

ОТРАЖЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИМ ДНОМ

Е. В. АЗАРЕНКО, М. М. ДИВИЗИНЮК, Л. В. ТРЕТЬЯКОВА, А. В. ЧУХЛЕБОВА
Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Монохроматическое излучение формируется гидроакустическими антеннами гидролокаторов различного назначения, которые используются для обследования водной среды и обнаружения подводных объектов. На этот процесс влияют характеристики морского дна, а именно характер грунта, рельеф и наклон морского дна, а также глубина моря и взаимное расположение антенн гидролокатора и подводного объекта. Показано, что существуют условия, при которых интенсивность акустического рассеивания превышает уровень отраженного от подводного объекта полезного сигнала, что способствует формированию подводных зон гидроакустического маскирования.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и классификация подводных объектов была, есть и будет еще долгие годы одной из актуальнейшей задач гидроакустики, океанологии и других прикладных дисциплин [1,2]. Поиск подводных объектов осуществляется гидролокаторами, установленными на поисковых, научно-исследовательских, рыболовецких судах, а так же судах специального назначения. Особенность этих гидролокаторов состоит в том, что они излучают тональные сигналы и осуществляют их прием в фиксированной полосе частот [3,4]. С математической точки зрения это значительно упрощает решение научной задачи. Второй системой допуска является нормативно-правовая, которая ограничивает континентальный шельф, как суверенную зону государства двухсот метровой широты. Исходя из выше изложенного, одной из главных проблем является поиск подводных объектов на континентальном шельфе Черного моря и в районах соответствующих глубин.

ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является разработка способа учета влияния донной реверберации на поиск и обнаружение подводных объектов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи. Во-первых, разработать математическую модель донной реверберации. Во-вторых, разработать способ учета глубины моря и наклона морского дна на реверберационные характеристики. В-третьих, провести численный и натурный эксперименты по моделированию и измерению реверберационных отражений от морского дна.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ВКБ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ

Для вычисления коэффициентов отражения от границы двух сред в гидроакустике, как правило, используется метод приближения ВКБ (Венцеля, Крамерса, Бриллюэна). В его основу положен ряд допущений, а именно дно считается жидким, скорость звука в нем с глубиной возрастает (непрерывно слоистая среда), как это обычно бывает в действительности, рис. 1.а). Тогда падающий на морское дно акустический луч искривляется в жидком грунте, на глубине $h = h_m$ претерпевает полное внутреннее отражение и возвращается в верхнее полупространство под тем же углом с каким упал на дно, рис 1.б).

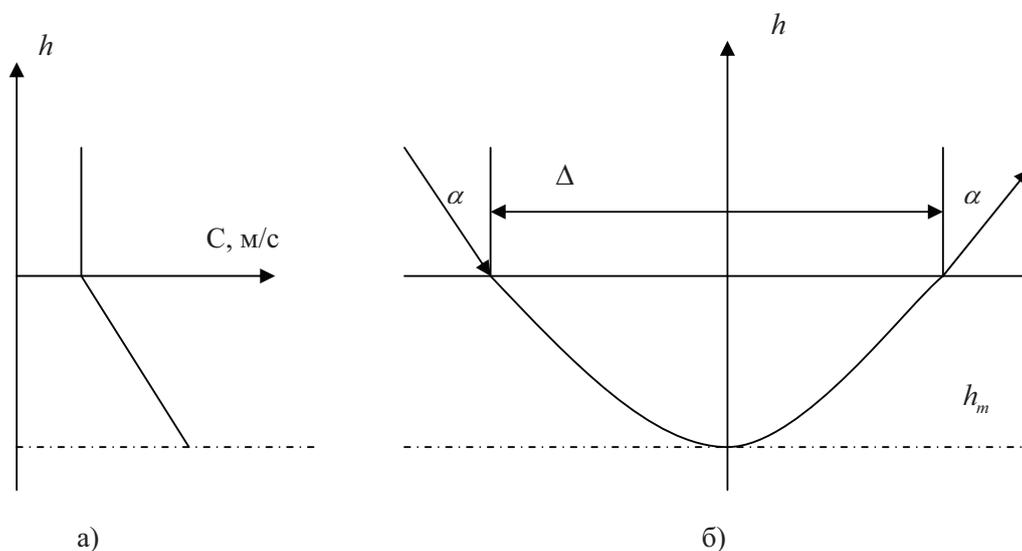


Рисунок 1. Отражение от непрерывно-слоистой среды.
 а) профиль скорости звука, б) траектория движения луча

Допускаем, что скачок скорости звука на границе вода-дно ($h = 0$) отсутствует, а так же что градиент скорости звука в грунте достаточно мал, что позволяет пренебречь отражением в области $h_m < h < 0$.

Тогда, если на границу $h = 0$ сверху под углом α_0 падает плоская звуковая волна, то, распространяясь вниз в полупространстве $h < 0$ в каждом элементарном слое dh , она набирает фазу $k_h dh$, где

$$\left. \begin{aligned} k_h &= \sqrt{k^2(h) - \xi^2}, & k_h &= \frac{\omega}{c(h)} \\ \xi &= k_0 \times \sin \alpha_0, & k(h_m) &= \xi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Распространяясь от $h = 0$ до горизонта h_m волна набирает интегральную фазу – $\int_0^{h_m} k_h dh$ и тогда же фазу распространяясь обратно от h_m до 0. В результате мы имеем вышедшую в верхнюю однородную среду волну с той же амплитудой, что и падающая волна, но с дополнительной фазой, при этом, как следует из теории волнового процесса, отражаясь на горизонте $h = h_m$, волна теряет фазу на $\frac{\pi}{2}$, то есть

$$\mathfrak{I} = 2 \int_{h_m}^0 k_h dh - \frac{\pi}{2} = 2 \int_{h_m}^0 \sqrt{k^2(h) - \xi^2} dh - \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

Коэффициент отражения будет равен

$$K_{OT} = \exp(i\mathfrak{I}) = \exp\left(i \left[2 \int_{h_m}^0 \sqrt{k^2(h) - \xi^2} dh - \frac{\pi}{2} \right]\right) \quad (3)$$

Следовательно, величина коэффициента отражения акустической волны от морского дна определяется вертикальным распределением скорости звука в морском дне.

Пусть скорость распространения звука в морском дне изменится линейно, то есть

$$c(h) = a \cdot h + b \quad (4)$$

где a и b – коэффициенты пропорциональности (константы).

Выполняя замену переменных, и применяя соответствующие методы интегрирования, получим:

$$2 \int_{h_m}^0 \sqrt{k^2(h) - \xi^2} dh = \frac{2\omega}{a} \cdot \left(\ln \left| \operatorname{tg} \frac{\arcsin \frac{b \cdot \xi}{\omega}}{2} \right| - \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\arcsin \frac{(ah_m + b) \cdot \xi}{\omega}}{2} \right| \right) + \frac{2\omega}{a} \cdot \left(\cos \left(\arcsin \frac{b \cdot \xi}{\omega} \right) - \cos \left(\arcsin \frac{(ah_m + b) \cdot \xi}{\omega} \right) \right) \quad (5)$$

Таким образом, зная вертикальные распределения скорости звука в водной среде и морском дне можно произвести расчеты по вычислению численных значений коэффициентов отражения от морского дна.

ВАРИАНТ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА РАССЕЙВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Особенность в конфигурации акустических лучей в шельфовых зонах моря состоит в том, что даже при прямолинейном распространении акустические лучи достигают дна на удалении – 2км. Принимая во внимание, что глубины в шельфовых зонах составляют 100-200м, нетрудно получить, что углы скольжения не превышают $5 \cdot 10^0$.

Чем больше угол падения (меньше угол скольжения), тем больше угол преломления. При определенном значении угла падения наступает эффект полного внутреннего отражения. Из равенств $k_1 \cdot \sin \alpha_1 - k \cdot \sin \alpha = 0$ и $\sin \alpha = n \cdot \sin \alpha_1$ следует, что минимальным значением критического угла $\alpha_{кр}$, когда наступает явления полного внутреннего отражения определяемого как

$$\sin \alpha_{кр} = n = \frac{c_1}{c_2} \quad (6)$$

По данным многолетних комплексных гидрофизических исследований в шельфовых районах Черного моря в придонных слоях (на глубинах 100-200м) скорость распространения звука составляет 1465-1470м/с, а в приповерхностных слоях грунта 1550-2300м/с. Исходя из вышеизложенного, получаем изменение $\alpha_{кр}$ в пределах $40-71^\circ$. Сопоставляя эти данные со значениями углов падения, получаем, что во всем множестве конфигураций акустических полей, формируемых поисковыми гидролокаторами в шельфовых зонах, углы падения акустических лучей на морское дно превышают значения критических углов. Другими словами, конфигурация акустических полей такова, что все акустические углы, достающие морского дна, имеют углы падения, превышающие значения критических углов. Следовательно, это дает основания для рассмотрения моделей, в которых поглощение акустической энергии морским дном не происходит, то есть

$$I_{пад} = I_{отр} + I_{рас} \quad \text{или} \quad 1 = K_{отр} + K_{рас} \quad (7)$$

Таким образом, в шельфовых районах Черного моря с глубинами 100-200 метров при использовании штатных поисковых гидролокаторов кораблей и судов коэффициент рассеяния акустических волн морским дном полностью определяется коэффициентом отражения акустической энергии от морского дна.

Полученные результаты были использованы для разработки математической модели изменения реверберационных характеристик в зависимости от глубины моря и наклона морского дна.

Математическая модель определялась четырьмя группами: первая, параметры морского дна: h_{mi} - глубина моря, j_i - угол наклона морского дна, вторая, гидрологические параметры: $C_i(h)$ - вертикальное распределение скорости звука по глубине, третья, параметры источника звука: h_{ui} - глубина нахождения источника звука, Q_i - характеристика направленности источника звука, четвертая, расчетные параметры: α_i - предельные значения углов падения акустических лучей.

Суммарный реверберационный сигнал будет складываться из i -ых составляющих, вызванных отражением i -ых лучей от морского дна, и будет определяться как

$$I_{PAC} = \sum_{i=1}^n I_{PACi} \quad (8)$$

Конфигурация акустического поля, образованного траекторией i -ым лучом описывается функционалом

$$I_{PACi} = F(h_{mi}, j_i, C_i(h), h_{ui}, Q_i, \alpha_i) \quad (9)$$

Тогда реверберационный сигнал, вызванный рассеянием от морского дна, будет определяться равенством

$$I = \int_{-\frac{Q_a}{2}}^{\frac{Q_a}{2}} \int_0^D F(h_{mi}, j_i, C_i(h), h_{ui}, Q_i, \alpha_i) dD dQ \quad (10)$$

То есть, изменения реверберационных характеристик морским дном есть двойной интеграл, определяющийся суперпозицией траекторий акустических лучей, выходящих из источника в пределах характеристики его направленности от $-\frac{Q_a}{2}$ до $\frac{Q_a}{2}$, и их суммарное рассеивание в направлении источника – приемника звука в интервале от 0 до D .

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Район поведения эксперимента располагался в северо-западной части Черного моря, в 10-15 милях от мыса Тарханкут. Рельеф дна в этом районе был таким, что примерно через центр района проходила двухсот метровая изобата. Южная и западная части района имели практически плоское дно с глубинами 200, 202м. Северная и восточная части района имели подъем дна 5-7м на километр. Средний подъем дна соответствовал периоду глубин 100м примерно по 19-20 минут. Грунт в районе проведения эксперимента – ил – песок. Вертикальный профиль скорости звука характеризовался следующими параметрами. Скорость звука у поверхности 1498м/с. Слой скачка скорости звука на горизонтах 20-30м. Здесь значения вертикального градиента скорости звука равны $1-1,5c^{-1}$. Ось подводного звукового канала на горизонте 60м. Значение скорости звука на оси 1463м/с, а у дна на глубине 200м – 1468м/с. Шесть независимых зондирований скорости звука выполненных по периметру района и в центре дали одинаковые результаты, что позволило сделать вывод о равномерности строения структуры поля скорости звука в районе. Другими словами при любой ориентации акустических трасс в районе вертикальный профиль скорости звука оставался неизменным.

Постоянные течения в районе в период проведения эксперимента не превышали

0,02-0,05м/с. Волнение водной поверхности не превышало 1-2 балла (высота поверхностных волн 0,2-0,7м). Ветер западных направлений от 4 до 8м/с.

Далее проводился комплекс мероприятий в соответствии с разработанным способом учета влияния глубины моря и наклона морского дна на реверберационные характеристики.

Выполним построение профилей скорости звука в двух вариантах. Первый, когда глубина вдоль акустической трассы остается постоянной. А второй, когда морское дно имеет наклон (рисунок 2).

Построение профилей скорости звука выполнено с применением созданного программного продукта в среде MATLAB.

ВТОРАЯ ЧАСТЬ КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА – ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Следующий этап комплексного эксперимента состоял в регистрации интенсивности реверберационного сигнала, регистрируемого приемно-усилительным трактом гидролокатора.

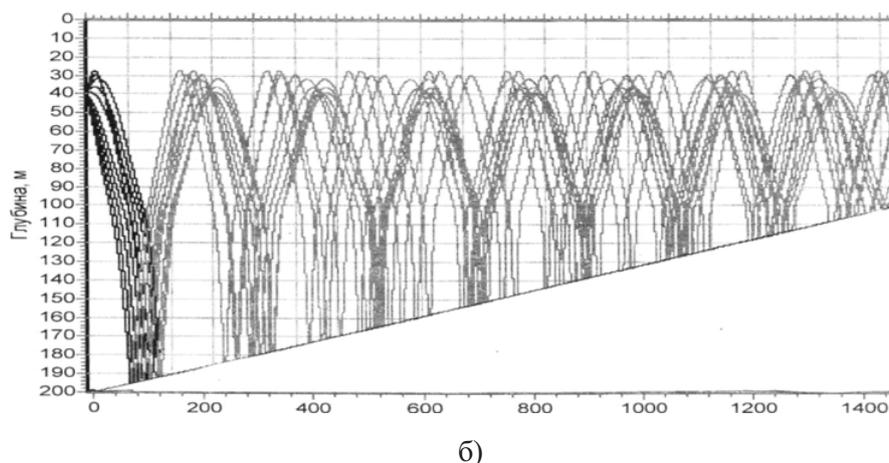
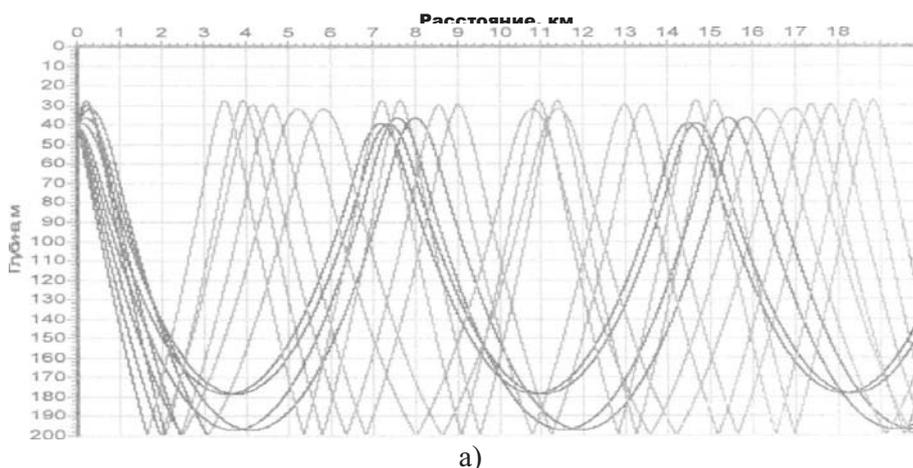


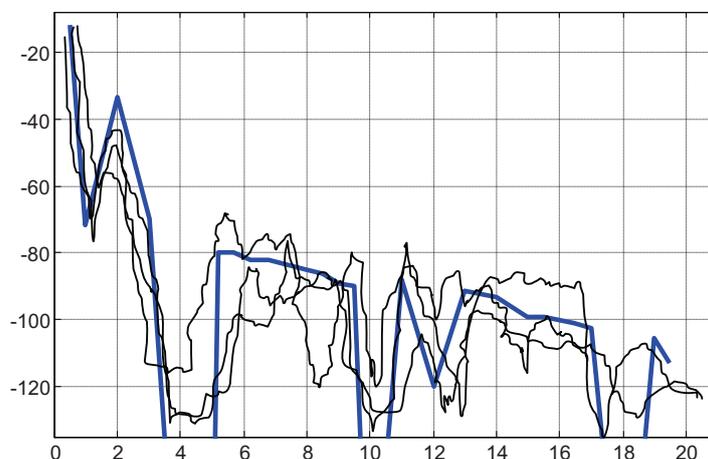
Рисунок 2. Профили скорости звука

а) Глубина излучателя: 40 м, плоское дно б) Глубина излучателя: 40 м, наклонное дно

Ориентация акустических трасс вдоль горизонтально плоского дна. Глубина погружения антенны 40м, рисунок 3.а. В расчетных данных интенсивность донной реверберации пять пиков и пять спадов. Примерно такой же характер имел принятый реверберационный сигнал. Каждая реализация, как показано на рисунке 3.а. отличается одна от другой, но схожесть впадин и пиков носит один и тот же характер, хотя флуктуация в одних и тех же точках может достигать 25-35дб.

Иначе обстоит дело в случае наклонного дна. При погружении антенны на глубину 40м рассчитанная закономерность изменения интенсивности реверберационной помехи такова, что имеет семь минимумов и семь максимумов. Регистрируемые самописцами Н-110 и КС-4 сигналы, принимаемые приемно-усилительным трактом опускаемого гидролокатора, в общем, повторяют рассчитанные параметры (рисунок 3.б).

а)



б)

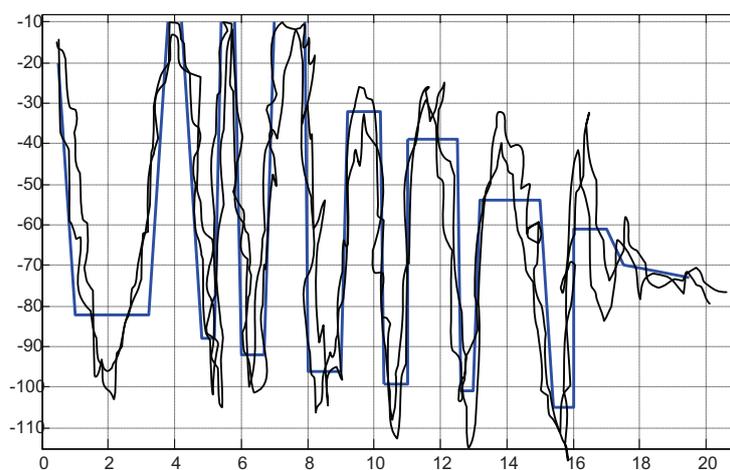


Рисунок 3. Интенсивность донной реверберации
 а) Погружение источника звука на глубину 40 метров, плоское дно.
 б) Погружение источника на глубину 40 метров, наклонное дно

ВИВОДИ

1. В связи с малым значением углов скольжения с достаточной точностью при решении прикладных задач можно полагать, что $K_{OTP} + K_{PAC} = 1$.

2. Зная вертикальные распределения скорости звука в водной среде и морском дне можно произвести расчеты по вычислению численных значений коэффициентов отражения от морского дна.

3. Проведение натурального эксперимента в одном из районов Черного моря и полученные при этом экспериментальные данные, подтвердили результаты теоретических расчетов интенсивности донной реверберации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дивизинюк М.М.* Акустические поля Черного моря. Севастополь: Гос. Океанариум. 1998. – 352с.
2. Физика океана / Под.ред. Ю.П. Доронина Л. Гидрометеоиздат. 1978. – 286с.
3. *Ольшевский В.В.* Статистические методы в гидролокации Л.: Судостроение. 1973. – 201с.
4. *Е.В. Азаренко.* Функциональная модель рассеивания звука в Черном море / М.М. Дивизинюк, Л.В. Третьякова // Сб. научных трудов СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. Вып.2(30). С. 204 – 209.