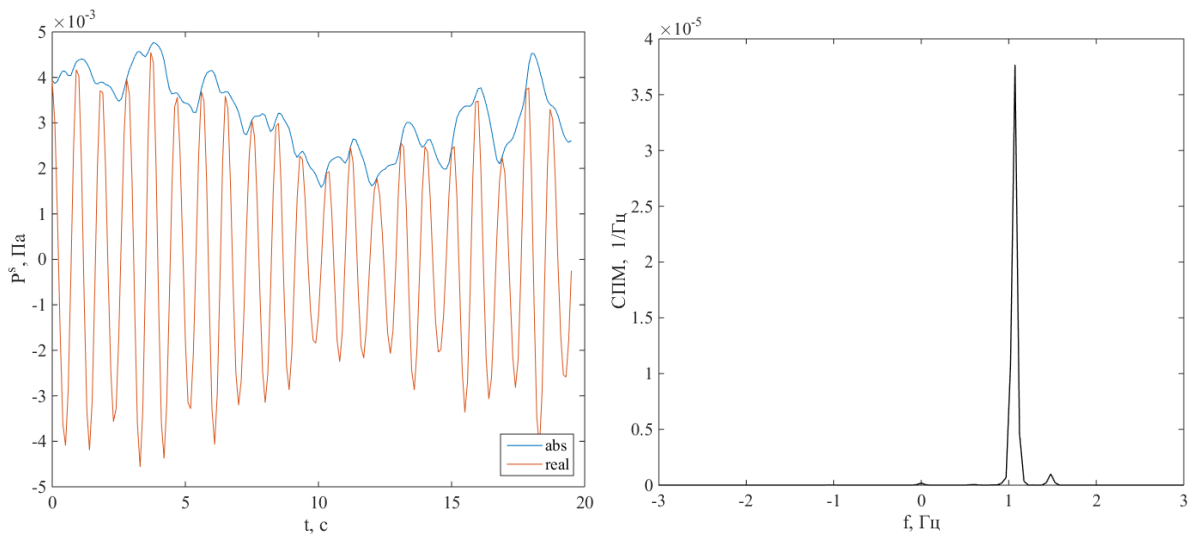


Рис. 8 Результат численного моделирования методом граничных элементов рассеяния звуковой волны падающей под углом $\varphi_i=45^\circ$ с $k=2\pi$ на динамическую поверхность воды, полученной по результатам гидродинамического моделирования, начальное состояние которого инициализи-

рованного спектром JONSWAP с параметрами: скорость ветра на высоте 10м - $W=1\text{м/с}$; разгон - $F=10\text{км}$, поверхностные волны малой амплитуды $\sim 5\text{см}$ бегут навстречу звуковой волне. а) Зависимость комплексной амплитуды рассеянной компоненты поля давления от «медленного времени»(номера кадра), синяя линия – модуль комплексной величины, красная – действительная часть, взятая в точке в дальней зоне в направлении вниз $\varphi=90^\circ$. б) Спектральная плотность мощности сигнала на рисунке (2.2.7а) в зависимости от частоты.

Приводятся частотно-угловые зависимости спектральной плотности мощности волнения рассеянного сигнала (рис. 9), спектр обратного рассеяния, сила обратного рассеяния. В качестве динамической поверхности используются результаты двумерной гидродинамической модели, которую мы изучали в главе 1.

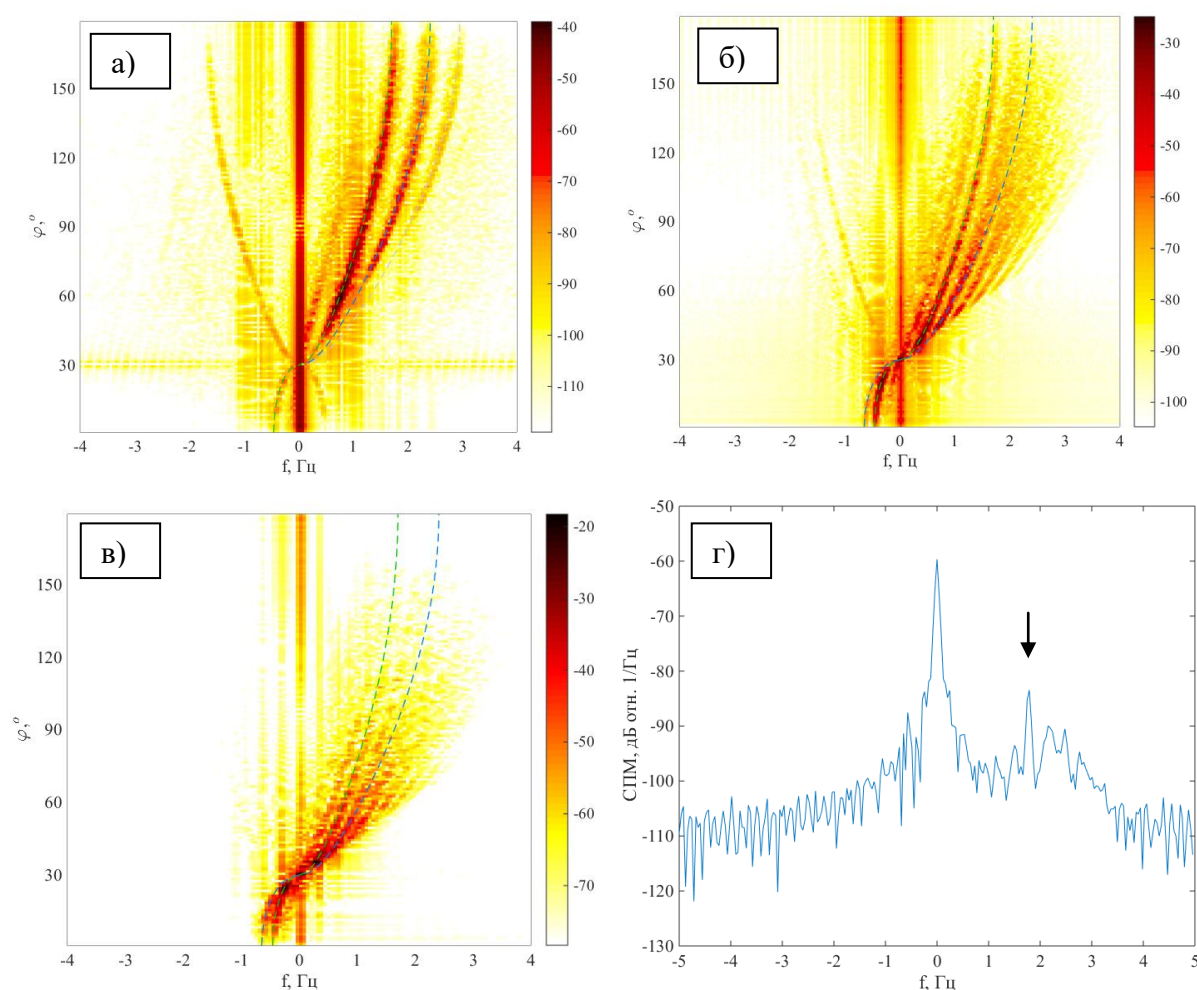


Рис. 9 Спектральная плотность мощности волнения в зависимости от частоты f для сигнала принятого в различных направлениях φ , звуковая волна падает под углом скольжения $\varphi_i=30^\circ$ а,б,в - различные режимы волнения. а) $W=1\text{м/с}$; $F=10\text{км}$, амплитуда пов. волн $\sim 5\text{см}$ б) $W=1\text{м/с}$; $F=100\text{км}$, амплитуда $\sim 20\text{ см}$ в) $W=2\text{м/с}$; $F=100\text{км}$, амплитуда $\sim 35\text{ см}$. Зелёный пунктир соответствует условию Брэгга и дисперсионному соотношению для волн на глубокой воде, синий пунктир – резонансное рассеяние на второй гармонике в спектре поверхностных волн. г) Спектр сигнала обратного рассеяния, усредненный в диапазоне углов $\varphi=162:168^\circ$ Источник плоская волна падающая под углом $\varphi_i=15^\circ$ к горизонту, режим волнения (б)

На рис. 9 для малых поверхностных волн видно, что зелёный пунктир, построенный исходя из линейной теории: резонансное рассеяние и линейное дисперсионное соотношение для

волн на воде, отлично ложится на достаточно узкий максимум на частотно-угловой зависимости СПМ. Также, исходя из теории резонансного рассеяния, можно предсказать рассеяние на второй гармонике $\Omega^2 = 2gk$ в спектре поверхностных волн (синий пунктир) и заметить слабое рассеяние на третьей гармонике (серый пунктир). С ростом поверхностного волнения 2.2.8б, максимум рассеяния по углу соответствует всё более меньшему сдвигу частоты, т.к. понижается частота пика спектре поверхностных волн. А предсказания, даваемые линейной теорией, начинают нарушаться.

В спектре звукового сигнала рассеянного в обратном направлении с ростом амплитуды волнения размывается «брегговский» пик (отмечен стрелочкой на рис. 9г).

Моделирование воспроизводит эффект изменения угловой зависимости силы обратного рассеяния со скоростью ветра при интенсивном волнении.

В подразделе 2.2.2 Сделано пробное моделирование рассеяния на пузырьковых трубках. Показано, что рассеяние на движущихся по круговым орбитам пузырькам различного радиуса $R = R_0 \exp(-K_m z)$ зависящего от глубины, приводит к уширению спектра вокруг несущей частоты, что согласуется предложенной ранее феноменологической моделью[27].

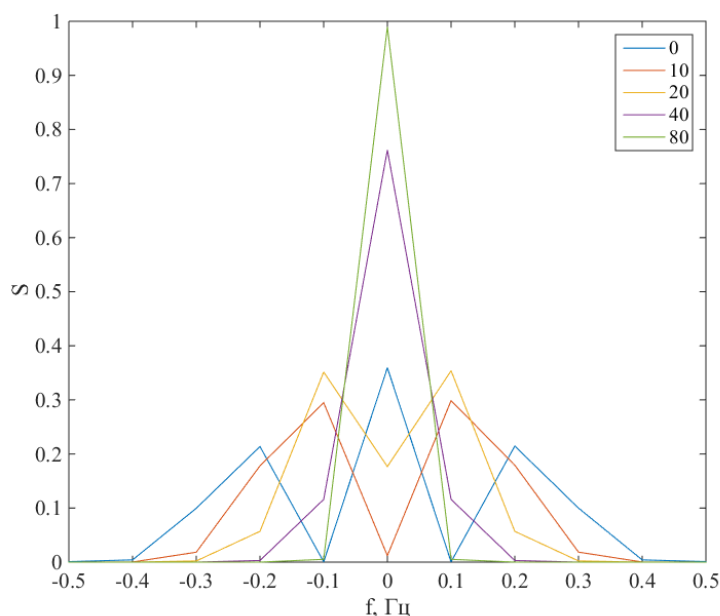


Рис. 10 Спектр сигнала рассеянного в обратном направлении на вращающемся пузыре, рассчитанный методом граничных элементов для различных орбит рассеивателя, цветная линия z параметр глубины.

В Главе 3 Описываются результаты экспериментов по исследованию тонкой структуры доплеровского спектра сигналов реверберации. Чтобы провести измерения спектра эхосигнала с разрешением 1Гц требуется, чтобы полоса посланного в среду активного сигнала, была не более этого значения. Импульсный объем такого сигнала в среде занимает в длину не менее 750 м, для отчетливого наблюдения реверберации целесообразно сделать паузу между окончанием фа-

зы излучения и началом приема анализируемого сигнала. Таким образом, эксперимент по измерению силы поверхностного рассеяния с разрешением по частотам Доплера связан посылкой в среду сигнала на расстоянии нескольких километров, для чего требуются достаточно мощные излучающие системы и контроль затухания сигнала по трассе для нормировки.

В разделе 3.1 речь идёт об эксперименте на Черном море. Излучатель и приёмник располагались на разных судах. Приёмная система состояла из двух ортогональных приемных линеек в форме буквы Г. Параллельно осуществлялся контроль гидрофизических параметров: измерялся спектр поверхностного волнения с помощью видеосъёмки и профиль скорости звука.

В подразделе 3.1.1 приводятся основные результаты эксперимента. Существенным моментов в обработке сигнала является контроль момента прихода импульса для синхронизации времени реверберации и последующего усреднения по импульсам. Данные были представлены в виде распределения интенсивности в зависимости $p^2(\tau_j, f_k, n, \theta_m)$ от задержки от момента прихода прямого сигнала τ_j , частоты Доплера f_k , порядкового номера импульса n и угла пеленга θ_m с нормалью для каждой антенной линии. Сравнение кривых интенсивности(усреднённой по импульсам, для определенного угла) в зависимости от частоты Доплера построенных для различной задержки, описывающих прямой и рассеянный сигналы, показывает, что спектр сигнала действительно уширяется при рассеянии в среде. Не наблюдается ярко выраженных экстремумов(в области отмеченной стрелками на рис. 12), где согласно резонансной модели рассеяния должен располагаться «брегговский» пик.

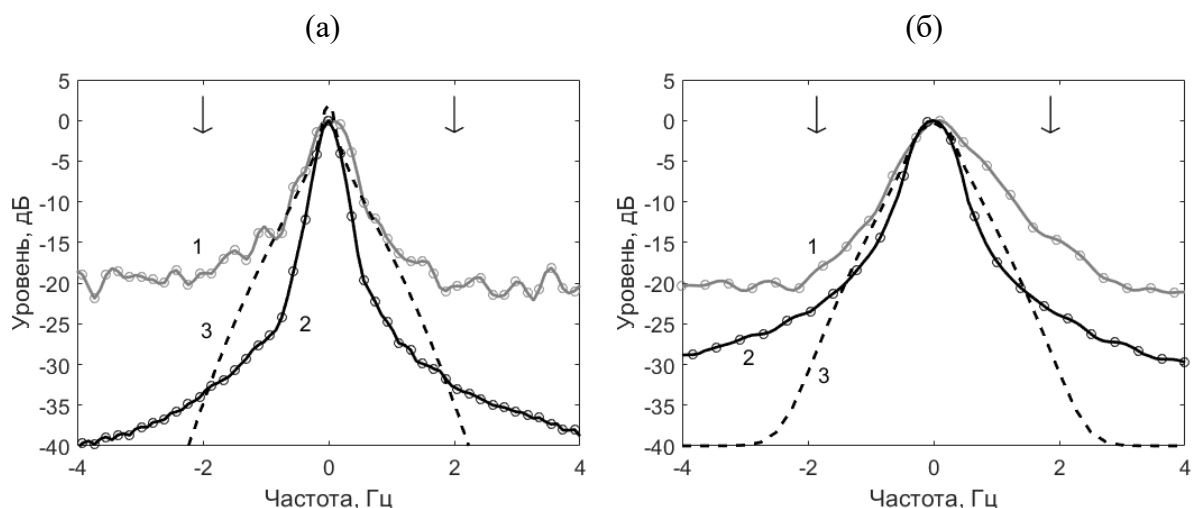


Рис. 12 Графики (а-в) - спектры сигналов, нормированные на максимум, антенная линия 1, импульсный сигнал с несущей частотой 2 кГц и длительностью T , кривая 1 – сигнал в строге с задержкой τ^* по пеленгу θ^* , кривая 2 – прямой сигнал без задержки по пеленгу на источник $\theta=0$, кривая 3 – расчет с использованием модели движущихся приповерхностных неоднородностей[27]; значения параметров сигналов: а) $T=8$ с, $\tau^*=9.4$ с, $\theta^*=-60^\circ$, б) $T=2$ с, $\tau^*=5.4$ с, $\theta^*=-60^\circ$,

В подразделе 3.1.2 произведена оценка силы рассеяния поверхности. Рассматривается ситуация когда источник, приемник и зона рассеяния образуют равносторонний треугольник. Предположение о том, что среда однородна по горизонтали, вспомогательные измерения интенсивности и принцип взаимности позволяют обойтись без учета гидрологии.

В разделе 3.2 приводятся результаты экспериментов на Горьковском водохранилище по моностатической схеме локации. Схема обработки импульсных сигналов та же, что и на Черном море. Интенсивность сигналов не нормировалась в абсолютных единицах. Спектр сигнала принятого с задержкой также уширяется и имеет треугольную форму вокруг несущей частоты, а «брегговский» пик не наблюдается.

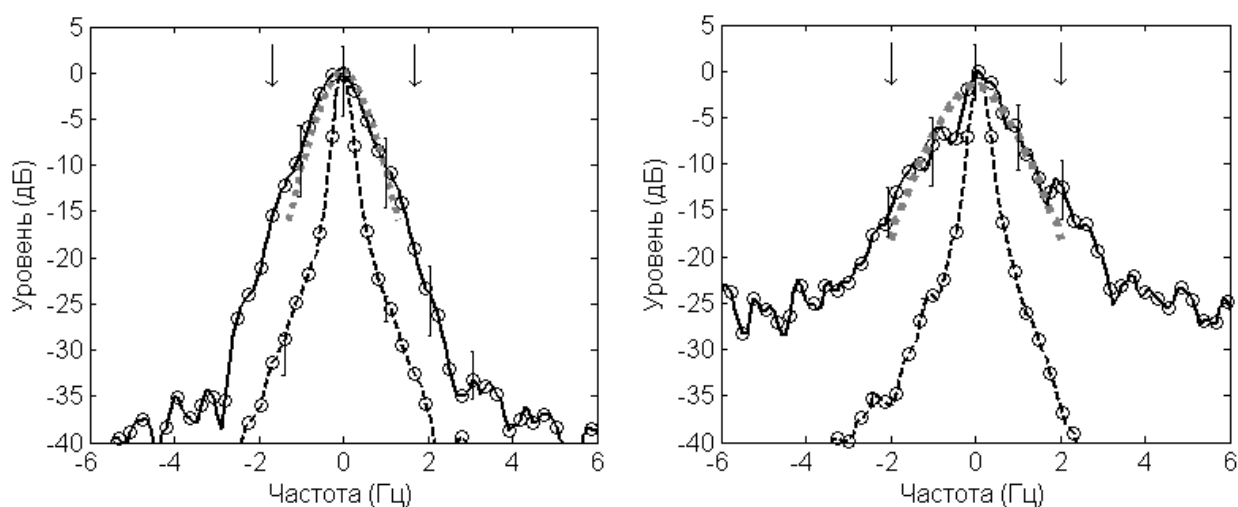


Рис. 13 Сплошная линия – нормированный на максимум спектр эхосигнала по одному пеленгу, в строке с задержкой τ_* = (а) 3.1 с, (б) 6.3 с. Черная штриховая линия - нормированный на максимум спектр излученного сигнала. Серый пунктир – теоретическая зависимость по результатам работы[27]. Частота (а) 1320 Гц и (б) 2020 Гц, длительность 4 с. Горьковское вдхр., 2016 г

Численное моделирование, выполненное в главе 2, помогает объяснить наблюдаемую в эксперименте форму спектра сигнала, принятого с задержкой.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Исследована модуляция коротких поверхностных волн при наличии длинных волн за счёт эффекта Доплера. Наблюдается изменение закона дисперсии коротких поверхностных волн в зависимости от фазы длинной волны, как для реальных волн измеренных в естественных условиях, так и для модельных, полученных в результате численного решения полностью нелинейных уравнений движения. Результаты серии численных экспериментов обобщены в виде зависимости, которая позволяет задавать распределения спектральной плотности мощности

волнения на плоскости частота – волновое число в виде полосы конечной ширины вокруг дисперсионной кривой.

2. Предложен новый численный метод для решения задачи дифракции плоской звуковой волны на статичной абсолютно мягкой границе, деформированной произвольным образом в конечной области. Продемонстрирована работа метода в случаях, когда имеет место затенение звуковой волны гребнями волн и не однократное рассеяние. При малом параметре Релея, результаты расчёта согласуются с методом малых возмущений. Параметрическое исследование рассеяния на синусоидальной гребенке различной амплитуды воспроизводит осцилляцию коэффициентов отражения с параметром Релея.

3. Произведено двумерное моделирование рассеяния звука на динамической поверхности воды с использованием оригинального метода граничных элементов и кинематического подхода («замороженности» каждой временной реализации поверхности). Картина рассеяния на модельной поверхности моря, при малой амплитуде волнения согласуется с линейной теорией. При нарушении линейного режима волнения и не пренебрежимо малом параметре Релея береговых пик, предсказываемый линейной теорией, согласно нашей модели, может перестать отчетливо наблюдаться и вместо него будет плато из частот Доплера.

4. Сделано обобщение метода граничных элементов, позволяющее моделировать рассеяние на пузырях движущихся в приповерхностном слое моря. В предварительном моделировании продемонстрирован эффект приводящий к уширению спектральной линии вокруг несущей частоты, связанный с рассеянием на пузырях, вращающихся по круговым орбитам, радиус которых убывает с глубиной. Характерная форма уширения согласуется с экспериментальными данными и имевшейся ранее феноменологической моделью.

5. Обработаны результаты экспериментов по рассеянию узкополосных импульсных сигналов в бистатическом эксперименте на Черном море и моностатическом на Горьковском водохранилище. Реализованный метод обработки с контролем времени прихода импульса для последующего синхронного усреднения реверберации по импульсам позволяет наблюдать в тонкой структуре доплеровского спектра различные эффекты, в том числе отсутствие явного берегового пика и уширение спектральной линии принятого с задержкой сигнала, которое можно объяснить исходя из модели рассеяния на пузырях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских, Л.М. Теоретические основы акустики океана/ Л.М.Бреховских, Ю.П.Лысанов. — М.:Наука, 2007. — С. 249-306
2. Басс, Ф. Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности/ Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. — М.: Наука, 1972. — 424 с.
3. Бреховских, Л.М. Дифракция волн на неровной поверхности/ Л.М. Бреховских // ЖЭТФ 23. — 1952. — № 3 (9). — С. 275-288, 289-304.
4. Курьянов, Б.Ф. Рассеяние звука на шероховатой поверхности с двумя типами неровностей/ Б.Ф. Курьянов // Акустический журнал. — 1962. — Т.8, — № 3. — С. 325—333
5. Voronovich A.G. Wave scattering from rough surfaces/ Voronovich A.G// Berlin: Berlin Heidelberg. — 1994. — PP.148-173.
6. Hasselmann K. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)/ Hasselmann K., T.P. Barnett, E. Bouws [and others] // Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe. — 1973. — A(8) (Nr. 12), P.95.
7. Ландау, Л.Д. Гидродинамика/ Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001.- С. 54-60
8. Caulliez G. Higher-order statistical analysis of short wind wave fields/ Caulliez. G, C.-A. Guerin//J. Geophys. Res. —2012— Vol.117, PP. 151–163.
9. Салин, Б.М., Комбинированный метод измерения трехмерных спектров волнения. II. Примеры использования основных схем измерений и анализ полученных результатов/ Б.М. Салин, М.Б. Салин// Изв. вузов. Радиофизика. 2015. — Т. 58. — № 3. — С. 200–213.
10. Zakharov, V.E. New method for numerical simulation of a nonstationary potential flow of incompressible fluid with a free surface Eur. J. mech. B-Fluids./ V.E. Zakharov, A.I. Dyachenko, O.A. Vasilyev. — 2002. — Vol.21. — PP. 283–291.
11. Байдаков, Г.А. Оценка уширения спектра коротких поверхностных волн при наличии длинноволнового волнения/ Г.А. Байдаков, А.С. Досаев, Д.А. Разумов, М.Б. Салин М.Б. // Изв. вузов. Радиофизика, 2018. — Т. 61. — № 5. — С. 374–384.
12. Neighbors T. H. Anomalous low frequency sea surface reverberation/ Neighbors T. H., Vjerne L.// Hydroacoustics. — 2001. — Vol.4, P.181-192.
13. Michael A. Ainslie. Effect of wind-generated bubbles on fixed range acoustic attenuation in shallow water at 1–4 kHz/ Michael A. Ainslie // J. Acoust. Soc. Am. —2005. — Vol. 118 (6), P. 3513-3523.
14. Акуличев, В.А. Акустическое зондирование газовых пузырьков в морской среде/ В.А. Акуличев, В.А. Буланов, С.А. Кленин// Акустический журнал, 1986. Т. — 32. — вып. 3. — С. 289-295.
15. Луньков, А.А. Поверхностная реверберация в мелком море при использовании сфокусированного излучения/ А.А. Луньков, С.А. Переселков, В.Г. Петников// Акустический журнал, 2008. — Т. 54. — №6. — С. 971-980.
16. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики: пер. с англ. Н.М. Гусева [и др.]: Ленинград: Судостроение, 1978. — С. 278-279.
17. Стретт, Дж.В. Теория Звука/ Дж.В.- Москва: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. — Т.2. — С. 94 – 101.
18. Edward L. Acoustic scattering comparison of Kirchhoff approximation to Rayleigh-Fourier method for sinusoidal surface waves at low grazing angles/ Edward L. Richards, H. C. Song, and W. S. Hodgkiss // J. Acoust. Soc. Am. 144. —2018. — Vol. 1269.-PP. 1269-1278.
19. Peter H. Dahl. Scattering from a single bubble near a roughened air–water interface: Laboratory measurements and modeling/ Peter H. Dahl, George Kapodistrias// J. Acoust. Soc. Am. —2003. —Vol. 113 (1), P. 94.
20. Maria P. Raveau Attenuation of low-frequency sound in water containing dense bubble clouds/ Maria P. // J. Acoust. Soc. Am. — 2019. — Vol. — 145, P.892-902.

21. Alireza Bolghasi. Sound Scattering From Rough Bubbly Ocean Surface Based on Modified Sea Surface Acoustic Simulator and Consideration of Various Incident Angles and Sub-surface Bubbles' Radii/ Alireza Bolghasi, Parviz Ghadimi, Mohammad A. Feizi Chekab // J. Marine Sci. Appl. — 2016. — Vol. 15, PP. 275-287.
22. Trevor W. Dawson. A boundary integral equation method for acoustics Scattering in a waveguide with nonplanar surfaces/ Trevor W. Dawson, John A. Fawcett // J. Acoust. Soc. Am. — March 1990. — 87 (3) . — P. 1110.
23. Steffen Marburg. Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids – Finite and Boundary Element Methods Berlin/ Steffen Marburg, Bodo Nolte. — Springer 2008. — PP. 367-385.
24. Кузнецова, А.М. Натурные исследования и численное моделирование ветра и поверхностных волн на внутренних водоемах средних размеров/ А.М. Кузнецова Г.А. Байдаков, В.В. Папко [и др.] // Метеорология и гидрология. — 2016. — №2, — с.85 – 97.
25. Шендеров, Е. Л. Излучение и рассеяние звука/ Е.Л. Шендеров. — Ленинград: Судостроение, 1989. — 304с.
26. Ochmann M. Acoustical Radiation and Scattering above an Impedance Plane/ M. Ochmann, H. Brick// Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods. — Berlin. —2008, P.459-494.
27. Салин, Б.М., Исследование механизма уширения спектра низкочастотного реверберационного сигнала при рассеянии звука на приповерхностных неоднородностях в условиях интенсивного ветрового волнения/ Б.М. Салин, О.Н. Кемарская, П.А. Молчанов [и др.] // Акустический журнал. — 2017. — Т. 63. — №3. — С.314-322.

Список публикаций автора по теме научно-квалификационной работы

- 1) Байдаков, Г.А. Оценка уширения спектра коротких поверхностных волн при наличии длинноволнового волнения/ Г.А.Байдаков, А.С. Досаев, Разумов Д. Д. [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. —2018. — Т. 61 . — №5 . — С. 374-384.
- 2) Салин, М.Б. Наблюдение различных механизмов рассеяния низкочастотного звука на поверхностном волнении: традиционная брэгговская и новая феноменологическая модели рассеяния/ М.Б. Салин, Г.А. Байдаков, Д.Д. Разумов [и др.]// Учен. зап. физ. фак-та Моск. унта.. — 2017. — № 5 .
- 3) Салин, М. Б. Исследование распределения реверберационной помехи по частотам Доплера в бистатическом эксперименте в глубоком море/ М.Б. Салин, О.А. Потапов Д.Д. Разумов [и др.] // Акустический журнал. — 2019. — Т. 65. — №1. — С.31-44.
- 4) Разумов, Д.Д. Моделирование рассеяния звука на поверхностном волнении методом граничных элементов// Д.Д. Разумов, М.Б. Салин// АКУСТИКА ОКЕАНА. Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М.Бреховских". — М.:ГЕОС. — СС. 144-147.
- 5) Разумов, Д.Д. Численное моделирование рассеяния звука на поверхности моря и пузырьках с использованием метода граничных элементов/ Д.Д. Разумов, М.Б. Салин, А.С. Досаев // Тезисы докладов научной школы нелинейные волны – 2020 XIX. — Нижний Новгород. — 2020. — С. 203.
- 6) Razumov D. Multi-domain Boundary Element Method for Sound Scattering on a partly perturbed Water Surface"/ D. Razumov, M. Salin//J. of Theoretical & Computational Acoustics (JTCA). — 2020.
- 7) Razumov Dmitrii. Numerical simulations of sound scattering on a partly rough pressure-release surface using the boundary element method/ Dmitrii Razumov, Mikhail Salin// Proceedings of the International Conference Days on Diffraction. — 2019. — PP.169-174.
- 8) Salin M.B. On the mechanisms of scattering of low-frequency sound on surface waves/ М.В. Салин. О.А. Potapov, D.D. Razumov [and others] // Proc. of UACE-2017, Skiathos. — Greece. — 2017. — P.193-199.

ОГЛАВЛЕНИЕ НАУЧНО КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

ГЛАВА 1. Оценка уширения спектра коротких поверхностных волн при наличии длиноволнового волнения

- 1.1 Метод численного моделирования поверхности воды
- 1.2 Результаты численного моделирования
- 1.3 Сравнение со спектрами волнения измеренными в естественных условиях
- 1.4 Заключение

ГЛАВА 2. Численное моделирование рассеяния звука на поверхности воды с помощью оригинального двух-областного метода граничных элементов

- 2.1 Описание метода
 - 2.1.1 Решение во внутренней области
 - 2.1.2 Поле во внешней области
 - 2.1.3 Дискретизация
 - 2.1.4 Учет пузырей в двумерной модели
 - 2.1.5 Трёхмерная задача
 - 2.1.6. Заключение к разделу, поле во всём пространстве
- 2.2. Примеры моделирования
 - 2.2.1 Моделирование рассеяния звука на движущейся поверхности
 - 2.2.2 Моделирование рассеяния звука на пузырьках в двумерной модели
- 2.3 Заключение

ГЛАВА 3. Исследование распределения по частотам Доплера эхо сигнала в бистатическом эксперименте на Черном море и моностатическом на Горьковском водохранилище

- 3.1 Эксперимент на черном море, схема и условия проведения
 - 3.1.1 Основные результаты эксперимента на Черном море
 - 3.1.2 Оценка силы рассеяния
- 3.2 Наблюдение «аномального» рассеяния в эксперименте на Горьковском водохранилище
- 3.3 Заключение

ЗАКЛЮЧЕНИЕ