

УДК: 550.341+550.834
OECD: 01.03.AA

Моделирование низкочастотного гидроакустического поля в морских акваториях

Заславский Ю.М.¹, Заславский В.Ю.^{2*}

¹Д.ф.-м.н., в.н.с., ²К.ф.-м.н., с.н.с.,

^{1,2}Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород, РФ

Аннотация

В работе анализируются низкочастотные (20–100) Гц гидроакустические волны, распространяющиеся в глубоководных и в мелководных акваториях мирового океана. Выполняется двумерное (2D) численное моделирование структуры гидроакустического поля, излучаемого гармонически осциллирующим (пульсирующим) монополем, погруженным на глубину точки минимума скорости звука. Исследуются рефракционные волновые эффекты, обусловленные плавной стратификацией океана по глубине ~ 3 км. Моделируются особенности, связанные с волноводной дисперсией, присущей модовой структуре низкочастотных волн, в прибрежных районах так называемого «мелкого моря», имеющего глубину порядка 200 м. Показано, что на дистанциях от источника первых десятков километров в структуре гидроакустических волн остается несколько мод первых номеров. Представлены амплитудные распределения, на которых демонстрируются возможности оптимизации приемной антенны и повышения эффективности регистрации сигнала. Рассматриваются возмущения структуры поля при внесении локальной неоднородности в виде сферы в водную среду на расстоянии от источника 400 м. Исследуется характер ближнего и дальнего поля рассеяния, его вклад в суммарный отклик.

Ключевые слова: низкочастотные гидроакустические волны, моделирование распространения волн в морских акваториях, глубокий океан, «мелкое море», метод конечных элементов.

Simulations of a low-frequency sonar field in marine areas

Zaslavsky Yu.M.¹, Zaslavsky V.Yu.^{2*}

¹DSc, Leading Researcher, ²PhD, Senior researcher,

^{1,2}Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

The paper analyzes low-frequency (20–100) Hz sonar waves propagating in deep and shallow waters of the world ocean. A two-dimensional (2D) numerical simulation of the structure of the sonar field emitted by a harmonically oscillating (pulsating) monopole immersed to the depth of the minimum sound velocity point is performed. Refractive wave effects caused by smooth ocean stratification at a depth of ~ 3 km are investigated. The features associated with the waveguide dispersion inherent in the mode structure of low-frequency waves in the coastal areas of the so-called ‘shallow sea’ with a depth of about 200 m are modeled. It is shown that at distances from the source of the first tens of kilometers, several modes of the first numbers remain in the

*E-mail: zas-vladislav@yandex.ru (Заславский В.Ю.)

structure of sonar waves. The amplitude distributions are presented, which demonstrate the possibilities of optimizing the receiving antenna and increasing the efficiency of signal recording. Perturbations of the field structure are considered when introducing a local inhomogeneity in the form of a sphere into an aqueous medium at a distance of 400 m from the source. The nature of the near and far scattering fields and its contribution to the total response are investigated.

Keywords: low-frequency hydroacoustic waves, modeling of wave propagation in marine waters, deep ocean, 'shallow sea', finite element method.

Введение

Анализ характеристик низкочастотных гидроакустических волн, распространяющихся в акваториях мирового океана, представляет значительный интерес для научных исследований и мониторинга морской и окружающей среды. Важными являются исследования особенностей акустического распространения, связанные с волноводной структурой мод в области «мелкого моря», а также обусловленные стратификацией, порождающей эффекты рефракции, возникающей при распространении по глубоководным океанским акваториям. Сравнение и анализ волновых характеристик, проявляемых в перечисленных сопоставляемых гидроакустических условиях, актуальны и имеют высокую практическую значимость. Важно также продемонстрировать возможность применения низкочастотного гидроакустического поля (учитывая имеющиеся особенности) к проблеме пеленга и локации уединенных неоднородностей естественного и искусственного происхождения, характерных для различных акваторий.

Очевидно, что реализация натурного эксперимента по зондированию океана в планетарном масштабе и на всю глубину (до 3 км) сопряжено с большими техническими сложностями и высокой затратностью. Поэтому наряду с многочисленными экспериментальными исследованиями значительное внимание уделяется аналитическому и численному методам анализа, моделированию излучения и распространения гидроакустических сигналов, возникающих как в природных, естественных условиях, так и создаваемых искусственно и используемых при решении прикладных проблем. При исследовании далее предполагается отсутствие и пренебрежение влиянием диссипации и потерь на рассеяние при распространении акустических волн в водной среде. Кроме того, в качестве источника излучения рассматривается пульсирующий монополь, что предположительно не вносит принципиально недопустимое упрощение при рассмотрении гидроакустического излучения современными корабельными двигателями.

В настоящей работе выполняется численное моделирование (используется широко распространенный метод конечных элементов) гидроакустического поля, излучаемого на частотах $f = 20$ Гц, 50 Гц, 100 Гц источником-монополем, погруженным в водную среду на значительную глубину. Вышеуказанные частоты попадают в полосу первых лопастных гармоник, доминирующих в спектре сигналов, излучаемых, как правило, гребным винтом судна. Проанализированы особенности волновой структуры поля в глубоком океане и в «мелком море».

На рисунке 1 а), б) схематически представлены профили изменения с глубиной скорости звука $c(z)$, которые необходимо учитывать в условиях распространения гидроакустических волн в воде по глубокому океану и по «мелкому морю». Особенности, характерные при волновом распространении в воде в обоих указанных вариантах, анализируются далее. Наиболее полный обзор имеющихся в литературе данных по результатам исследований акустики океана и «мелкого моря» (включая шельфовую зону) изложены в [1-3]. Заметим, что при моделировании имеется в виду случай

«мягких» донных пород, в которых скорость волн сдвига ниже скорости звука в воде. Амплитудное распределение по глубине донно-сейсмических колебаний ниже донной границы демонстрируется в конце работы, ввиду возможного выявления особенностей, способствующих обнаружению существенных признаков присутствия неоднородности в зоне ближней гидролокации [4-6].

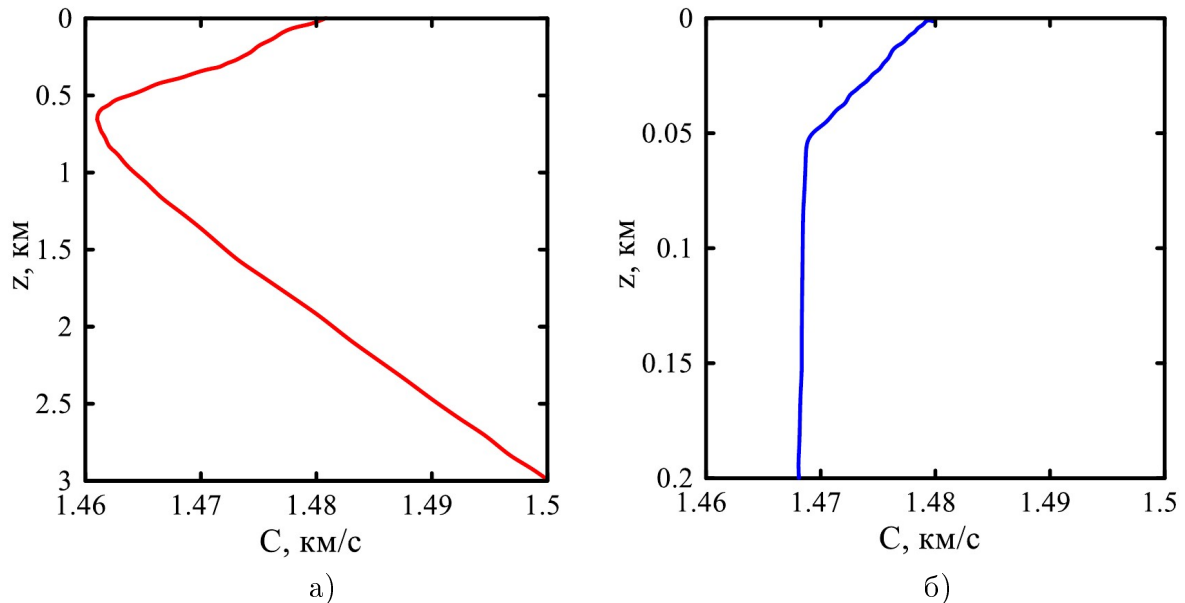
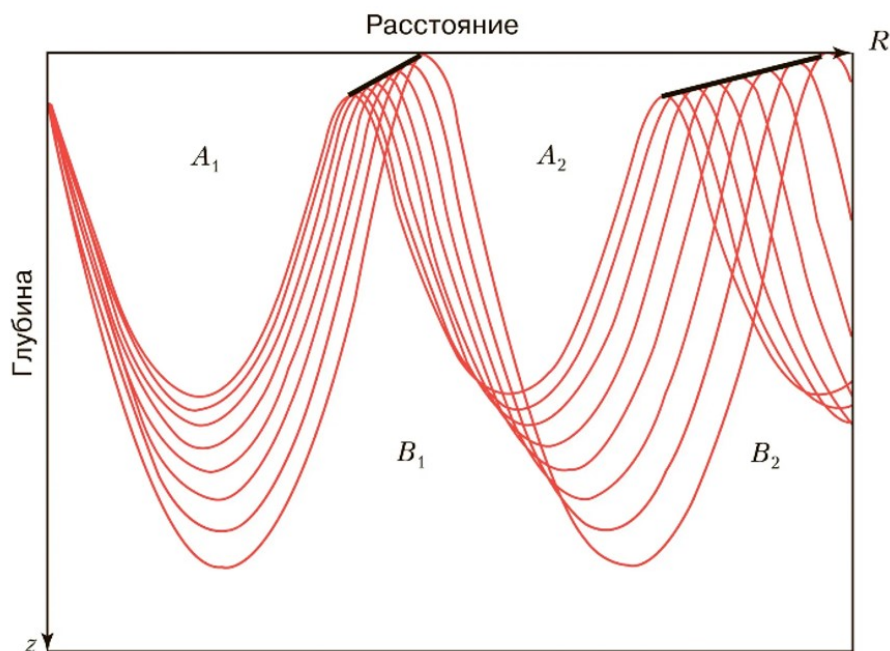


Рис. 1. Профиль скорости звука в: а) глубоком океане; б) «мелком море»

1. Моделирование гидроакустического поля в глубоком океане методом конечных элементов

Обращаясь первоначально к ареалам глубокого океана, отметим, что исходная стандартная модель океанской среды – это толща воды глубиной $\sim$. В настоящем разделе ограничиваемся двумя пределами дальности: максимальной дистанцией – до 60 км и уменьшенной (более подробное рассмотрение) – до 30 км. Как видно на представленном графике на рисунке 1 а), в профиле скорости имеется минимум на глубине 700 м (pinс'-point). В районе минимума скорость спадает до 1465 м/с, на свободной водной поверхности ее значение – 1470 м/с, а вблизи дна – 1480 м/с. Как показано далее, присутствие даже незначительной вариации в профиле скорости звука оказывает существенное влияние на характер пространственного распределения амплитуды излучаемых волн.

Общие закономерности, характеризующие рефракционные эффекты, связанные с влиянием плавной стратификации по скорости звука с глубиной при распространении гидроакустических волн на масштабах океанских дальностей, описываются в рамках уравнения эйконала [1]. Решение уравнения эйконала позволяет получить расчетные формулы для амплитудно-фазовых соотношений в акустическом волновом поле в плавно слоистой среде. Известно, что следствием стратификации океана является акустическая рефракция. Возникает разворот волнового вектора к направлению в обратную сторону – к свободной поверхности. Волновые фронты плавно меняют ориентацию с возвращением на свободную водную поверхность, что демонстрируется на традиционно представляемой лучевой диаграмме (представлено на рисунке 2).



$A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots$ – зоны тени.

Рис. 2. Схематическое изображение лучевой диаграммы распространения звука в глубоком океане

Для описания амплитудного распределения при распространении гидроакустических волн в работе применяется широко распространённый метод конечных элементов. На основе его применения получен типичный вид амплитудного распределения, показанный на иллюстрациях: на рисунке 3 а), соответствующем частоте акустического поля $f = 20$ Гц, а на рисунке 3 б) – на частоте $f = 40$ Гц. В обоих случаях рассматривается глубина океана ~ 3 км и масштаб дальности до 60 км. На иллюстрациях – рисунки 4 а), б) дублируют выше представленные панорамы в более подробном виде – в пределах дальности до 30 км. Демонстрируется результат численного моделирования волновой структуры (r, z) – сечения гидроакустического поля монополя, гармонически пульсирующего на глубине 700 м, располагающегося в точке минимума $c(z)$. Видно, что смена мелкой периодичности дугообразного характера, явно проявляемая при перестройке частоты с 20 Гц на 40 Гц (по вертикали), обусловлена стратификацией океана по скорости распространения звука. Это явление известно для волновых структур, причем в литературе оно (или ему подобное) обозначено как эффект Тальбота. Масштаб горизонтальной периодичности, соответствующий указанной выше модели стратификации, может быть грубо оценен по формуле $L = \frac{c}{\Delta c} \cdot H$, где Δc – вариация скорости звука в рефракционном волноводе, H – поперечный размер участка распространения с изменчивостью скорости в океане. Оценка дает 30...40 км. Таким образом, при наличии стратификации возникает квазипериодическая модуляция по дальности (горизонтали) с периодом в несколько десятков километров – появляются зоны конвергенции. На указанных дальностях при использовании лучевых диаграмм на некоторых участках поверхности возникают характерные особенности – каустики, на которых имеют место резкие скачки амплитуды акустического поля. На демонстрируемых панорамах также присутствуют и хорошо обозначены амплитудные вариации, создающие рельеф пространственного волнового распределения и которые отражают эффекты рефракции, но без присутствия каустик со свойственной для них амплитудной неопределенностью в области скачка.

Следует еще отметить, что за счет рефракции, обусловленной стратификацией, на глубине минимума скорости звука (700-750 м) имеет место подъем уровня волновых амплитуд на обеих демонстрируемых частотах, что наблюдается на рисунках 3 и 4. Указанная особенность свидетельствует о возможном присутствии «подводного звукового канала» (ПЗК) на обозначенной глубине. В литературе обсуждается такое явление как ПЗК именно в области минимума скорости звука, образуемого температурным градиентом и расслоением в водной океанской среде [1-2].

На дублирующих рисунках 4 а), б) в волновом поле вблизи вертикальной оси нетрудно видеть незначительно расходящиеся лучевые траектории. Их характер – вначале прямолинейный, затем сменяется дугообразным. В случае отсутствия стратификации – при постоянстве акустических параметров в толще воды, возникал бы хаотический «перехлест» лучей с усреднением уровня амплитуды по дальности и глубине. Однако панорама амплитудного распределения учитывает рефракцию, при этом в вертикальном пространственном сечении изображен сложный рисунок волновой структуры. Детальная картина волновых фронтов при их конвергенции и приближении к границе позволяет оценить количественные изменения в характере пространственной структуры (с учетом перестройки по частоте) – в амплитудных соотношениях акустического поля. Из представленной панорамы ясно, где и на каких глубинах целесообразно устанавливать вертикальную приемную антенну, какова должна быть плотность заполнения ее апертуры и оптимальная длина антенны. Так, минимальный масштаб пространственной изменчивости «лучевых траекторий» вблизи свободной поверхности воды на панораме (с учетом выбранной длины волны) оценивается по порядку в ~ 1 км, что указывает на прогнозируемый параметр – длину гирлянды.

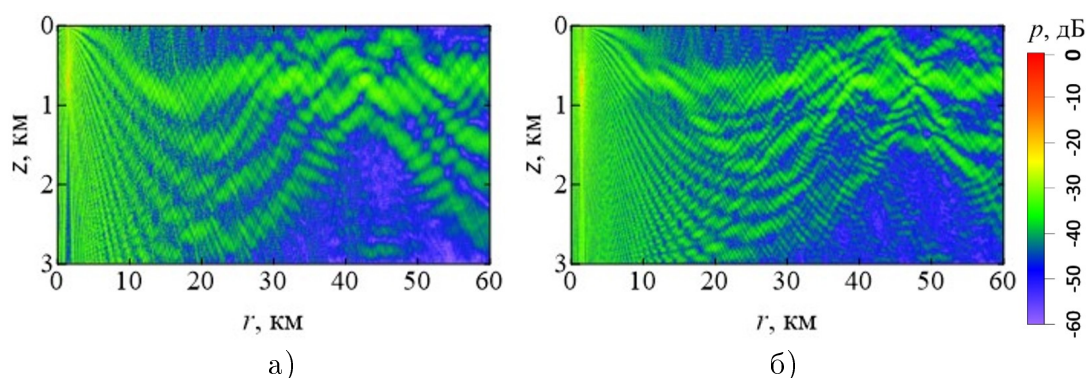


Рис. 3. Структура акустического поля в сечении: а) 20 Гц, б) 40 Гц при распространении в глубоком океане с учетом стратификации – дальность до 60 км

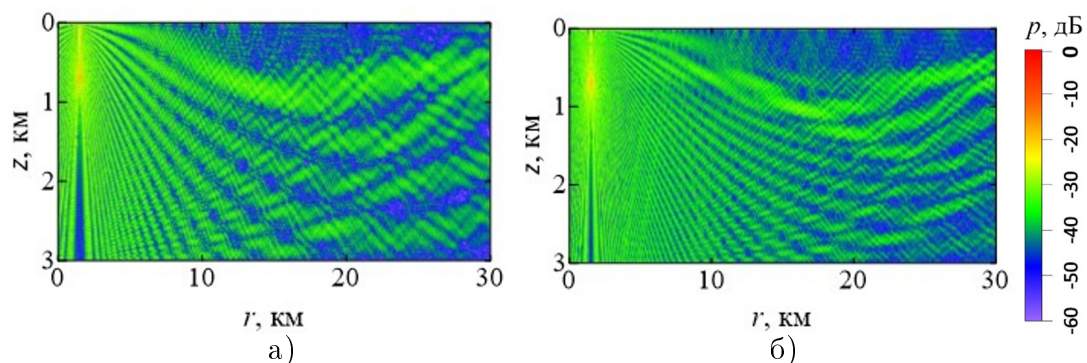


Рис. 4. Структура акустического поля в сечении: а) 20 Гц, б) 40 Гц при распространении в глубоком океане с учетом стратификации – дальность до 30 км

Таким образом на основе визуализации амплитудного распределения, изображаемого на панораме, показано влияние эффекта рефракции в глубоком океане, учет которого принципиален при активном и пассивном зондировании морской среды, при реализации локации и пеленга цели, т.е. при определении местоположения объекта, погруженного и движущегося на морской глубине.

2. Моделирование гидроакустического поля в «мелком море» методом конечных элементов

Исходя из представления о сравнительно мелководном пространстве, которое занимает обширную акваторию, идущую, например, от Мурманска вплоть до Шпицбергена, его акустическое волновое поле целесообразно представить совокупностью мод. Дисперсионные эффекты, сопровождающие распространение акустических волн, как следует из результатов моделирования, являются преобладающими над эффектом рефракции, связанным с влиянием стратификации по скорости звука вблизи морской поверхности, которая возможно сказывается скорее при незначительных удалениях от источника [1-3]. Присутствие точки излома (pinc'-point на глубине ~ 50 м) в графике зависимости скорости звука, представленного на рисунке 1 б) («летне-сезонный» вариант профиля реализующийся в летнее время года), обозначает лишь границу, вдоль которой могут формироваться и распространяться внутренние гравитационные волны, влияние которых в настоящей работе не обсуждается. В простейшем выражении (без учета диссипации и потерь на рассеяние) волноводная дисперсия описывается элементарной формулой для частотной зависимости фазовой скорости волноводных мод в плоском волноводе (с верхней свободной границей):

$$V_n = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{H^2} \left(n - \frac{1}{2}\right)^2}}, \quad (1)$$

где H – полная глубина бассейна, ω – частота волны, c – скорость звука в воде, $n = 1, 2, \dots$ – индекс моды.

Нетрудно записать аналогичные формулы для амплитуды колебательной скорости первых волноводных мод, соответствующих простейшему виду дисперсии и возбуждаемых монополем, гармонически осциллирующим (p_0 – амплитуда пульсации) вблизи свободной водной поверхности среды однородной по плотности « ρ » и скорости распространения звука « c »:

$$v_n \cong \frac{p_0}{\pi \rho c} \sqrt{\frac{H}{r \left(n - \frac{1}{2}\right)}} \frac{\sin \left((z - H) \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{H^2} \left(n - \frac{1}{2}\right)^2} \right)}{\cos \left(H \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{H^2} \left(n - \frac{1}{2}\right)^2} \right)} \times \\ \times \cos \left(\omega t - r \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{H^2} \left(n - \frac{1}{2}\right)^2} + \frac{\pi}{4} \right), \quad n = 1, 2, \dots, r \gg \lambda, \quad (2)$$

где λ – длина волны, r – радиальная координата в цилиндрической системе координат (ось абсцисс на рисунках 2-7), t – текущее время.

Переход к рассмотрению акустических волн в моделируемой структуре среды также выполнялся с применением метода конечных элементов. Подобно изложенному выше, далее представлены результаты 2D моделирования низкочастотного гидроакустического поля, соответствующего условиям «мелкого моря», т.е. условиям относительно малых глубин – порядка 200 м.

На рисунке 5 в сечении (r, z) представлена пространственная структура гидроакустического поля (источник монополюс на частотах $f = 20$ Гц, б) $f = 50$ Гц, в) $f = 100$ Гц на дистанции до 6 км при наличии стратификации по глубине в жидкости). Демонстрируется характерное нарастание количества «лучей», уходящих от источника под все более пологими углами, которое имеет место с ростом частоты излучения. Более высокие номера лучей (подразумеваются пределы их первого десятка) соответствуют более высоким номерам максимумов в характеристике диаграммы направленности источника. Аналогичное преобразование со все более высокими номерами мод наблюдаются в волновой структуре, в которую преобразуется гидроакустическое излучение, уходящее в водную толщу бассейна, имеющего 200 м глубину. Количество мод, излучаемых источником, также возрастает.

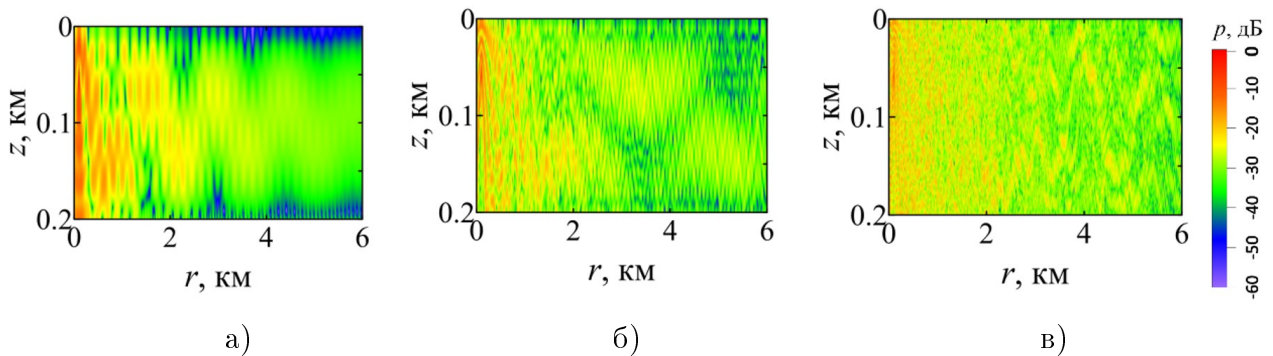


Рис. 5. Амплитудное распределение гидроакустического поля на частотах: а) $f = 20$ Гц, б) $f = 50$ Гц, в) $f = 100$ Гц, дальность до 6 км

На рисунках 6 а), б), в) даны иллюстрации структуры гидроакустического поля на дистанции до 30 км применительно к перечисленным частотам 20, 50 и 100 Гц. Видно, что в «мелком море» учет стратификации не вносит существенного влияния на дальнейшее распространение низкочастотных гидроакустических волн, как это имело место в глубоком океане, и в отличие от прежнего случая рефракционные эффекты не доминируют. Отметим, что модовая структура поля преобразуется вследствие влияния волноводной дисперсии, поскольку другие факторы, такие как потери на диссипацию и рассеяние не учитываются. Влияние волноводной дисперсии сводится к тому, что она «растаскивает» сигнал по длительности и по модам.

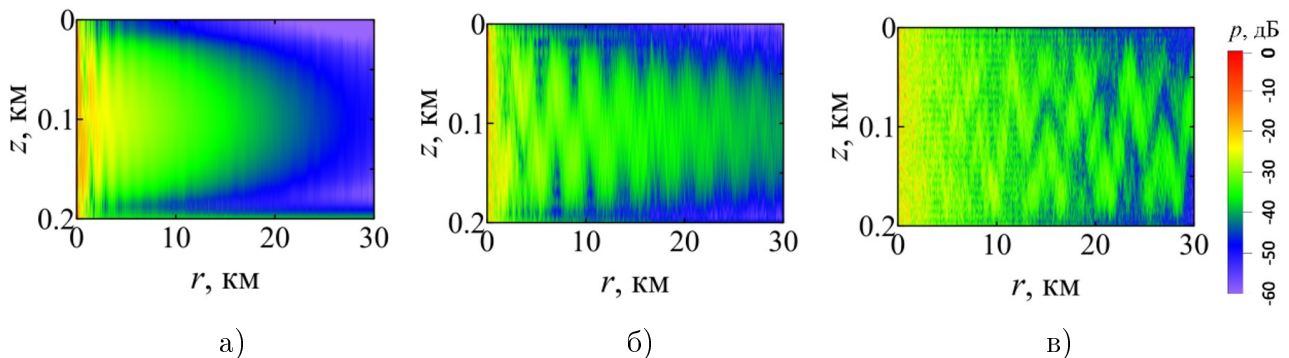


Рис. 6. Амплитудное распределение гидроакустического поля на частотах: а) $f = 20$ Гц, б) $f = 50$ Гц, в) $f = 100$ Гц, дальность до 30 км

На рисунках 7 а), б), в) представлена ближняя зона локализации в (r, z) плоскости – (до 1 километра), причем сохраняется возможность визуализации возмущения,

привносимого в волновую структуру поля локальной неоднородностью-рассеивателем. На рисунке 7 а) иллюстрируется эталонная структура поля в невозмущенном случае. На рисунке 7 б) показана структура поля при наличии сплошной металлической сферы, на рисунке 7 в) демонстрируется структура поля при наличии полой тонкостенной сферы. Рассматривается гармонический режим излучения источника зондирования – монополя, пульсирующего на частоте $f = 100$ Гц в присутствии неоднородности в виде сферы диаметром 40 м, располагаемой на средней глубине водоема (100 м). В одном случае – сплошная дюралевая сфера, в другом случае – это пустотелая тонкостенная дюралевая сфера того же диаметра. Представлены иллюстрации, демонстрирующие структуру гидроакустического поля до и после внесения неоднородности. Нетрудно видеть степень влияния присутствия неоднородности – рассеивающей сферы обоих видов на перестройку структуры поля, поскольку наблюдаются визуальные отличия в гидроакустическом поле (в возмущенной конфигурации на рисунках 7 б), в) от эталонной (представленной на рисунке 7 а)). Возникают заметные искажения, привносимые как в области, ближайшей к источнику, так и на некотором удалении от рассеивающей сферы.

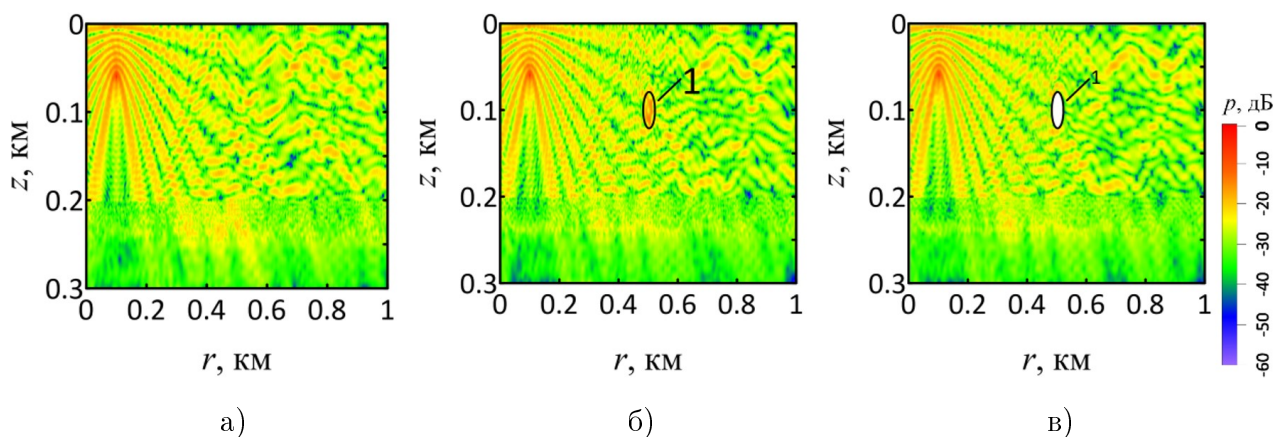


Рис. 7. Вертикальный разрез акустического поля монополя в (r, z) - плоскости: а) в невозмущенном неоднородностью водном пространстве, б) при наличии твердой рассеивающей сферы в 400 м от пульсирующего монополя, в) при наличии полой тонкостенной рассеивающей сферы в 400 м от пульсирующего монополя ($f = 100$ Гц, полная дистанция 1 км, 1 – область неоднородности)

Интересно также отметить, что донно-сейсмические волны (поперечные волны в «мягком» грунте) на рисунках 7 а), б), в) – глубины 200–300 м, имеют заметный уровень в случае, когда неоднородность отсутствует и гидроакустическая структура является невозмущенной, эталонной. Однако при наличии полой тонкостенной сферической неоднородности их уровень может быть снижен в зоне, ближайшей к неоднородности. Следовательно, наглядно показано, что донно-сейсмическое поле заметно «гасится» по уровню при внесении неоднородности типа тонкостенной полой сферы в зондируемую область акватории и при ее приближении к первичному источнику излучения. Демонстрируется «экранирующее» влияние «полой» неоднородности на излучение донно-сейсмических волн.

Последнее свидетельствует о принципиальной возможности снижения дальности слышимости (малозумности) объектов (по донно-сейсмическому каналу) и о востребованности более активного использования донной сеймики наряду с приоритетными гидроакустическими сигналами в задачах гидролокации.

Перечисленные особенности гидроакустического поля при гармоническом волновом режиме рассматриваются как важный первый этап для дальнейшей

практической реализации основной цели – для решения задачи определения местоположения неоднородности, которая выполняется при гидролокации с применением сигналов в импульсном режиме.

Заключение

В работе анализируются низкочастотные гидроакустические волны (20–100 Гц), распространяющиеся в глубоководных и в мелководных акваториях мирового океана. Выполняется численное моделирование структуры гидроакустического поля, излучаемого гармонически пульсирующим монополем, погруженным на глубину точки минимума скорости звука при распространении акустических волн. Для акватории глубокого океана исследуются эффекты рефракции волн, обусловленные стратификацией океана по скорости распространения звука с глубиной вплоть до 3 км. Выявлены зоны конвергенции, где имеет место концентрация волнового поля и схождение волновых лучей к свободной водной поверхности. Обосновывается подход при выборе оптимальной длины приемной антенны. Указана глубина, где возможно образование «подводного звукового канала».

В случае акватории, соответствующей так называемому «мелкому морю» с глубиной порядка 200 м, показано влияние эффектов волноводной дисперсии, обусловленное модовой структурой. Показано, что на низких частотах на удалениях от источника порядка первых десятков километров в излучении присутствует несколько первых мод. При распространении на значительных удалениях от источника доминируют эффекты волноводной дисперсии, а при распространении на незначительных дистанциях также могут присутствовать и проявляться эффекты рефракции. По результатам моделирования демонстрируется возможность оптимальной по длине, удаленности и месту постановки приемной антенны вдоль по трассе.

На основе 2D моделирования анализируется качественный вид и особенности структуры гидроакустического и донно-сейсмического поля с учетом влияния неоднородности (в виде жесткой металлической сферы или тонкостенной полый сферы) в 400 м от первичного источника. Наглядно демонстрируются эффекты рассеяния на ближних дистанциях от неоднородности – рассеивающей сферы, важные в решении проблемы гидролокации в «мелком море».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № FFUF-2024-0041).

Список литературы

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. -370 с.
2. Малыхин А.Ю. Вариации акустических сигналов в мелком море в присутствии горизонтально стратифицированных неоднородностей. Диссертация кандидата физико-математических наук: 01.04.06, Воронеж, 2015.- 91 с.
3. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. Springer: 2012. -540 p.
4. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Особенности распространения гидроакустических волн на клиновидном шельфе. / Г.И. Долгих, С.С. Будрин, С.Г. Долгих, В.В. Овчаренко, В.А. Чупин, В.А. Швец, С.В. Яковенко. // Сборник научных статей по избранным материалам

XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер» (Дальневосточный океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток). -2020. -№ 2. -С. 50-73.

5. Стуленков А.В., Артельный В.В., Коротин П.И., Суворов А.С., Горбунцов И.Е., Норкин М.С., Зайцева С.Г. Физическое моделирование гидроакустического поля гребного винта. / А.В. Стуленков, В.В. Артельный, П.И. Коротин, А.С. Суворов, И.Е. Горбунцов, М.С. Норкин, С.Г. Зайцева // Акустический журнал. -2024. -Т. 70. -№ 5. -С. 747-756.

6. Артельный В.В., Иваненков А.С., Родионов А.А., Стуленков А.В. Выделение сигналов широкополосных источников звука в мелком море при наличии отражений от дна и поверхности с использованием вертикальной решетки гидрофонов. / В.В. Артельный, А.С. Иваненков, А.А. Родионов, А.В. Стуленков // В сборнике: Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. Труды 17 Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 2024. -С. 266-268.

References

1. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Theoretical foundations of ocean acoustics. Moscow: Nauka, 2007. -370 p.

2. Malykhin A.Yu. Variations of acoustic signals in shallow water in the presence of horizontally stratified inhomogeneities. Dissertation of candidate of physical and mathematical sciences: 01.04.06, Voronezh, 2015.- 91 p.

3. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. Springer: 2012. -540 p.

4. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Features of hydroacoustic wave propagation on a wedge-shaped shelf. / G.I. Dolgikh, S.S. Budrin, S.G. Dolgikh, V.V. Ovcharenko, V.A. Chupin, V.A. Shvets, S.V. Yakovenko. // Collection of scientific articles on selected materials of the XI All-Russian Symposium "Physics of Geospheres" (V.I. Ilychev Far Eastern Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok). - 2020. - No. 2. - P. 50-73.

5. Stulenkov A.V., Artelnyy V.V., Korotin P.I., Suvorov A.S., Gorbuntsov I.E., Norkin M.S., Zaitseva S.G. Physical modeling of the hydroacoustic field of a propeller. / A.V. Stulenkov, V.V. Artelnyy, P.I. Korotin, A.S. Suvorov, I.E. Gorbuntsov, M.S. Norkin, S.G. Zaitseva // Acoustic Journal. -2024. -Vol. 70. -No. 5. -P. 747-756.

6. Artelnyy V.V., Ivanenkov A.S., Rodionov A.A., Stulenkov A.V. Isolation of signals of broadband sound sources in shallow water in the presence of reflections from the bottom and surface using a vertical hydrophone array. / V.V. Artelnyy, A.S. Ivanenkov, A.A. Rodionov, A.V. Stulenkov // In the collection: Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics. Proceedings of the 17th All-Russian Conference, St. Petersburg, 2024. -P. 266-268.