

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН, ФОРМИРУЮЩИХ ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ. Часть I

Касаткин С.Б.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Аннотация

Анализируются результаты экспериментальных исследований звукового поля, зарегистрированного комбинированными приемниками, образующими вертикально ориентированную трехэлементную антенну. Звуковое поле формировалось шумами НИС «Юрий Молоков» в инфразвуковом диапазоне частот. Глубина моря и рабочий диапазон частот исключали возможность возбуждения нормальных волн дискретного спектра в модельном волноводе Пекериса. По результатам спектрального анализа шумового сигнала получена оценка потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника при использовании полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля. По результатам анализа вертикальной структуры звукового поля был сделан вывод о том, что звуковое поле сформировано неоднородными нормальными волнами, локализованными на горизонте источника, которые относятся к обобщенным (гибридным) волнам. По результатам анализа вертикального волнового числа, которое принимает чисто мнимые значения в поле неоднородных волн, были получены оценки групповой скорости переноса энергии в рабочем диапазоне частот и выполнена идентификация неоднородных нормальных волн, формирующих суммарное звуковое поле.

Ключевые слова: комбинированный приемник, шумовое поле, помехоустойчивость, обобщенные неоднородные волны, групповая скорость.

IDENTIFICATION OF NORMAL WAVES FORMING A SOUND FIELD IN A SHALLOW SEA AT THE INFRASONIC FREQUENCY RANGE. Part I

Kasatkin S.B.

*Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Sukhanova st. 5a*

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Abstract

The results of experimental studies of the sound field recorded by combined receivers forming a vertically oriented three-element antenna are analyzed. The sound field was formed by the noise of the science ship «Yuri Molokov» in the infrasonic frequency range. The depth of the sea and the operating frequency range excluded the possibility of excitation of normal waves of the discrete spectrum in the model Pekeris waveguide. Based on the results of the spectral analysis of the noise signal, an estimate of the potential noise immunity of the combined receiver was obtained using a full set of informative parameters characterizing the energy structure of the sound field. Based on the results of the analysis of the vertical structure of the sound field, it was concluded that the sound field is formed by inhomogeneous normal waves localized at the source horizon, which are referred to as generalized (hybrid) waves. Based on the results of the analysis of the vertical wavenumber, which takes on purely imaginary values in the field of inhomogeneous waves, estimates of the group velocity of energy transfer in the operating frequency range were obtained and identification of inhomogeneous normal waves that form the total sound field was performed.

Keywords: combined receiver, noise field, noise immunity, generalized non-uniform waves, group velocity

ORCID id: 0000-0002-0945-8355

Введение

Звуковые поля, формируемые в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот движущимся источником, надводным или подводным, играют важную роль в проблеме разработки средств освещения подводной обстановки (СОПО). Как правило, приемные системы, предназначенные для обнаружения движущихся шумящих объектов (ШО), располагаются в шельфовой зоне, тогда как сам ШО может находиться либо в шельфовой зоне, либо в глубоком море, либо в переходной зоне шельф – глубокое море. Однако для любого ШО наибольшая дальность распространения соответствует дискретным составляющим вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР), которые относятся к инфразвуковому диапазону частот. В связи с этим исследование особенностей возбуждения и распространения звуковых сигналов инфразвукового диапазона в мелком море, а также пространственная структура звукового поля, вертикальная и горизонтальная, приобретают особое значение. Проблема заключается в том, что в модельном волноводе

Пекериса, который чаще всего используется в классическом описании звуковых полей, волновое движение, представленное нормальными волнами дискретного спектра, на частотах, меньших первой критической частоты, отсутствует. Другая составляющая суммарного звукового поля представлена в классическом решении (Бреховских Л.М.) сплошным спектром, и она является единственной составляющей на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса. Принципиальная особенность этой составляющей заключается в том, что она формируется в ближней (чисто реактивной) зоне источника. Ее уровень максимален на границе раздела вода – морское дно и убывает с квадратом расстояния, а поток мощности в волноводе равен нулю. Принято считать, что этот фактор существенно ограничивает дальность распространения низкочастотных сигналов инфразвукового диапазона в мелком море. Цель настоящей работы как раз и заключается в исследовании особенностей пространственно-частотной структуры звуковых полей, формируемых в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот, в скалярно-векторном описании, которое обеспечивает также и полноту описания его энергетической структуры. Наиболее интересны в этой области результаты исследования вихревой составляющей вектора интенсивности и связанного с ней явления инверсии горизонтальных потоков мощности [1], результаты исследования эффектов компенсации потоков мощности [2], новые результаты по измерению с помощью КП углового спектра ШО [3], новые результаты по проблеме определения координат и параметров движения цели [4]. Кроме того, использование в эксперименте комбинированных приемников, способных измерять компоненты вектора интенсивности, позволит оценить корректность классического модельного описания звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот, как наиболее информативном, и обосновать модельное решение, наиболее полно соответствующее эксперименту.

Состав оборудования и место проведения эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены приемные модули ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3, оснащенные комбинированными приемниками (КП). Эксперимент проводился на акватории

залива Петра Великого. В качестве естественного источника шума использовалось НИС «Юрий Молоков» и его дискретные составляющие вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР). Горизонты установки приемных модулей ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3 составляют $z_1 = 40$ м, $z_2 = 37$ м, $z_3 = 34$ м, глубина места $h = 43\text{--}44$ м. Дистанция между ШО и приемной системой изменялась от 2 км в начальной точке до 1 км в точке траверза и оставалась примерно постоянной при последующем движении ШО по дуге окружности. Профиль вертикального распределения скорости звука соответствовал придонному звуковому каналу. Волнение моря за время проведения эксперимента было минимальным и не превышало 2–3 балла.

Обработка сигналов и оценка потенциальной помехоустойчивости КП

Обработка сигналов предполагает спектральный анализ сигналов на основе БПФ в каналах комбинированного приемника, вычисление полного набора информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звукового поля в скалярно-векторном описании, построение проходных характеристик и соответствующих сонограмм звукового поля в рабочем диапазоне частот в рабочем интервале времени. Для оценки потенциальной помехоустойчивости КП в составе вертикальной антенны была выполнена в блоке обработки сигналов (БОС) обработка всей скалярно-векторной информации, представленной набором 16 информативных параметров, как это описано в работах [5, 6], по дискретным составляющим ВЛЗР НИС «Юрий Молоков». Полный перечень информативных параметров и их вклад в помехоустойчивость комбинированного приемника приведен в работах [5, 6]. Он включает в себя величины второго порядка, определенные в поле звукового давления $p(z, r)$, комплексного вектора интенсивности $\bar{I}(z, r)$, вещественного ротора вектора интенсивности $rot \bar{I}(z, r)$ и комплексного вектора градиента давления $g(z, r)$:

$$A_1 = p^2, A_2 = I_{1x}, A_3 = I_{1y}, A_4 = I_{1z}, A_5 = I_{2x}, A_6 = I_{2y}, A_7 = I_{2z}, A_8 = rot_x \bar{I}, A_9 = rot_y \bar{I}, \\ A_{10} = rot_z \bar{I}, A_{11} = g_{1x}^2, A_{12} = g_{1y}^2, A_{13} = g_{1z}^2, A_{14} = g_{2x}^2, A_{15} = g_{2y}^2, A_{16} = g_{2z}^2. \\ \bar{I} = \bar{I}_1 + i\bar{I}_2, g = \bar{g}_1 + i\bar{g}_2, p = p_1 + ip_2.$$

Эти параметры эквивалентны, но не тождественны компонентам 4-мерного тензора второго ранга (тензора потока мощности), приведенного в работе [7]. В любом случае 16 вещественных информативных параметров составляют полное описание энергетической структуры звукового поля с привлечением скалярных, векторных и тензорных величин, т.к. ротор вектора интенсивности является антисимметричной частью тензора второго ранга, производного от вектора интенсивности.

Сонограммы звукового поля в диапазоне частот ВЛЗР на выходе канала звукового давления поясняются рис. 1 для трех приемных модулей вертикальной антенны. Рис. 2 поясняет сонограммы звукового поля на выходе блока обработки сигналов БОС (компаратора). В этом блоке вычисляется максимальное отношение (S/N) из 16 возможных

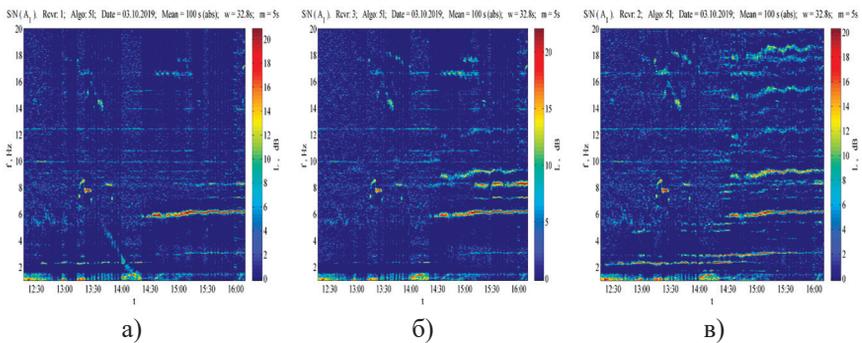


Рис. 1. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе канала звукового давления: а) ПМ-1; б) ПМ-2; в) ПМ-3

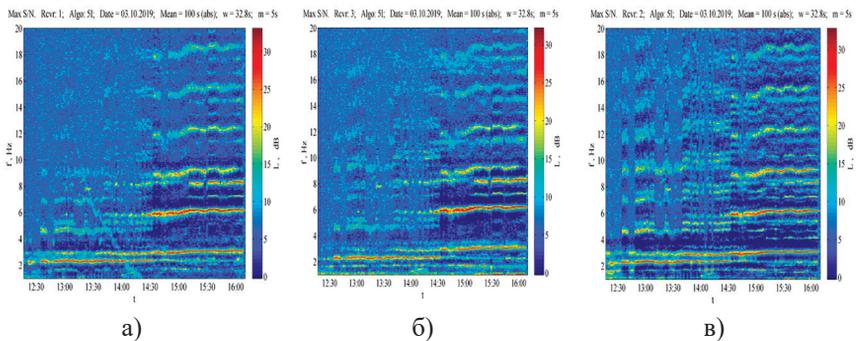


Рис. 2. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе БОС: а) ПМ-1; б) ПМ-2; в) ПМ-3

в диапазоне инфразвуковых частот 1–20 Гц. Так наиболее яркие дискретные составляющие ВЛЗР соответствуют лопастным частотам (3 Гц, 6 Гц, 9 Гц и т.д.), менее яркие дискретные составляющие соответствуют вальным частотам, которые видны на сонограммах с шагом в 1 Гц. Очевидно, что они соответствуют 3-лопастному винту и гребному валу, совершающему 60 об/мин.

Следует отметить, что все дискретные составляющие ВЛЗР в диапазоне 1–20 Гц, представленные на сонограммах, меньше первой критической частоты для модельного волновода Пекериса. Рис. 3 поясняет сонограммы для оценки потенциальной помехоустойчивости КП для трех приемных модулей при использовании традиционного для гидроакустики определения, описанного в работе [7]. Можно отметить, что все приемные модули обнаруживают широкий набор дискретных составляющих ВЛЗР, но только после обработки всех 16 информативных параметров.

Потенциальная помехоустойчивость каждого из приемных модулей оценивается в 25–30 дБ. Очевидно также, что максимальный уровень сигнала соответствует приемному модулю ПМ-3, глубина позиционирования которого минимальна, а уровень сигнала монотонно убывает с увеличением глубины позиционирования КП. Следует отметить, что подобное распределение уровня принципиально отличается от классического описания, в соответствии с которым уровень сигнала в поле нормальных волн сплошного спектра максимален на границе раздела вода – морское дно.

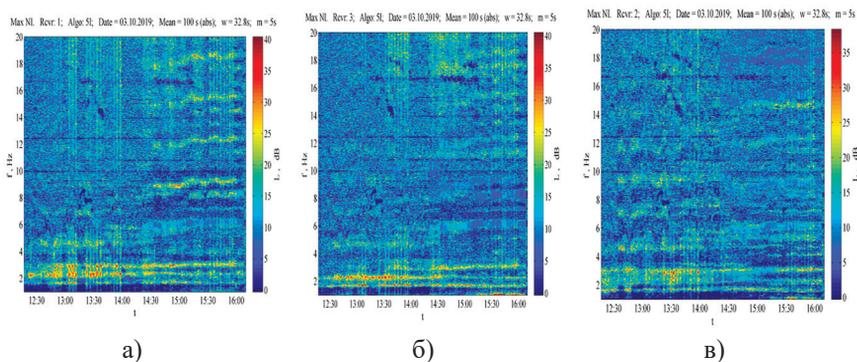


Рис. 3. Сонограммы для оценки помехоустойчивости КП:
 а) ПМ-1; б) ПМ-2; в) ПМ-3

Анализ вертикальной структуры поля неоднородных волн

Для более детального анализа вертикальной структуры звукового поля рассмотрим также набор проходных характеристик. Рис. 4 а, б поясняют проходные характеристики в каналах приемных модулей ПМ-1, ПМ-3, разнесенных по вертикали на 6 м, в полосе частот 2–4 Гц (в окрестности первой лопастной частоты), в которой хорошо регистрируются вторая и третья дискретные составляющие ВЛЗР. Верхняя строчка относится к каналу звукового давления, в котором вычисляется

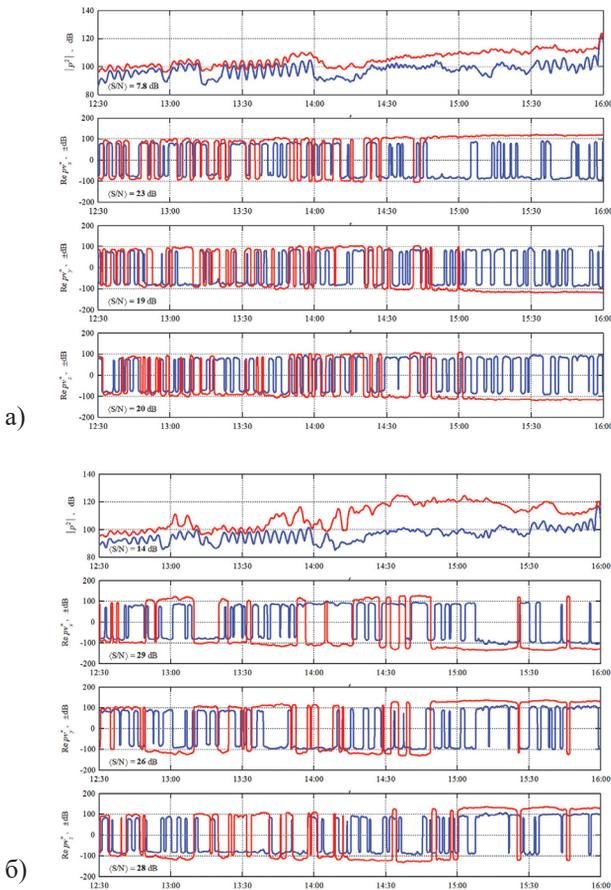


Рис. 4. Проходные характеристики в каналах КП:
а) ПМ-1; б) ПМ-3, полоса частот 2–4 Гц

уровень звукового давления в дБ. Красная линия относится к суммарному процессу сигнал плюс помеха ($S + N$), синяя линия относится к помехе N . Здесь под помехой понимается уровень звукового давления в суммарном поле ($S + N$), усредненный в частотной области достаточно широким окном Хэмминга. Ширина окна Хэмминга выбирается такой, чтобы уровень возможных дискретных составляющих суммарного процесса ($S + N$) уменьшился до уровня фоновой помехи (подобная процедура известна как процедура «отбеливания»). Следующие строчки относятся к векторным каналам (x, y, z), в которых вычисляются положительно определенные логарифмические уровни компонент вещественной составляющей вектора интенсивности, знак которых при отображении на графике определяется знаком самой компоненты вектора интенсивности [5]. При отображении пространственной зависимости искомых величин на проходных характеристиках все величины усреднялись пространственным окном Хэмминга длительностью 100 с. Проходные характеристики в векторных каналах КП убедительно свидетельствуют о том, что потоки мощности в волноводе отличны от нуля, что противоречит классическому описанию. Можно отметить также присутствие во всех векторных каналах вихревой (знакопеременной в горизонтальных каналах) составляющей вектора интенсивности, впервые исследованной в работе [8]. Основная причина появления вихревой составляющей связана с вытекающими нормальными волнами комплексного спектра с горизонтальными волновыми числами ($\xi = \xi^*$), принадлежащими двум сопряженным операторам, которые продолжают в волноводе стоячими волнами.

Стоячие волны появляются в решении, построенном в несамосопряженной модельной постановке. Подобная теория изложена ранее в работах [9, 10] и более подробно в работе [5] в рамках сравнительного анализа различных модельных решений задачи Пекериса. Можно также отметить, что вытекающие волны на столь низких частотах вносят существенный вклад в суммарное звуковое поле, а следовательно, и в процесс формирования вихревой составляющей вектора интенсивности в структурах типа стоячих волн. На всех рисунках приведены средние по трассе значения отношения (S/N) в дБ. Рис. 5 а, б поясняют проходные характеристики в каналах КП для отношения $(S + N) / N$,

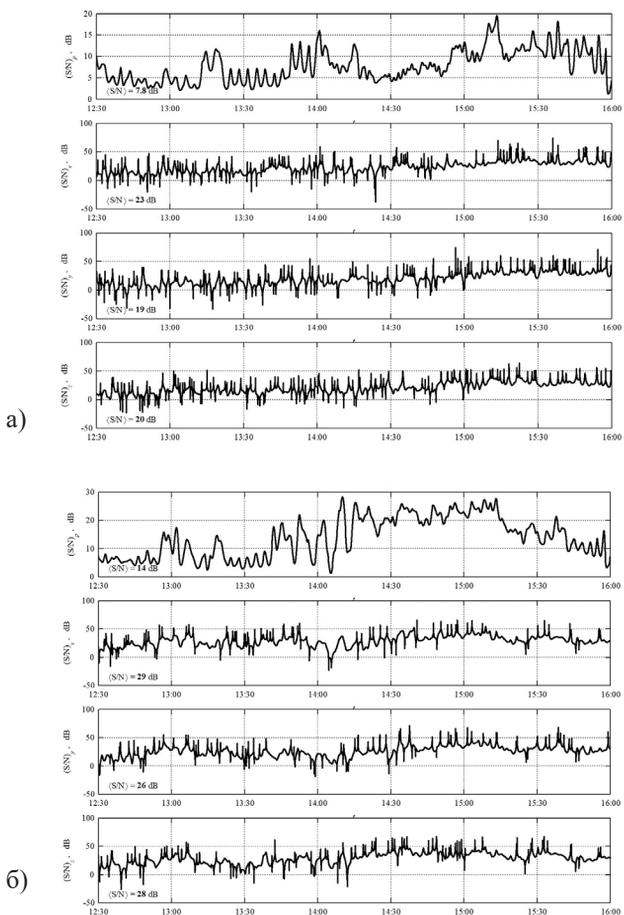


Рис. 5. Проходные характеристики для отношения $(S + N)/N$ в каналах КП: а) ПМ-1; б) ПМ-3, полоса частот 2–4 Гц

выраженного в дБ. Как отмечалось ранее в работах [5, 6], экстремально высокие значения этого отношения соответствуют процессам компенсации направленных потоков мощности в поле помехи. Экстремально низкие значения этого отношения соответствуют процессам компенсации направленных потоков мощности в суммарном поле $(S + N)$ в окрестности седловых точек в пространственной структуре поля вектора интенсивности [11, 12]. Именно процессы компенсации потоков мощности в поле помехи позволяют увеличить среднее по

трассе отношение (S/N) и помехоустойчивость КП. Сам эффект существенно увеличивается с увеличением числа информативных параметров, описывающих энергетическую структуру звукового поля в блоке обработки сигналов (БОС), с последующим применением компаратора, выбирающего информативный параметр, которому соответствует максимальное отношение (S/N) . Из анализа сонограмм можно также отметить характерное увеличение частоты максимума спектральной плотности мощности с уменьшением расстояния между приемной системой и ШО. Эта характерная особенность свидетельствует о том, что инвариант интерференционной структуры звукового поля принимает отрицательные значения [13], что характерно именно для поля неоднородных волн и волн, локализованных в звуковых каналах (в придонном звуковом канале).

Таблица 1. Максимальные значения отношения (S/N)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}
$(S/N)_1$	17	23	22	22	22	24	27	31	32	29	32	32	35	35	32	36
$(S/N)_3$	23	28	23	29	28	28	29	32	33	32	36	36	37	37	36	37

Максимальные значения отношения (S/N) для всех 16 информативных параметров сведены в таблицу 1 для приемных модулей ПМ-1, ПМ-3 в частотном диапазоне 2–4 Гц. Анализ табличных данных, а также данных, приведенных на рис. 2 для усредненных значений отношения $(S + N)/N$ в скалярном поле звукового давления, позволяет оценить коэффициент затухания неоднородной волны в вертикальном направлении (чисто мнимое вертикальное волновое число α), для которого получаем оценку $\alpha = 0.5 \text{ дБ/м} = 0.058 \text{ м}^{-1}$ на средней частоте 3 Гц. Можно также отметить, что векторные поля имеют более сложную структуру, в которой существенную роль играют вертикальные компоненты векторных величин. Полученные оценки убедительно свидетельствуют о том, что неоднородная волна локализована на горизонте источника, а ее уровень экспоненциально быстро убывает при удалении от горизонта источника. Рис. 6 поясняет сонограммы звукового поля в диапазоне частот 2–4 Гц.

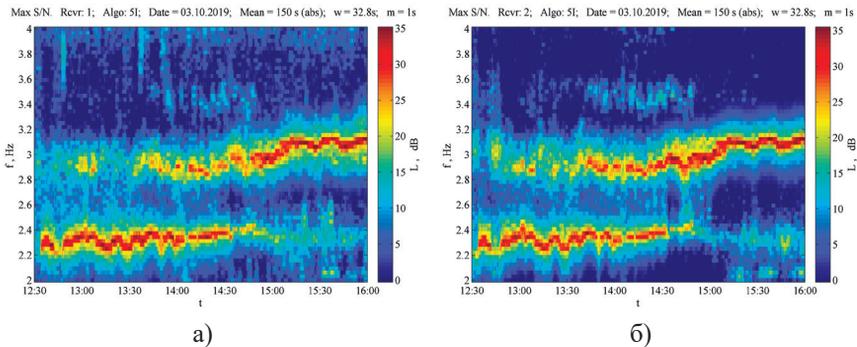


Рис. 6. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе БОС: а) ПМ-1; б) ПМ-3

Аналогичные оценки вертикальной структуры звукового поля были выполнены в звуковом поле, представленном 8 и 9 дискретными составляющими ВЛЗР, в частотном диапазоне 8–10 Гц (в окрестности 3 лопастной частоты), для частотного диапазона 14–16 Гц в окрестности 5 лопастной частоты и для рабочей полосы частот 17–19 Гц, где уверенно регистрируется 6 лопастная частота ВЛЗР. Полученные оценки коэффициента затухания (чисто мнимого вертикального волнового числа) позволяют оценить эффективную скорость распространения неоднородных волн, формирующих звуковое поле, и их частотную зависимость по формуле

$$\left(\frac{c_{эфф}}{c_1} \right)^2 = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{k_1} \right)^2 \right]^{-1} = \left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda_1}{2\pi} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $c_{эфф}$, c_1 – эффективная скорость неоднородной волны и скорость звука в водной среде соответственно, α – вертикальное волновое число, λ_1 – длина волны в водной среде на соответствующей частоте рассмотренного диапазона частот.

Идентификация неоднородных нормальных волн

Полученные экспериментальные данные убедительно свидетельствуют о том, что уровень неоднородных нормальных волн, формирующих звуковое поле, убывает экспоненциально быстро при удалении от горизонта источника по всем параметрам, характеризующим

энергетическую структуру звукового поля. Этот экспериментальный факт означает, что максимальный уровень неоднородных волн соответствует горизонту источника. Однако в классическом описании звукового поля на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса, неоднородные нормальные волны отсутствуют. В более сложном волноводе жидкий слой – твердое полупространство в классическом описании звукового поля в этом диапазоне частот существует только одна волна Рэлея – Шолте, но она локализована на границе раздела вода – морское дно. Для идентификации неоднородных нормальных волн, формирующих звуковое поле в инфразвуковом диапазоне частот в мелком море, воспользуемся результатами работы [14], в которой выполнен анализ неоднородных волн в классическом волноводе Пекериса и в более сложном волноводе жидкий слой – твердое полупространство в рамках несамосопряженной модельной постановки соответствующих граничных задач. В рамках этой модельной постановки в классическом волноводе Пекериса на частотах, меньших первой критической частоты, возможна обобщенная (гибридная) волна, локализованная на горизонте источника. Эта волна соответствует нулю коэффициента отражения на границе раздела двух жидких сред, который реализуется при комплексных углах падения. Скорость распространения обобщенной волны в этом случае дается выражением:

$$c_0 = c_1 \sqrt{\frac{1 - \rho_{12}^2}{1 - \rho_{12}^2 c_2^2}}, \quad (2)$$

где $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$; $c_{12} = c_1 / c_2$; ρ_1, c_1, ρ_2, c_2 – плотность и скорость звука в верхнем и нижнем полупространствах соответственно. Для типичных значений плотности и скорости звука в неконсолидированных осадках, слагающих морское дно в заливе Петра Великого, приведенных в работе [15], скорость обобщенной волны в этом случае на 5–8% меньше скорости звука в водной среде c_1 . В более сложном волноводе жидкий слой – твердое полупространство неоднородной волной, локализованной на горизонте источника, является обобщенная (гибридная) волна Шолте Lt-типа, соответствующая нулю коэффициента

отражения границы раздела жидкого и твердого полупространств. Эта волна реализуется при комплексных углах падения и при выполнении неравенства

$$\rho_{12} < (1 - c_{i1}^2)^{1/2} (1 - c_{iL}^2)^{-1/2}, \quad (3)$$

где $c_{i1} = c_i / c_1$; $c_{iL} = c_i / c_L$ - c_i, c_L - скорости поперечных и продольных волн в твердом полупространстве соответственно.

Полный анализ волн Шолте, регулярных и обобщенных, на границе раздела жидкого и твердого полупространств был выполнен в работе [16], а в работе [17] было получено экспериментальное подтверждение их существования. Анализ энергетических соотношений в поле неоднородных волн выполнен в работе [14]. Скорость обобщенной волны Шолте Lt-типа (c_{u2}) заведомо меньше скорости поперечной волны в твердом полупространстве. Например, в слабо консолидированных осадках, слагающих морское дно в заливе Петра Великого на малых глубинах, она не превышает первых сотен (м/с) и существенно меньше скорости обобщенной волны c_0 . Можно предположить, что в рассматриваемом случае звуковое поле формируется двумя обобщенными волнами. Одна из них (волна Шолте Lt-типа) является низкоскоростной ($c_{u2} < c_i$), а вторая волна является сравнительно высокоскоростной ($c_0 > c_{u2}$). Групповую скорость как скорость переноса энергии вдоль волновода в звуковом поле, сформированном двумя нормальными волнами с известными групповыми скоростями, можно определить формулой усреднения обратных скоростей с весовыми коэффициентами, которые, должны определяться энергетикой составляющих суммарного волнового движения

$$\frac{1}{c_{эфф}} = \frac{\Pi_0}{c_0} + \frac{\Pi_{u2}}{c_{u2}}; \Pi_0 = \frac{P_0}{P_0 + P_{u2}}; \Pi_{u2} = \frac{P_{u2}}{P_0 + P_{u2}}; \Pi_0 + \Pi_{u2} = 1$$

$$c_{эфф} = \frac{c_0 c_{u2}}{c_0 \Pi_{u2} + c_{u2} \Pi_0} = \frac{c_{u2}}{1 - \Pi_0 + \Pi_0 c_{u2} / c_0}, \quad (4)$$

где P_0, P_{u2} - парциальная мощность, приходящаяся на соответствующие обобщенные волны. В соответствии с формулой (4) эффективная

групповая скорость совместного волнового движения, представленного двумя неоднородными волнами, приобретает дисперсионную (частотную) зависимость. На сравнительно высоких частотах глубина проникновения звукового поля в донное полупространство мала, верхний слой неконсолидированных осадков ведет себя как эквивалентная жидкость, а групповая скорость совместного волнового движения определяется в основном скоростью обобщенной волны c_0 , определенной в рамках модельного волновода Пекериса. На сравнительно низких частотах увеличивается глубина проникновения звукового поля в донное полупространство, увеличивается влияние сдвиговой упругости консолидированных донных осадков и низкоскоростной обобщенной волны Шолте Lt-типа, которая становится доминирующей в суммарном звуковом поле. В этом случае групповая скорость совместного волнового движения определяется в основном скоростью обобщенной волны $c_{ш2}$, определенной в рамках модельного волновода жидкий слой – твердое полупространство.

Представляет интерес физическая трактовка существенного торможения скорости потока мощности в жидком слое донным полупространством, жидким или твердым. Можно предположить, что в поле неоднородных волн, интерферирующих друг с другом, лучевая структура поля вектора интенсивности значительно усложняется формированием узловых и седловых точек (дислокаций фазового фронта в определении работы [11]). Сами лучевые траектории должны описывать локализацию звукового поля на горизонте источника и проникновение потоков мощности в донное полупространство, которое увеличивается с понижением рабочей частоты. Этим условиям удовлетворяет лучевая трактовка поля вектора интенсивности, которая поясняется рис. 7. Траектория 1 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае высоких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_0$). Траектория 2 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае низких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_{ш2}$). Согласно предложенной лучевой трактовке в энергетической структуре звукового поля неоднородных волн растет роль вертикальных потоков мощности, которые становятся доминирующими в предельном случае низких частот.

Численные оценки коэффициентов затухания потоков мощности в вертикальном направлении приведены в таблице 2. Там же приведены

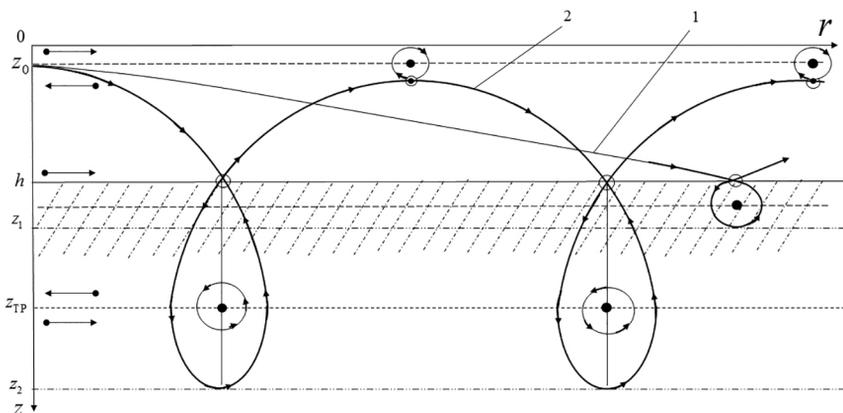


Рис. 7. Лучевая трактовка энергетической структуры поля обобщенных нормальных волн, 1 – предельный случай высоких частот, 2 – предельный случай низких частот, \circ – седловые точки, \bullet – узловые точки

оценки групповой скорости в рассматриваемом частотном диапазоне. Полученные оценки качественно совпадают с оценками групповой скорости по формуле энергетического усреднения (4) и с оценками скорости поперечных волн в консолидированных осадочных породах, слагающих морское дно в заливе Посьета [15].

Таблица 2. Численные оценки коэффициентов затухания

$f, \text{Гц}$	$ I_1 , \text{дБ}$		$\lambda, \text{м}$	$\frac{\alpha\lambda_1}{2\pi}$	$\frac{c_1}{c_{\text{эфф}}}$	$c_{\text{эфф}}, \text{М/с}$
	ПМ-1	ПМ-3				
3	25	30	500	3.68	3.8	365
9	18	24	167	1.51	1.82	825
15.6	10,5	17	96	0.94	1.37	1100
18.6	9,0	14	81	0.62	1.18	1270

Заключение

Выполнена экспериментальная оценка вертикальной структуры звукового поля на частотах, заведомо меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса. Получены оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приемника при использовании полного набора из 16 информативных параметров,

описывающих энергетическую структуру звукового поля. Эти оценки хорошо соответствуют ранее полученным в работах [5, 6] оценкам и составляют 25–30 дБ. Предложена идентификация обобщенных нормальных волн, формирующих звуковое поле, качественно объясняющая экспериментально определенную вертикальную структуру звукового поля, уровень которого убывает при удалении КП от горизонта источника. Получены экспериментальные оценки групповой скорости и ее частотной зависимости в инфразвуковом диапазоне частот с учетом сдвиговой упругости донного полупространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Новые вызовы климатической системы Земли», подпрограммы № 18-1-004 «Изучение фундаментальных основ взаимодействия разномасштабных гидроакустических, гидрофизических и геофизических процессов» и бюджетного финансирования.

Литература

1. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–843.
2. Щуров В.А., Кулешов В.П., Ткаченко Е.С., Иванов Е.Н. Признаки, определяющие компенсацию встречных потоков энергии в акустических полях океана // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 6. С. 835–843.
3. Гордиенко В.А., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н., Торопов В.Н. О локализации источников излучения на корпусе корабля при одновременном использовании комбинированного приемника и методов спектрального анализа с высоким разрешением // Ак. журн. 2011. Т. 57. № 2. С. 179–191.
4. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником. // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 33–45.
5. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., Злобин Д.В., Косарев Г.В. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании. Теория и эксперимент. Владивосток. 2019. 360 с.
6. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приемника в инфразвуковом диапазоне частот // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1(27). С. 38–47.
7. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит. 2007. 480 с.
8. Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В. Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 837–841.
9. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М. Наука. 2009. 496 с.

10. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Модельные задачи в акустике слоистых сред. Владивосток. Дальнаука. 2012. 253 с.
11. Жуков А.Н., Иванников А.Н., Кравченко Д.И., Павлов В.И. Особенности тонкой энергетической структуры звукового поля // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 4. С. 634–638.
12. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Потоки энергии в окрестности дислокаций фазового фронта // ЖЭТФ. 1993. Т. 104. Вып. 5 (11). С. 3769–3783.
13. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука. 1982. С. 71–91.
14. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Пограничные волны в проблеме обнаружения подводных источников шума // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 37–48.
15. Свининников А.И. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток. Дальнаука. 2004. С. 226–235.
16. Ansell J.H. The roots of the Stoneley wave equation for liquid-solid interfaces. Pure Appl. Geophys. 1972. V. 194. P. 172–188.
17. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 106 (2). P. 666–673.

References

1. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea // Acoustic. Journal 2011. B. 57. No. 6. P. 837–843.
2. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Tkachenko E.S., Ivanov E.N. Signs determining the compensation of counter energy fluxes in acoustic fields of the ocean // Acoustic. Journal. 2010. B. 56. No. 6. P. 835–843.
3. Gordienko V.A., Krasnopistsev N.V., Nekrasov V.N., Toropov V.N. On the localization of radiation sources on the ship's hull while using a combined receiver and high-resolution spectral analysis methods // Acoustic. Journal. 2011. T. 57. No. 2. P. 179–191.
4. Kaznacheev I.V., Kuznetsov GN, Kuzkin VM, Peresyolkov SA. Interferometric method for detecting a moving sound source with a vector – scalar receiver // Acoustic. Journal. 2018. Vol. 64. No. 1. P. 33–45.
5. Kasatkin B.A., N.V. Zlobin, S.B. Kasatkin, D.V. Zlobin, G.V. Kosarev Acoustics of the shallow sea in scalar – vector description. Theory and experiment. Vladivostok. 2019. P. 360.
6. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. Experimental assessment of the noise immunity of a combined receiver in the infrasonic frequency range // Underwater Research and Robotics. 2019. No. 1 (27). P. 38–47.
7. Gordienko V.A. Vector – phase methods in acoustics. Moscow: Fizmatlit. 2007. P. 480.
8. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Cherkasov A.V. Vortex properties of the acoustic intensity vector in a shallow sea // Acoustic. Journal. 2011. V. 57. No. 6. P. 837–841.

9. Kasatkin B.A., Zlobina N.V. Correct formulation of boundary value problems in acoustics of layered media. *M. Nauka*. 2009. P. 496.
10. Kasatkin BA, Zlobina NV, Kasatkin SB Model problems in acoustics of layered media. *Vladivostok. Dalnauka*. 2012. P. 253
11. Zhukov A.N., Ivannikov A.N., Kravchenko D.I., Pavlov V.I. Features of the fine energy structure of the sound field // *Acoustic. Journal*. 1989. Vol. 35. No. 4. P. 634–638.
12. Zhuravlev VA, Kobozev IK, Kravtsov Yu.A. Energy fluxes in the vicinity of phase front dislocations // *ZhETF*. 1993. T. 104. Issue 5 (11). P. 3769–3783.
13. Chuprov S.D. Interference structure of a sound field in a layered ocean. *Ocean acoustics. State of the art*. Moscow: Nauka. 1982. P. 71–91.
14. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B. Boundary Waves in the Problem of Detecting Underwater Noise Sources // *Underwater Research and Robotics*. 2019. No. 4 (30). P. 37–48.
15. Svininnikov A.I. Petrophysics of the western frequencies of the Pacific Ocean and the marginal seas of the east of Asia. *Vladivostok. Dalnauka*. 2004. P. 226–235.
16. Ansell J.H. The roots of the Stoneley wave equation for liquid-solid interfaces // *Pure Appl. Geophys*. 1972. V. 194. P. 172–188.
17. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // *J. Acoustic. Soc. Am*. 1999. V. 106 (2). P. 666–673.