

МОДУЛЯЦИЯ ПОЛЯ ПОГРАНИЧНЫХ ВОЛН
ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ
ШЕЛЬФ - ГЛУБОКОЕ МОРЕ

Б.А. Касаткин *, С.Б. Касаткин

*ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН,
Владивосток, ул. Суханова 5а, Россия,
e-mail: kasatkas@marine.febras.ru*

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния внутренних волн на интерференционную структуру звукового поля, сформированного пограничными волнами Релея – Шолте в переходной зоне шельф – глубокое море. Это влияние проявляется в периодической модуляции частоты максимума спектральной плотности мощности на сонограммах звукового поля, зарегистрированных комбинированным приёмником, в инфразвуковом диапазоне частот, причём амплитуда модуляции пропорциональна частоте. Анализируется зависимость периода модуляции от взаимного расположения приёмных модулей, шумящего судна, формирующего звуковое поле дискретными составляющими вально–лопастного звукоряда, и предполагаемого направления распространения внутренних волн. Отмечено, что наибольшее влияние внутренние волны оказывают на структуру вихревой составляющей вектора интенсивности.

Ключевые слова: внутренние волны, пограничные волны, инвариант, комбинированный приёмник, сонограмма.

MODULATION OF FIELD OF BORDER WAVES IN INTERNAL WAVES IN TRANSITION AREA OF SHELF - DEEP SEA

B.A. Kasatkin *, S.B. Kasatkin

*Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian
Academy of Sciences, Russia, Vladivostok, 5a Sukhanova st.,
e-mail: kasatkas@marine.febras.ru*

Abstract

The results of experimental studies of the influence of internal waves on the interference structure of the sound field formed by the Rayleigh-Sholte boundary waves in the transition zone of the shelf - deep sea are presented. This effect is manifested in the periodic modulation of the frequency of the maximum of the power spectral density in the sonograms of the sound field recorded by the combined receiver in the infrasonic frequency range, with the modulation amplitude proportional to the frequency. The dependence of the modulation period on the relative position of the receiving modules, the noisy vessel that forms the sound field by the discrete components of the vane – blade scale, and the expected direction of propagation of internal waves is analyzed. It is noted that internal waves have the greatest effect on the structure of the vortex component of the intensity vector.

Keywords: internal waves, boundary waves, invariant, combined receiver (acoustic vector sensor), sonogram.

Введение

Внутренние волны, относящиеся к волнам гравитационного типа, представляют определённый интерес в прикладной гидроакустике, благодаря своему влиянию на интерференционную структуру звукового поля. Проблема исследования внутренних волн в современной акустике является самостоятельным научным направлением [5], но в настоящей работе нас интересует исключительно их влияние на интерференционную структуру звукового поля, которое остаётся основным объектом исследования. Общеизвестным механизмом влияния называют механизм перемешивания водных масс в вертикальном направлении внутренней волной, который существенным образом изменяет профиль скорости звука и, соответственно, набор нормальных волн, формирующих звуковое поле, локализованное преимущественно

но в звуковых каналах. К таким каналам относятся, прежде всего, придонный звуковой канал в мелком море, в котором, как правило, располагается приёмная система, и подводный звуковой канал глубокого моря, ось которого близка к горизонту возможного позиционирования шумящего объекта (ШО) и горизонту функционирования приёмной системы, установленной на шельфе в придонном звуковом канале. Можно ожидать, что наибольший эффект внутренние волны будут оказывать на звуковое поле, сформированное пограничными волнами Рэлея – Шолте в придонном звуковом канале мелкого моря. Кроме того, внутренние волны могут оказывать существенное влияние и на звуковое поле, сформированное в подводном звуковом канале глубокого моря, ось которого может быть близка к горизонту позиционирования ШО и горизонту функционирования установленной на шельфе приёмной системы. В этом случае подводный звуковой канал глубокого моря и придонный звуковой канал в шельфовой зоне образуют акустически связанную систему, наиболее подверженную влиянию внутренних волн. Внутренние волны, распространяясь со стороны глубокого моря в шельфовую зону, могут существенным образом изменять набор нормальных волн, формирующих звуковое поле на трассе распространения ШО - приёмная система, интерференционную структуру звукового поля и основной параметр интерференционной структуры, каким является инвариант в определении работы [6]. Принято различать два характерных случая.

В случае если звуковое поле сформировано в однородном волноводе нормальными волнами высшего порядка, то соответствующие интерференционные структуры характеризуются инвариантом, принимающим положительные значения, близкие к единице. Это означает, что на сонограмме звукового поля, построенной в координатах частота – расстояние, частота максимума спектральной плотности мощности (СПМ) на изолиниях равной интенсивности (ИРИ) увеличивается с увеличением расстояния и уменьшается с уменьшением расстояния между ШО и приёмной системой.

В случае если звуковое поле сформировано нормальными волнами, локализованными в звуковом канале, придонном или подводном канале с заглублённой осью, а также в случае пограничных волн, локализованных на границе раздела вода – морское дно, то соответствующие интерференционные структуры характеризуются инвариантом, принимающим отрицательные значения. В акваториях со скальным

грунтом к пограничным волнам относятся волны Рэлея-Шолте, для которых инвариант принимает отрицательные значения на частотах, меньших первой критической, т.е. в инфразвуковом диапазоне частот. Это означает, что на сонограмме звукового поля, построенной в координатах частота-расстояние, частота максимума СПМ на изолиниях равной интенсивности (ИРИ) увеличивается с уменьшением расстояния и уменьшается с увеличением расстояния между ШО и приёмной системой. Можно также отметить, что на сонограммах звукового поля ИРИ с положительным и отрицательным значением инварианта хорошо различаются визуально [2]-[3].

Описание эксперимента

Приёмные модули ПМ-2, ПМ-3, оснащённые комбинированными приёмниками (КП), были установлены на шельфе на глубине 50м и разнесены на 8км в направлении, перпендикулярном береговой черте. Судно проходит между ними в направлении, параллельном береговой черте, причём приёмный модуль ПМ-3 расположен относительно трассы движения ШО со стороны глубокого моря при глубине места 120м, а приёмный модуль ПМ-2 расположен относительно трассы движения ШО со стороны берега при глубине места 90м. Оба приёмных модуля уверенно регистрируют дискретные составляющие вально-лопастного звукояда (ВЛЗР) ШО, формирующие на сонограммах характерные интерференционные структуры типа ИРИ, модулированные неким периодическим процессом. Сама 3D-сонограмма представляет собой звуковой портрет ШО, искажённый его движением и наблюдаемым периодическим процессом. Движение ШО вызывает изменение частоты максимума СПМ на сонограмме, соответствующее изменению расстояния и локальному значению инварианта, зависящему от типа нормальных волн, формирующих звуковое поле.

Наблюдаемый периодический процесс вызывает периодическое изменение частоты максимума СПМ на сонограммах, слабо зависящее от изменения расстояния, которое мало в зоне траверза, причём амплитуда модуляции пропорциональна частоте, а инвариант в результате такой модуляции периодически изменяет знак. С учётом этого с большой вероятностью можно предположить, что причиной модуляции являются внутренние волны, степень влияния которых на звуковое поле растёт с ростом частоты [1]. Однако модуляционные эф-

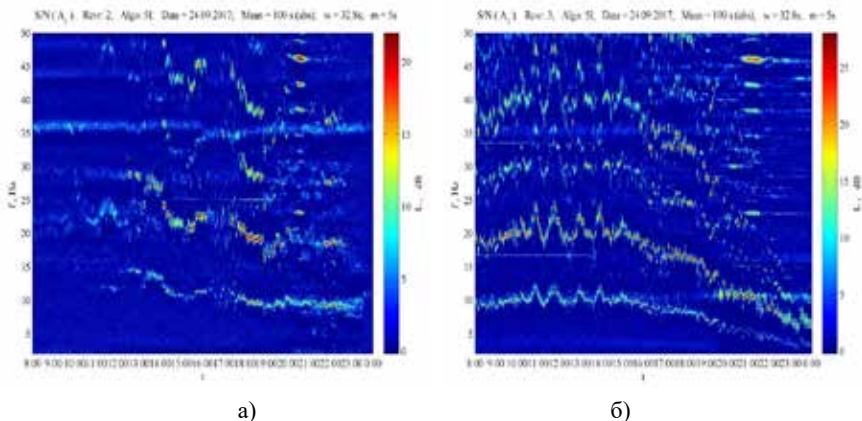


Рис.1 Сонограмма звукового поля для отношения (S/N) по параметру A_1 , а) ПМ-2, б) ПМ-3.

факты, зарегистрированные приёмными модулями ПМ-2, ПМ-3, оказались принципиально различными. Рис.1 а,б поясняют сонограммы звукового поля для отношения сигнал-помеха (S/N) на выходе канала звукового давления (параметр A_1) в инфразвуковом диапазоне частот в течение длительного (16-часового) интервала наблюдения. На сонограммах зарегистрирована периодическая структура дискретных составляющих ВЛЗР, состоящая из четырёх ИРИ, модулированных периодическим процессом. Периоды модуляции и пространственные периоды соответственно для приёмного модуля ПМ-2 существенно больше (примерно в 3-4 раза) соответствующих периодов модуляции для приёмного модуля ПМ-3. Для обоих приёмных модулей амплитуда модуляции максимальна в районе траверза, которому соответствует интервал времени регистрации 13-14час. Все особенности сонограмм и модуляционные эффекты имеют место и по другим информативным параметрам. Полный набор информативных параметров содержит 16 независимых величин A_n , включающих звуковое давление $p(z,r)$, компоненты комплексного вектора интенсивности $I(z,r)$, компоненты вещественного ротора вектора интенсивности $\text{rot}I(z,r)$ и компоненты комплексного вектора градиента давления $g(z,r)$, характеризующих звуковое поле в скалярно – векторном описании:

$A_1 = p^2$, $A_2 = I_{1x}$, $A_3 = I_{1y}$, $A_4 = I_{1z}$, $A_5 = I_{2x}$, $A_6 = I_{2y}$, $A_7 = I_{2z}$, $A_8 = \text{rot}_x I$, $A_9 = \text{rot}_y I$, $A_{10} = \text{rot}_z I$, $A_{11} = g_{1x}^2$, $A_{12} = g_{1y}^2$, $A_{13} = g_{1z}^2$, $A_{14} = g_{2x}^2$, $A_{15} = g_{2y}^2$, $A_{16} = g_{2z}^2$. $I = I_1 + iI_2$, $g = g_1 + ig_2$, $p = p_1 + ip_2$. Рис.2 а,б поясняют сонограммы звукового

поля для отношения сигнал-помеха (S/N) на выходе компаратора, учитывающего влияние всех информативных параметров на результирующее отношение (S/N).

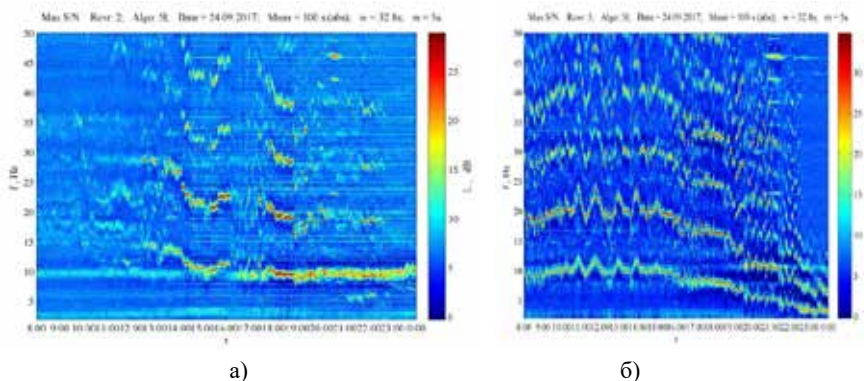


Рис.2 Сонограмма звукового поля для отношения (S/N) на выходе компаратора, а) ПМ-2, б) ПМ-3.

Геометрическая трактовка взаимодействия внутренних волн и звуковых волн

Возможное объяснение этому экспериментальному факту может заключаться в следующем. При такой геометрии эксперимента волновой вектор внутренних волн, набегающих со стороны моря, и волновой вектор звуковых волн, возбуждаемых ШО, оказываются встречными для приёмного модуля ПМ-3 и однонаправленными для приёмного модуля ПМ-2. При мультипликативной (нелинейной) обработке сигналов в пространственном спектре квадратичных по полю величин появляются разностные и суммарные пространственные частоты. По этой причине модуляция частоты максимума СПМ для приёмного модуля ПМ-3 описывается суммарными пространственными частотами, а для приёмного модуля ПМ-2-разностными пространственными частотами. Это различие в расположении приёмных модулей относительно трассы движения ШО проявляется в различном периоде модуляции частоты максимума (СПМ) на соответствующих сонограммах, построенных для приёмных модулей ПМ-2, ПМ-3. Формирование разностных пространственных частот, которым соответствуют крупномасштабные интерференционные структуры, можно пояснить в два этапа.

На первом этапе мультипликативной обработки сигналов в пространственном спектре квадратичных по полю величин появляются разностные пространственные частоты с периодом L_{12}

$$\frac{1}{L_{12}} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}; L_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

где λ_1, λ_2 -длины волн для пограничных волн Рэлея – Шолте на рабочей частоте f (Гц).

Как отмечалось ранее, интерференционные структуры в инфразвуковом диапазоне частот формируются парой пограничных волн Рэлея – Шолте, регулярной и обобщённой. Этим структурам соответствуют изолинии равной интенсивности (ИРИ) на плоскости частота-расстояние (время наблюдения на проходной характеристике) с отрицательным значением инварианта. В отсутствии внутренних волн сонограммы звукового поля на приёмных модулях ПМ-2, ПМ-3 имели бы одинаковую структуру. На втором этапе сформированные пространственные структуры модулируются внутренней волной с образованием модуляционных структур с различными периодами модуляции L_{123} СПМ на приёмных модулях ПМ-2, ПМ-3

$$\frac{1}{L_{123}} = \frac{1}{L_{12}} \pm \frac{1}{L_3}; L_{123} = \frac{\lambda_3}{\left|1 \pm \frac{\lambda_3}{\lambda} \frac{\Delta c}{c}\right|}; \lambda = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2}; \frac{\Delta c}{c} = \frac{|\lambda_1 - \lambda_2|}{\lambda}; c = \sqrt{c_1 c_2},$$

$$\Delta c = |c_1 - c_2|,$$

где λ_3 -длина внутренней волны, c_1, c_2 -скорости распространения интерферирующих волн, формирующих звуковое поле, знаки \pm относятся к модулю ПМ-3 (+) и модулю ПМ-2 (-) соответственно. При выполнении условия

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\lambda}{\lambda_3} \tag{1}$$

пространственный период модуляции L_{123} может существенно возрасти, что и наблюдается на сонограммах для приёмного модуля ПМ-2.

Для примера, возьмём следующие параметры, достаточно типичные для данного эксперимента

$$f=10\text{Гц}, c=900\text{м/с}, \lambda=90\text{м}, \lambda_3=c_3T_3, c_3=(gh)^{1/2}=30\text{м/с}, T_3=60-300\text{с}, \\ \lambda_3=1800-9000\text{м},$$

где g, h – ускорение силы тяжести и глубина места для модуля ПМ-2 .

Подставляя эти данные в (1), получаем нужную оценку:

$$\Delta c/c=(5-1)10^{-2}$$

Полученные оценки дисперсионной изменчивости фазовой скорости интерферирующих волн Рэлея – Шолте вполне реализуемы при межмодовой ($\Delta c/c=5\cdot 10^{-2}$) или внутримодовой ($\Delta c/c=10^{-2}$) интерференции, что подтверждается численными оценками дисперсии пограничных волн Рэлея – Шолте, выполненными в работах [2]-[3]. Следовательно, приведённое здесь объяснение имеет право на существование. Более тонкие особенности модуляции, связанные, например, с асимметрией модуляционных структур и самих ИРИ относительно точки траверза, связаны, возможно, с асимметрией взаимного расположения интерферирующих волн и особенностей движения самого ШО.

Наличие внутренних волн в шельфовой зоне, переходящей в открытое море, оказывает деструктивное влияние на интерференционные структуры, формируемые в звуковом поле ШО. Это влияние проявляется в том, что интерференционные структуры становятся нестационарными, их инвариантная структура становится знакопеременной, а с повышением частоты сами ИРИ теряют свою структурированность. Усложнение сонограммы и потеря её структурированности затрудняет проблему обнаружения ШО, снижает эффективность алгоритмов обработки сигналов и помехоустойчивость самой приёмной системы. Здесь под помехоустойчивостью КП понимается традиционное её определение, данное, например, в работе [1].

Можно отметить, что помехоустойчивость КП заметно снижается до отметки 8-10дБ в зоне траверза, где влияние внутренних волн на звуковое поле проявляется в наибольшей мере, и увеличивается до отметки 15-20дБ, но только для отдельных фрагментов времени наблюдения и для отдельных составляющих ВЛЗР, которые и представляют наибольший интерес. Этот интерес связан с тем, что сам экспериментальный факт влияния внутренних волн на звуковое поле и возможность визуализации этого влияния при анализе интерференционной структуры звукового поля и её инвариантов можно трактовать как новый способ изучения самих внутренних волн, визуализация которых другими способами затруднена или невозможна.

Внутренние волны и вихревые структуры в звуковом поле

Можно ожидать, что внутренние волны, влияющие существенным образом на профиль скорости звука, а через него и на интерференционную структуру звукового поля, оказывают заметное влияние и на энергетическую структуру звукового поля. Характерная особенность энергетической структуры звукового поля в волноводе заключается в том, что вектор интенсивности содержит не только потенциальную составляющую, но и соизмеримую с ней на низких частотах вихревую составляющую. Для оценки влияния внутренних волн на структуру поля вектора интенсивности желательно выбрать такие участки на сонограммах звукового поля, на которых сам КП, как векторный приёмник, в наибольшей степени отличается от гидрофона, как скалярного приёмника. Сравнительный анализ сонограмм на выходе канала звукового давления и на выходе компаратора показывает, что наибольшие изменения отношения (S/N) имели место в интервале частот 10-15 Гц в интервале времени 13-16 час. для приёмного модуля ПМ-2 и в интервале частот 2-10 Гц в интервале времени 22-24 час. для приёмного модуля ПМ-3. Проходные характеристики для отношения (S/N) по параметрам A_1 - A_4 в эти интервалы времени с выборкой максимального отношения (S/N) в заданной полосе частот для приёмных модулей ПМ-2, ПМ-3 поясняются рис. 3. Анализируя проходные характеристики, можно отметить, что в выбранном интервале времени доминирующими в поле вектора интенсивности являются горизонтальные компоненты вектора интенсивности. Для приёмного модуля ПМ-2, уровень компонент I_x, I_y на 7-11 дБ выше, в среднем по трассе, уровня вертикальной компоненты I_z . Для приёмного модуля ПМ-3, уровень компоненты I_y на 9-12 дБ выше, в среднем по трассе, уровня компонент I_z, I_x . Можно также отметить характерную коррелированность крупномасштабных интерференционных структур в среднем во всех каналах комбинированного приёмника и вероятностный характер мелкомасштабной интерференционной структуры, которая сохраняет статистическую независимость в отдельных каналах комбинированного приёмника. Как отмечено в работе [4], существенный рост отношения (S/N) в мелкомасштабных интерференционных структурах связан с процессами компенсации векторных потоков мощности в поле помехи, что и отмечено впервые в работе [7]. Однако комбинированный приёмник позволяет анализировать не

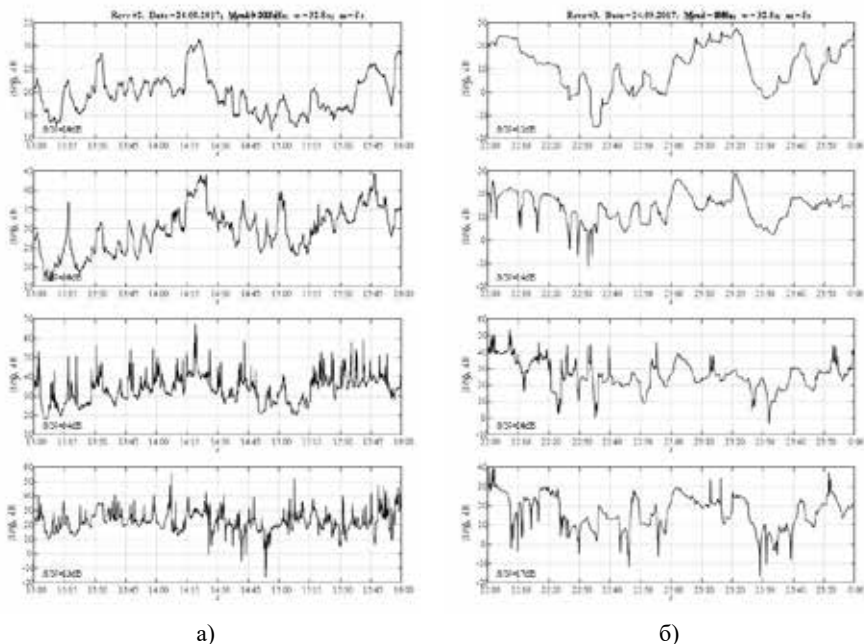


Рис.3 Пропускные характеристики для отношения (S/N) по параметрам A_1 - A_4 , а)- ПМ-2, б)- ПМ-3.

только пространственную структуру вектора интенсивности, но и его вихревую структуру, которая оценивается ротором вектора интенсивности. Как отмечалось в работах [2]-[3], роль вихревой составляющей вектора интенсивности в звуковом поле ШО повышается в условиях нерегулярного 3D-волновода в инфразвуковом диапазоне частот. Однако вихревая составляющая вектора интенсивности окажется, возможно, более чувствительной к внутренним волнам.

Пространственная структура ротора вектора интенсивности поясняется рис.4-6 для выделенных фрагментов общей сонограммы звукового поля. Анализ сонограмм на рис. 4-6 показывает, что в звуковом поле приёмного модуля ПМ-2 вертикальная компонента ротора вектора интенсивности является доминирующей, превышая другие компоненты на 3-5дБ. Это означает, что вихревые (замкнутые) структуры вектора интенсивности формируются, в основном, в горизонтальной плоскости.

В звуковом поле приёмного модуля ПМ-3 доминирует (x) компонента ротора вектора интенсивности, превышая другие компоненты

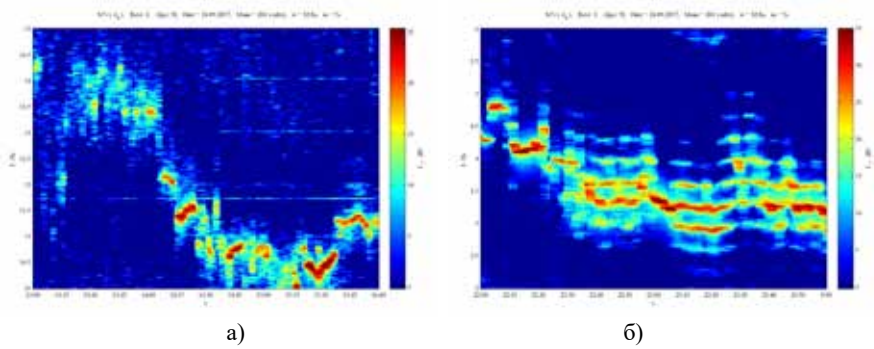


Рис.4 Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) по параметру A_8 , а) ПМ-2, б) ПМ-3.

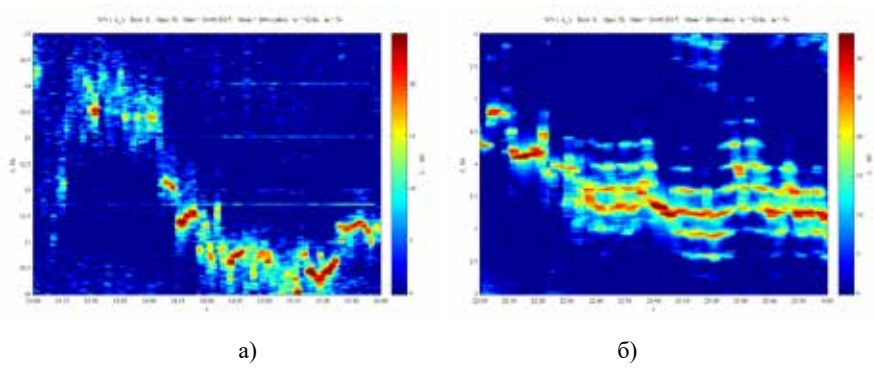


Рис.5 Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) по параметру A_9 , а) ПМ-2, б) ПМ-3.

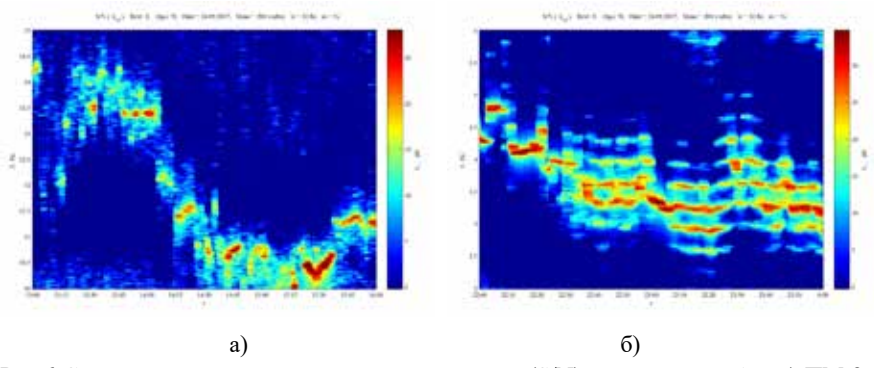


Рис.6 Сонограммы звукового поля для отношения (S/N) по параметру A_{10} , а) ПМ-2, б) ПМ-3.

на 3-5дБ. Это означает, что вихревые (замкнутые) структуры вектора интенсивности формируются, в основном, в вертикальной плоскости (y,z). Все названные различия в пространственной структуре вектора интенсивности и его вихревой составляющей для приёмных модулей ПМ-2, ПМ-3, могут быть связаны с модуляционными эффектами, крупномасштабными для приёмного модуля ПМ-2 и мелкомасштабными для приёмного модуля ПМ-3. Так, например, вполне вероятно, что крупномасштабные интерференционные структуры более чувствительны к горизонтальной нерегулярности волновода, что и приводит к образованию горизонтально ориентированной вихревой составляющей вектора интенсивности. В мелкомасштабных интерференционных структурах более вероятно образование вертикально ориентированной вихревой составляющей вектора интенсивности, связанной с вертикальной неоднородностью волновода и наличием отражающих границ. Отметим для сравнения, что в регулярном волноводе постоянной глубины вихревая составляющая вектора интенсивности в звуковом поле точечного источника ориентирована в вертикальной плоскости (r,z), ротор вектора интенсивности имеет только одну отличную от нуля угловую компоненту, которая лежит в горизонтальной плоскости (x,y), а его вертикальная компонента тождественно равна нулю. Иначе говоря, внутренние волны существенным образом повлияли на вихревую составляющую вектора интенсивности для приёмного модуля ПМ-2 для ИРИ, регистрируемой в зоне траверза, где влияние внутренних волн проявляется в наибольшей степени. В то же время, влияние внутренних волн на вихревую составляющую вектора интенсивности нивелируется для приёмного модуля ПМ-3, но только для ИРИ, регистрируемой вдали от траверза.

Как отмечалось выше, модуляционные эффекты, связанные с внутренними волнами, оказываются разрушительными для всей интерференционной структуры звукового поля, а их деструктивное влияние растёт с ростом частоты.

Заключение

Выполнен анализ скалярно – векторной структуры звукового поля движущегося источника в нерегулярном 3D-волноводе при наличии внутренних волн. Отмечена модуляция частоты максимума

спектральной плотности мощности на сонограммах звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот, а также линейный рост амплитуды модуляции с частотой. В качестве характерной особенности эксперимента отмечен различный характер модуляции на приёмных модулях, отличающихся взаимным расположением относительно направления движения источника звуковых волн и предполагаемого направления распространения внутренних волн. Предложена геометрическая трактовка особенностей модуляции, основанная на учёте взаимного расположения интерферирующих волновых процессов и направления движения ШО. Выполнен анализ вихревой структуры вектора интенсивности и влияния на неё внутренних волн. Отмечено, что сам комбинированный приёмник является эффективным средством изучения и визуализации внутренних волн и их взаимодействия со звуковым полем в наиболее информативном инфразвуковом диапазоне частот.

Благодарность

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».

Литература

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит. 2007. 480 с.
2. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Особенности распространения и интерференции нормальных волн в волноводной системе водный слой – морское дно с низкой сдвиговой упругостью. Подводные исследования и робототехника. 2018. №25(1). С. 46-58.
3. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Дисперсионные характеристики нормальных волн в мелком море с учётом сдвиговой упругости морского дна. Гидроакустика. 2018. №35 (3). С. 57-67.
4. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Экспериментальная оценка помехоустойчивости комбинированного приёмника в инфразвуковом диапазоне частот. Подводные исследования и робототехника. 2019. №27(1). (в печати).
5. Сабинин К.Д. Внутренние волны в океане. Акустика океана. Современное состояние. М. Наука, 1982, С. 209-226.
6. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука. 1982. С.71-91.
7. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток. Дальнаука. 2003г. 308 с.

References

1. Gordienko V.A. Vector-phase methods in acoustics. M.: Phismatlit. 2007. p. 480 (in Russian).
2. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. Features of the propagation and interference of normal waves in the waveguide system of the water layer - the seabed with low shear elasticity. Underwater investigations and robotics. 2018. № 25(1). p. 46-58.
3. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. Dispersion characteristics of normal waves in the shallow sea, taking into account the shear elasticity of the seabed. Hydroacoustic. 2018. № 35 (3). p. 57-67.
4. Kasatkin B.A., Kasatkin S.B. Experimental evaluation of noise immunity of a combined receiver in the infrasonic frequency range. Underwater investigations and robotics. 2019. № 27(1). (in print).
5. Sabinin KD Internal waves in the ocean. Ocean acoustics. The current state. M. Science, 1982, p. 209-226. (in Russian)
6. Chuprov S.D. Interference structure of the sound field in a layered ocean. Ocean acoustics. The current state. M: Nauka.1982. p.71-91. (in Russian)
7. Schurov V.A. Vector acoustics of the ocean. Vladivostok. Dalnauka. 2003r. p. 308. (in Russian)