

К ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

С.Б. Касаткин

Анализируются результаты экспериментальных исследований звукового поля, зарегистрированного комбинированными приёмниками, образующими вертикально ориентированную двухэлементную антенну. Звуковое поле формировалось дискретными составляющими вально-лопастного звукоряда шумового сигнала НИС «Юрий Молоков» в инфразвуковом диапазоне частот 2–20 Гц, а также буксируемым низкочастотным излучателем полигармонического сигнала в диапазоне частот 30–60 Гц. Глубина моря и рабочий диапазон частот 2–20 Гц исключали возможность возбуждения нормальных волн дискретного спектра в модельном волноводе Пекериса в этом диапазоне частот. По результатам спектрального анализа шумового сигнала получена оценка потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника 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 на предельно низких частотах инфразвукового диапазона сформировано регулярной волной Рэлея–Шолте, локализованной на границы раздела вода – морское дно. С увеличением частоты возрастает роль первой неоднородной (медленной) волны, возбуждаемой комплексным угловым спектром источника. В ближней зоне источника возрастает роль обобщённой волны Шолте, локализованной на горизонте источника, а звуковое поле формируется парой волн Шолте, регулярной и обобщённой, и первой неоднородной волной.

Ключевые слова: комбинированный приёмник, шумовое поле, помехоустойчивость, обобщённые неоднородные волны, гибридные волны.

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). 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 модельного волновода Пекериса, отсутствует. В первой части экспериментального исследования этой проблемы [1] были получены убедительные доказательства доминирующей роли неоднородных обобщённых (гибридных) волн, локализованных на горизонте источника, в формировании звукового поля инфра-

звукового диапазона. Эксперимент [1] проводился в ближней зоне источника на расстоянии 1–2 км от него в осеннее время года (октябрь), когда влияние придонного звукового канала в значительной мере ослаблено. Цель настоящей работы заключается в дальнейшем исследовании пространственно-частотной структуры звуковых полей инфразвукового диапазона в других гидрологических условиях и на достаточно больших расстояниях от источника. Отметим, что неоднородные обобщённые (гибридные) волны появляются при решении граничной задачи (ГЗ) для модельного волновода Пекериса, а также для более сложного волновода жидкий слой – твёрдое полупространство в несамосопряжённой модельной постановке. Такая модельная постановка является естественной и математически корректной для открытых систем типа волновода, нагруженного на полупространство. Основные особенности модель-

ного решения ГЗ для открытых волноводов в классе обобщённых функций на частотах, меньших первой критической частоты, приведены в работе [2].

Состав оборудования и место проведения эксперимента. Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены приёмные модули ПМ-1, ПМ-2, оснащённые комбинированными приёмниками (КП). Эксперимент проводился на акватории Уссурийского залива. В качестве источника звуковых сигналов использовались НИС «Юрий Молоков» и его дискретные составляющие вально-лопастного звуко-ряда (ВЛЗР), а также низкочастотный излучатель полигармонического сигнала в полосе частот 30–60 Гц. Горизонт буксировки излучателя составлял 10 м горизонты установки приёмных модулей ПМ-1, ПМ-2 составляют 16 и 24 м соответственно, глубина места $h = 43–44$ м. Дистанция между шумящим объектом (ШО) и приёмной системой изменялась от 10 миль в начальной точке трассы до 1 мили в конечной точке. Профиль вертикального распределения скорости звука соответствовал придонному звуковому каналу. Волнение моря за время проведения эксперимента было довольно заметным и составляло 3–4 балла, чему соответствовал повышенный уровень шумов моря. Схема проведения эксперимента поясняется рис. 1. В качестве рабочего использован обратный галс в интервале времени 13 ч 00 мин–15 ч 30 мин, в течение которого расстояние между НИС «Юрий

Молоков» и приёмными модулями ПМ1, ПМ2 изменялось от 10 миль до 1 мили.

■ Обработка сигналов и оценка потенциальной помехоустойчивости КП

Обработка сигналов предполагает спектральный анализ сигналов на основе БПФ в каналах комбинированного приёмника, 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 блоке обработки сигналов (БОС) компаратора в составе вертикальной антенны была выполнена обработка всей скалярно-векторной информации, представленной набором 16 информативных параметров, как это описано в работе [1], по дискретным составляющим ВЛЗР НИС «Юрий Молоков». Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2.0–20 Гц для отношения сигнал–помеха (S/N) в канале звукового давления для приёмных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 2. Время усреднения 150 с. Можно отметить, что на больших расстояниях уровень дискретных составля-



Рис. 1 Схема постановки приёмной системы и маневрирования НИС «Юрий Молоков»

ющих ВЛЗР, зарегистрированных ПМ-2, существенно выше уровня соответствующих дискретных составляющих, зарегистрированных ПМ-1. Поскольку все дискретные составляющие ВЛЗР ниже первой критической частоты модельного волновода Пекериса, сам факт существования волнового движения на столь больших расстояниях можно объяснить только в рамках обобщённого модельного решения ГЗ, соответствующего несамосопряжённой модельной постановке [2]. Сонограммы звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 2.0–20 Гц для отношения сигнал–помеха (S/N) на выходе компаратора для приёмных модулей ПМ-1 и ПМ-2 поясняются рис. 3, а, б соответственно. Можно отметить, что обработка сигналов по полному набору информативных параметров позволила существенно повысить отношение (S/N) на выходе компаратора для слабых сигналов, зарегистрированных обоими приёмными модулями на большом расстоянии от источника.

Наконец, рис. 4 поясняет оценку помехоустойчивости КП в инфразвуковом диапазоне частот. Можно отметить, что потенциальная помехоустойчивость КП правильно оценивается (15–20 дБ) только при регистрации слабых по уровню сигналов, которые усиливаются приёмным трактом без амплитудных искажений. При регистрации сильных по уровню сигналов, которые усиливаются приёмным трактом с ограничением по амплитуде, оценки помехоустойчивости оказываются существенно заниженными (3–5 дБ).

Рисунки 5–7 поясняют структуру звукового поля в канале звукового давления и в векторных каналах для дискретных составляющих полигармонического сигнала. Можно отметить достаточно высокий уровень отношения S/N для х-компоненты вектора интенсивности и ортогональной к нему у-компоненты ротора вектора интенсивности. Для других компонент этих векторов уровень отношения S/N

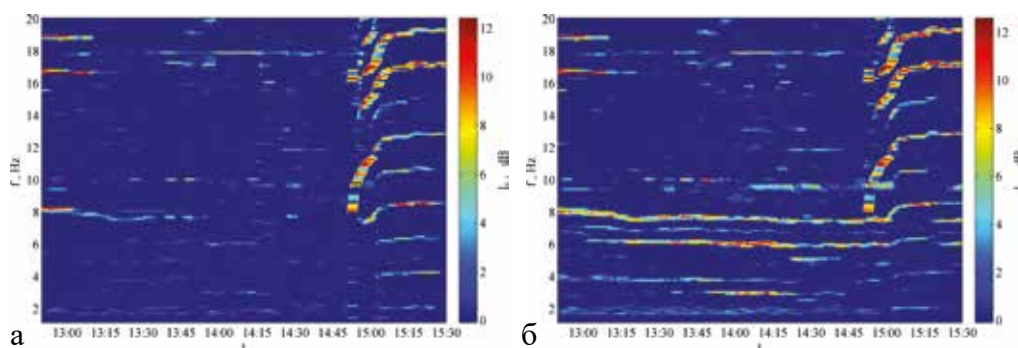


Рис. 2 Сонограммы звукового поля для отношения S/N в канале звукового давления для дискретных составляющих ВЛЗР: а – ПМ-1, б – ПМ-2

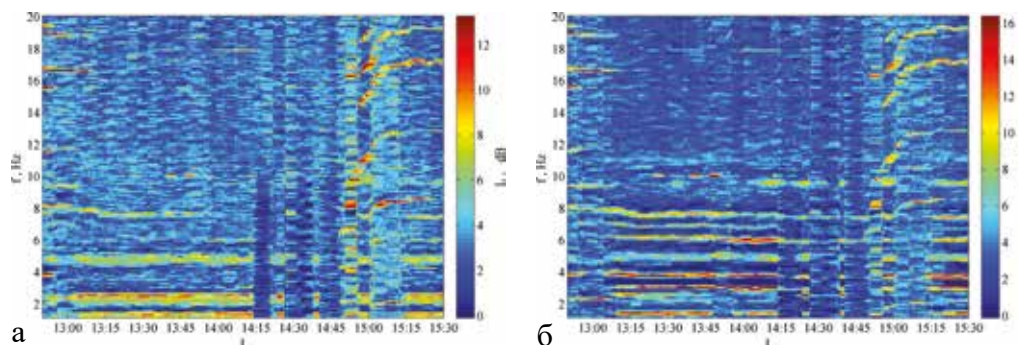


Рис. 3. Сонограммы звукового поля для отношения S/N на выходе компаратора: а – ПМ-1, б – ПМ-2

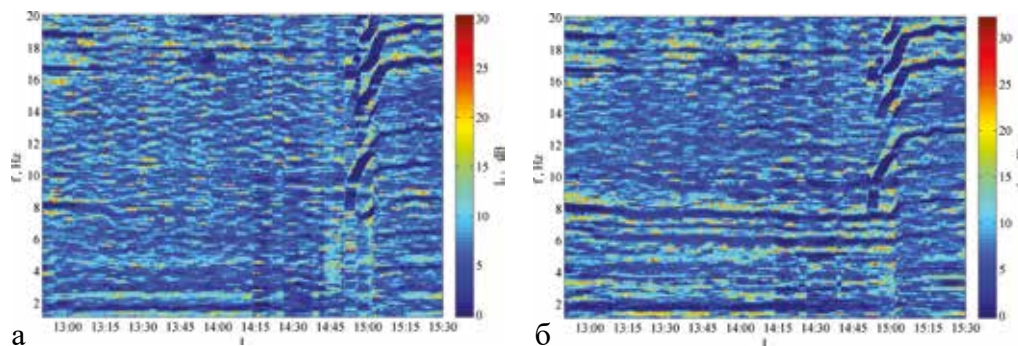


Рис. 4. Сонограммы для оценки потенциальной помехоустойчивости КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

Рис. 5. Сонограммы звукового поля для отношения S/N в канале звукового давления для дискретных составляющих полигармонического сигнала: а – ПМ-1, б – ПМ-2.

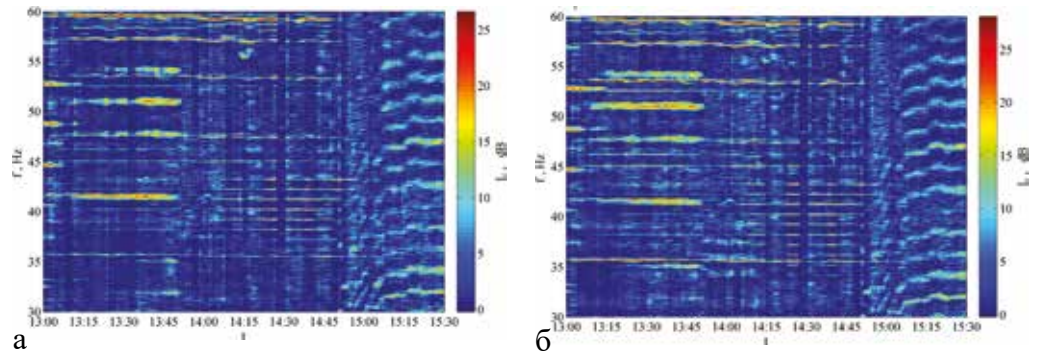


Рис. 6. Сонограммы звукового поля для отношения S/N: а – для x-компоненты вектора интенсивности, б – для y-компоненты ротора вектора интенсивности, ПМ-2

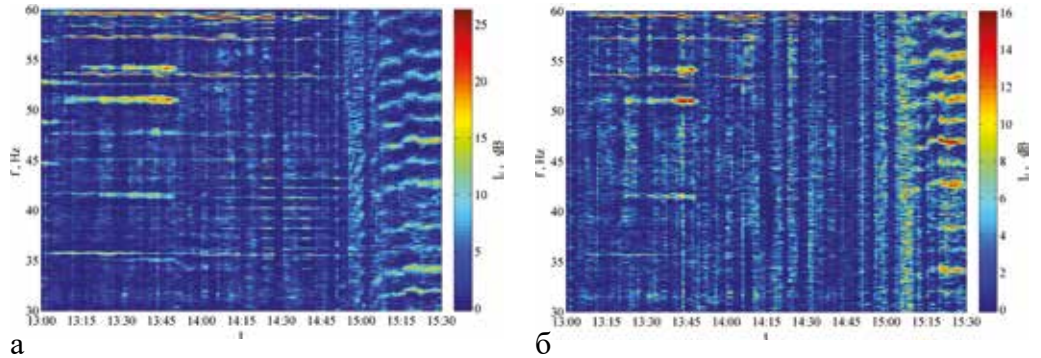
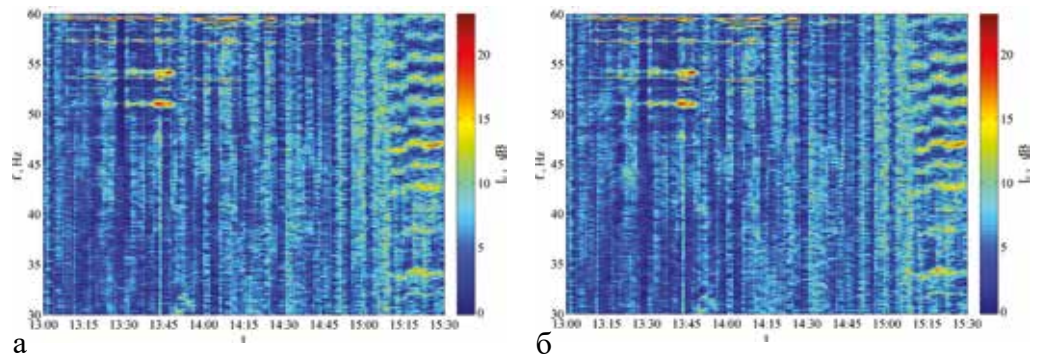


Рис. 7. Сонограммы звукового поля для отношения S/N для x-компонент: а – вещественной части, б – мнимой части вектора градиента давления, ПМ-2

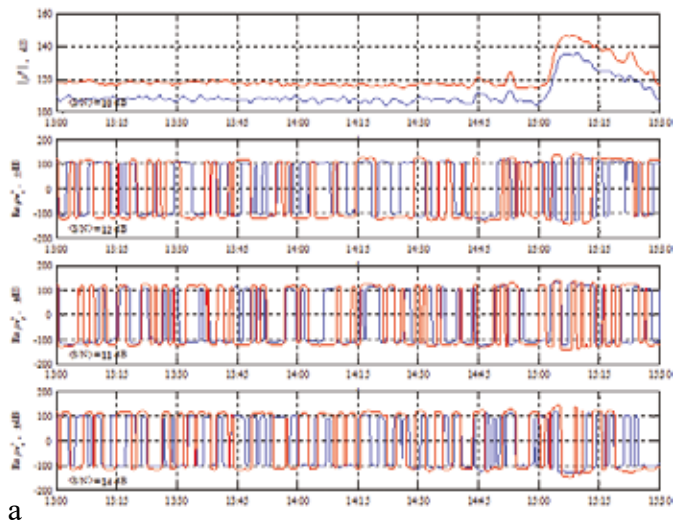


существенно ниже, что можно объяснить повышенным уровнем шумов моря. В поле вектора градиента давления также преобладают x-компоненты вектора, вещественная и мнимая, при повышенном уровне шумов моря, что поясняется рис. 7.

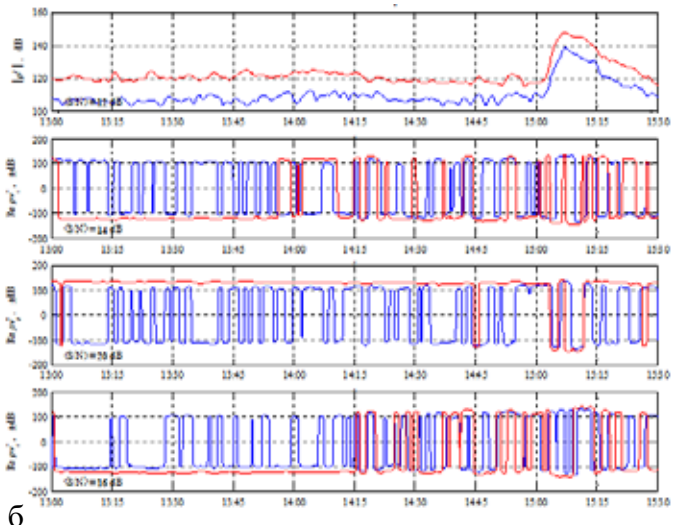
Для анализа вертикальной структуры звукового поля были построены проходные характеристики для отдельной дискретной составляющей ВЛЗР в полосе частот 2.0÷4.0 Гц в дальней зоне источника в диапазоне расстояний 10.0–5.0 миль. Проходные характеристики в каналах комбинированных приёмников поясняются рис. 8–9. Верхние строчки относятся к каналу звукового давления. Нижние строчки относятся к векторным каналам (x,y,z). Красный цвет относится к суммарному полю «сигнал плюс помеха» (S+N), синий цвет – к помехе (N), которая выделялась из суммарного процесса частотным окном Хэмминга, усредняющим дискретные со-

ставляющие суммарного волнового процесса. Логарифмические уровни векторных компонент, будучи положительно определёнными, отображаются в сторону положительных значений, если сама компонента является положительной, и в сторону отрицательных значений, если сама компонента является отрицательной. Цифрами на рисунках отмечены средние по трассе значения отношения S/N. Время усреднения 150 с. Можно отметить рост уровня сигнала во всех каналах КП с увеличением глубины постановки приёмного модуля со скоростью 9÷10 дБ на 8 м глубины. Это означает, что звуковое поле в этом диапазоне часто представлено регулярной волной Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно.

Полученные оценки коэффициента затухания (чисто мнимого вертикального волнового числа) позволяют оценить эффективную групповую скорость



а



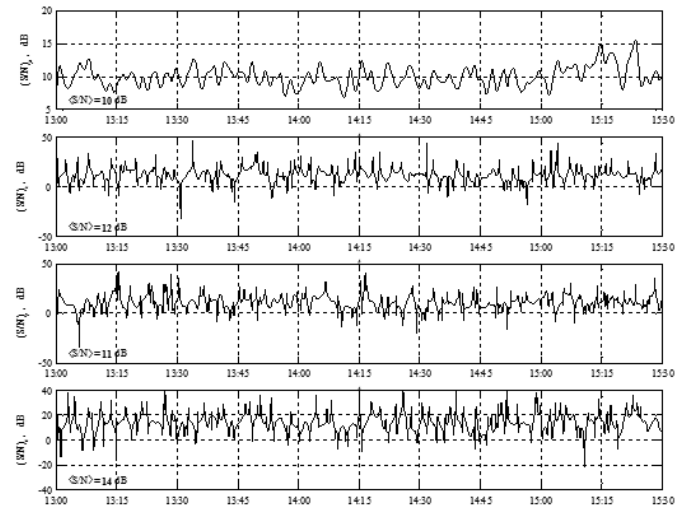
б

Рис. 8. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2, частота 2÷4 Гц

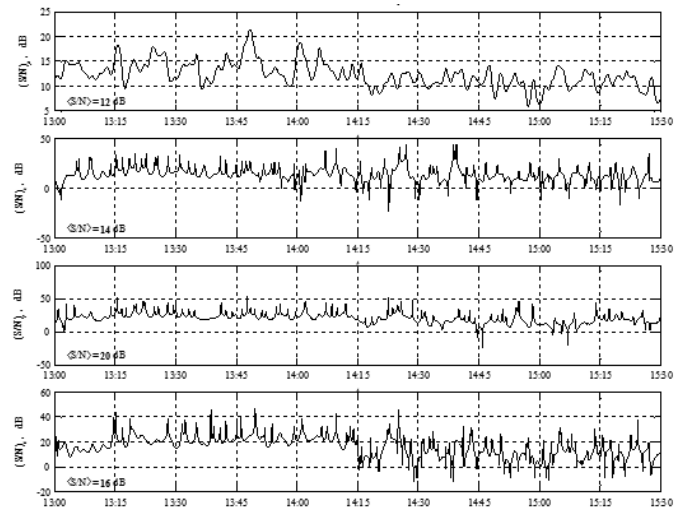
распространения неоднородных волн, формирующих звуковое поле, и их частотную зависимость по формуле

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

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. Подставляя в формулу (1) измеренные значения коэффициента α , получаем оценки скорости распространения регулярной волны Шолте и её частотную зависимость: $c_{эфф} = 290$ м/с (частота 3.0 Гц), как это сделано в работе [1]. Можно отметить также наличие знакопеременной составляющей в векторных каналах КП. Эта особенность



а

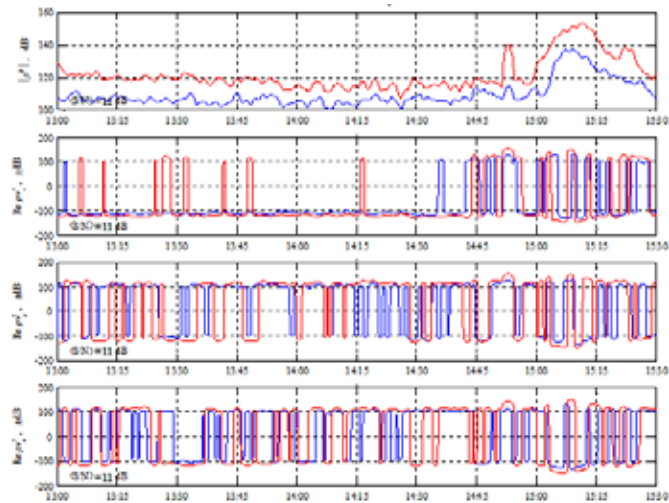


б

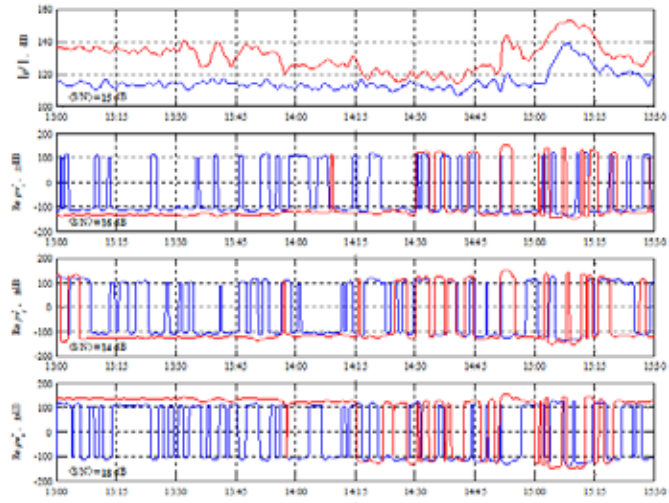
Рис. 9. Проходные характеристики для отношения S/N в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

проходных характеристик связана с наличием в суммарном звуковом поле инфразвукового диапазона вытекающих (в полупространство) нормальных волн комплексного спектра. В свою очередь, вытекающие волны продолжают в волновод стоячими волнами (в несамосопряжённой модельной постановке), в которых возрастает роль вихревых структур (знакопеременных) в векторных каналах КП, впервые обнаруженных экспериментально в работе [3] и подтверждённых численным расчётом звукового поля в работе [2].

Аналогичный анализ пространственно-частотной структуры звукового поля был выполнен в полосе частот 7.5÷8.5 Гц. Результаты анализа поясняются рис. 10–11. Можно отметить рост уровня сигнала во всех каналах КП с увеличением глубины постановки приёмного модуля со скоростью 3÷4 дБ на 8 м глубины. Численная оценка групповой скорости в этом ди-



а

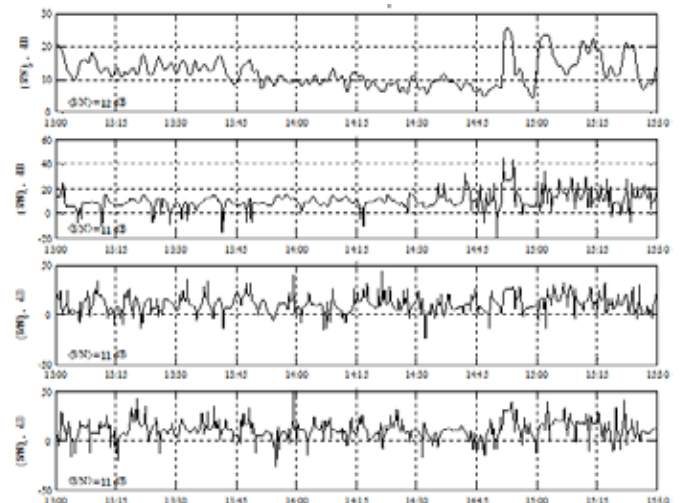


б

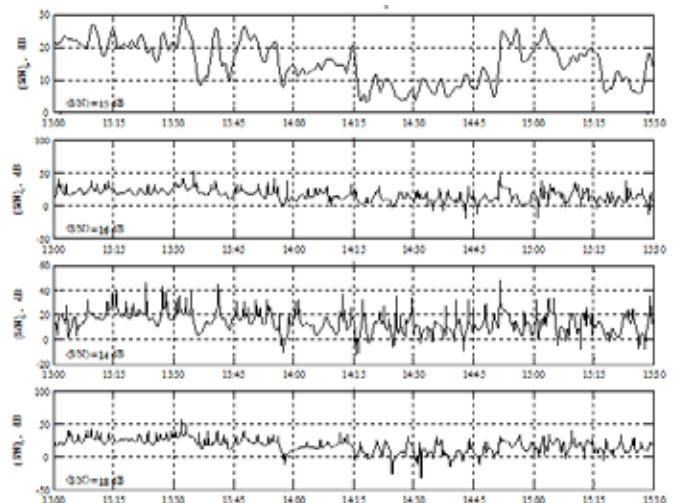
Рис. 10. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2, частота 7.5±8.5 Гц

апазоне частот (1140 м/с) неплохо соответствует ранее полученным данным [1] в этом диапазоне частот. Однако она заметно превышает скорость поперечной волны по данным работы [4], а следовательно, и скорость регулярной волны Шолте в неконсолидированных осадках верхнего слоя морского дна. Можно ожидать, что с дальнейшим увеличением частоты и появлением первой пары нормальных волн высшего порядка, локализованных в придонном звуковом канале, локализация суммарного звукового поля вблизи дна сохранится, а групповая скорость будет расти.

Рисунки 12, 13. поясняют проходные характеристики для частоты 35 Гц полигармонического сигнала, излучаемого буксируемым излучателем. Можно отметить рост уровня сигнала во всех каналах КП с увеличением глубины постановки приёмного модуля со скоростью 5÷6 дБ на 8 м глубины. Эти оценки подтверждают предположение о том, что в звуковом



а



б

Рис. 11. Проходные характеристики для отношения S/N в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2.

поле в этом диапазоне частот появляется первая неоднородная (медленная) волна, локализованная на границе раздела вода – морское дно, которая возбуждается комплексным угловым спектром источника. Скорость распространения неоднородной волны даётся выражением

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

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, приведённых в работе [4], скорость неоднородной волны в этом случае на (5÷8) % меньше скорости

звука в водной среде c_1 . Проходные характеристики, поясняемые рис. 12, 13, полностью подтверждают это предположение. Групповая скорость совместного волнового движения, вычисленная по формуле (1), увеличивается с ростом частоты до 1420 м/с.

Физическое объяснение эффекта увеличения групповой скорости дано в работе [1] и связано с возрастающей ролью неоднородной (медленной) волны первого порядка, локализованной на границе раздела вода – морское дно, скорость которой существенно больше скорости регулярной волны Рэлея–Шолте, но меньше минимальной скорости звука в самом волноводе. Эта неоднородная волна впервые появилась в модельном решении граничной задачи Пекериса, предложенном в работе китайских акустиков [5]. Само модельное решение допускает корректное продолжение в полупространство только в рамках несамосопряжённой модельной постановки самой

граничной задачи Пекериса. В этой модельной постановке звуковое поле представлено собственными функциями двух сопряжённых операторов. Эти собственные функции суть расходящиеся волны и сходящиеся волны отдачи, которые трансформируются друг в друга на горизонтах трансформации. По этой причине соответствующие им нормальные волны в модельном описании становятся обобщёнными (гибридными) волнами [2].

Представляет интерес физическая трактовка существенного торможения скорости потока мощности в жидком слое донным полупространством, жидким или твёрдым. Эта трактовка должна исходить из принципиального различия групповой скорости как скорости переноса энергии в горизонтальном направлении и скорости звука в среде как скорости распространения волны вдоль направления нормали к волновому фронту.

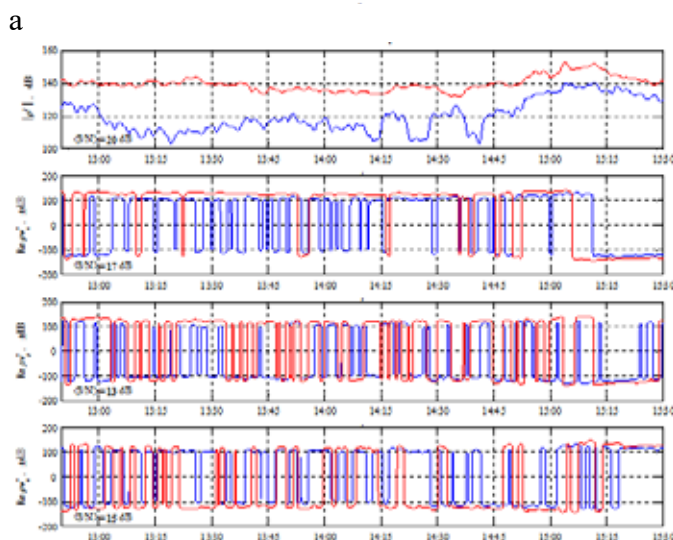
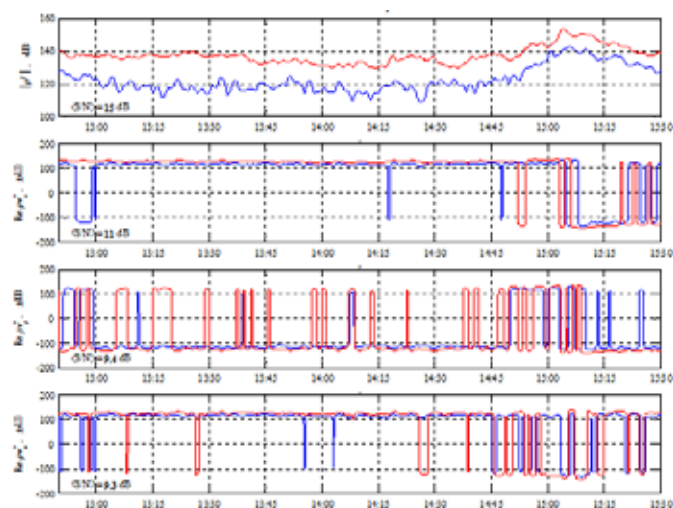


Рис. 12. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2, частота 35 Гц

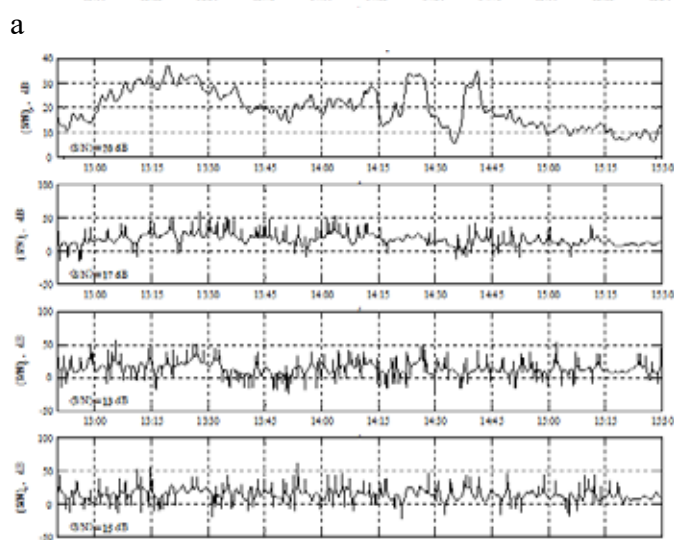
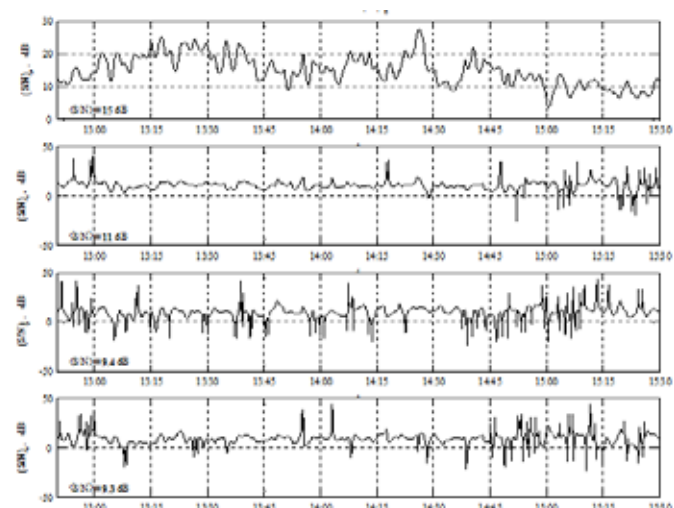
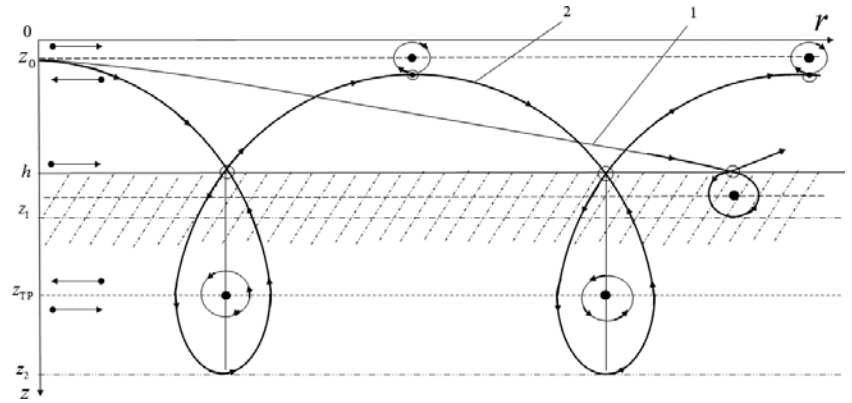


Рис. 13. Проходные характеристики для отношения S/N в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

Рис. 14. Лучевая трактовка энергетической структуры поля обобщённых (гибридных) нормальных волн, 1 – предельный случай высоких частот, 2 – предельный случай низких частот, ○ – седловые точки, ● – узловые точки



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 [6]). 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. 14. Траектория 1 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае высоких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_0$). Для этой лучевой траектории горизонт z_1 играет роль горизонта затекания поля неоднородных волн в донное полупространство. Траектория 2 поясняет лучевую структуру потоков мощности в предельном случае низких частот ($c_{эфф} \rightarrow c_{ш}$). Для этой лучевой траектории горизонт z_2 играет роль горизонта затекания поля регулярной волны Шолте в донное полупространство. Штриховые горизонтальные линии соответствуют горизонтам трансформации $z_{тр}$, причём верхний горизонт трансформации соответствует горизонту источника z_0 . Согласно предложенной лучевой трактовке в энергетической структуре звукового поля неоднородных волн растёт роль вертикальных потоков мощности, которые становятся доминирующими в предельном случае низких частот.

Наконец, можно проанализировать пространственную структуру звукового поля в ближней зоне источника, которая поясняется рис. 15, 16 для дискретной составляющей ВЛЗР в полосе частот 3.5÷4.5 Гц в ближней зоне источника. Можно отметить, что в этом диапазоне малых расстояний и рабочих частот уровни сигналов на обоих приёмных модулях, разнесённых по глубине на 8 м, отличаются незначительно ($\pm(1-2)$ дБ). Этот экспериментальный факт вполне объясним соизмеримым вкладом обобщённой волны Шолте, локализованной на гори-

зонте источника, и регулярной волны Рэлея–Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно. Пример звукового поля, сформированного этой парой неоднородных волн Шолте, регулярной и обобщённой, приведён в работе [2]. Там же приведены примеры вихревых структур в поле горизонтальных

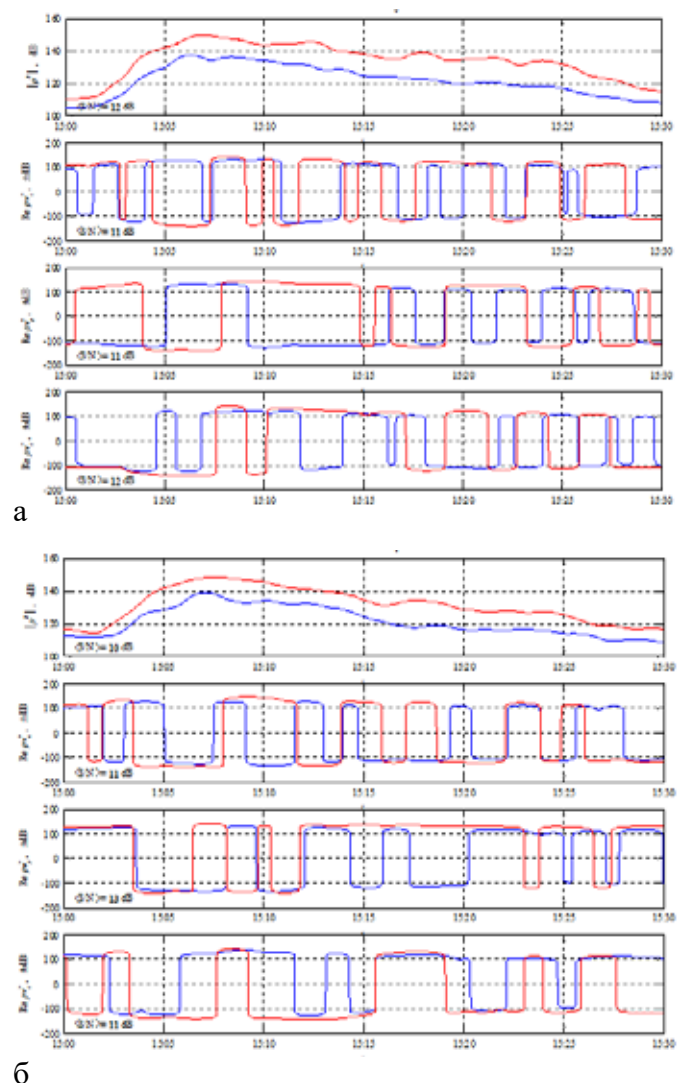
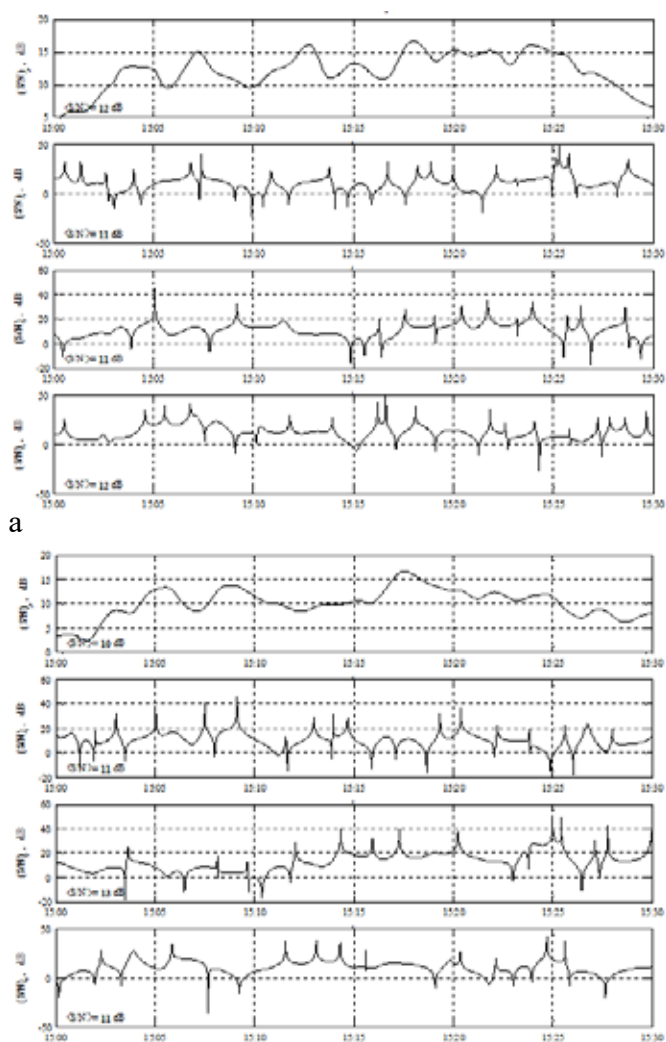


Рис. 15. Проходные характеристики в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2., частота 3.5÷4.5 Гц



б
Рис. 16. Проходные характеристики для отношения (S/N) в каналах КП: а – ПМ-1, б – ПМ-2

потоков мощности, которые хорошо подтверждаются наличием вихревых (знакопеременных) структур в векторных каналах КП на рис. 15.

Заключение

Выполнено экспериментальное исследование пространственно-частотной структуры звуковых полей в мелком море в наиболее интересном инфразвуковом диапазоне частот в диапазоне расстояний 1÷18 км. Показаны преимущества обработки всей скалярно-векторной информации по полному набору информативных параметров, характеризующих энергетическую структуру звуковых полей. Полученные в настоящем эксперименте оценки потенциальной помехоустойчивости комбинированного приёмника хорошо подтверждают ранее полученные оценки (15÷25 дБ). Исследована с использованием пары комбинированных приёмников, разнесённых по вертикали на 8 м, вертикальная структура звукового поля на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода Пекериса. Результаты эксперимента 2020 г. принципиально отличаются

от результатов, полученных ранее в эксперименте 2019 г. Эксперимент подтверждает решающую роль низкочастотной регулярной волны Рэлея–Шолте, локализованной на границе раздела вода – морское дно, в формировании звукового поля на предельно низких частотах инфразвукового диапазона в дальней зоне источника. Однако и в этом эксперименте групповая скорость растёт с увеличением рабочей частоты при сохранении локализации звукового поля на границе раздела вода – морское дно. Этот экспериментальный результат допускает корректное объяснение только с привлечением первой неоднородной (медленной) волны волновода Пекериса, возбуждаемой комплексным угловым спектром источника. Эта составляющая появляется в описании звукового поля в самом волноводе в модельном решении [5], и для неё выполняется асимптотическое условие ($c_{эфф} \rightarrow c_0$). Однако корректное продолжение модельного решения из волновода в полупространство возможно только в более общей, несамосопряжённой модельной постановке самой граничной задачи, допускающей существование гибридных волн. Можно отметить, что, как и в эксперименте 2019 г., экспериментальная оценка вертикальной структуры звукового поля подтверждает существование обобщённых (гибридных) волн в звуковом поле инфразвукового диапазона. Полученные экспериментальные данные подтверждают, в свою очередь, целесообразность использования несамосопряжённой модельной постановки при решении граничных задач прикладной гидроакустики в инфразвуковом диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин С.Б. Вертикальная структура звукового поля в мелком море в инфразвуковом диапазоне частот в скалярно-векторном описании // Гидроакустика. 2020. № 44(4). С. 26–36.
2. 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.
3. 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.
4. Свининников А.И. Петрофизика западной частот Тихого океана и окраинных морей востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2004. С. 226–235.
5. Gao Tain-Fu - Shang E.C. Effect of the branch-cut on the transformation between the modes and rays // J. Acoust. Soc. Amer. 1983. Vol. 73, N 5. P. 1551–1555.
6. Журавлёв 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.

Об авторах

КАСАТКИН Сергей Борисович, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: гидроакустика, обработка сигналов, шумовые поля, гибридные приемные системы, неоднородные обобщенные волны
Тел.: +7(908)440-88-54
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0002-0945-8355