

УДК 551.462, 551.46.072

А.И. Гончар, чл.-кор. НАН Украины, д.т.н., с.н.с., директор;
С.Г. Федосеенков, н.с.; **А.И. Шундель**, н.с.

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины,
г. Запорожье (Украина)

РЕКОНСТРУКЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОГО ДНА ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ОТРАЖЕНИЯ

Предложена методика оценки характеристик слоистой среды в несколько этапов. Предлагаемая методика основана на зависимости формы проекции выбранного уровня коэффициента отражения на плоскость характеристик среды (например, проекции на плоскость: толщина слоя осадков - продольная скорость звука в полупространстве) для различных углов падения плоской волны при фиксированной частоте излучения. Впервые выполнена численная реализация предлагаемой методики для конкретных модельных данных.

КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ, УПРУГОЕ ДНО, ТОЛЩИНА ОСАДКОВ, СКОРОСТЬ ЗВУКА, СЛОИСТАЯ СРЕДА, УГОЛ ПАДЕНИЯ, ЧАСТОТА

Определение геоакустических параметров морского дна с использованием акустических данных является важной проблемой со множеством приложений в геофизике, гидроакустике, океанологии, геологии и сейсмологии. В настоящее время интерес к изучению геоакустических свойств дна вызван как в попытках объединения результатов натуральных акустических измерений с существующей геологической и геофизической информацией с целью идентификации регионов дна [1], так и в исследованиях принципов построения систем для определения морфологической структуры морского дна [2].

Значительное место в проводимых исследованиях занимает разработка как новых методов расчета коэффициентов отражения от упругого морского дна [3-5], так и методов, позволяющих эффективно учитывать влияние упругого слоистого дна на распространение звука [6-8].

Используемые при этом модели дна постоянно усложняются. Детальные исследования влияния слоистой структуры дна на частотные зависимости фазовых скоростей, коэффициентов затухания и зависимостей амплитуд нормальных волн от глубины в мелком море приведены в работах [9,10]. В ряде случаев для пояснения экспериментальных данных необходимо использование сложных, неоднородных по трассе моделей дна [11]. Разработан способ оценки акустических параметров морского дна по интерференции широкополосного звука [12].

Реконструкция свойств дна по угловой зависимости потерь при отражении широко используется в подводной акустике [13-15]. Этот метод основан на решении обратной задачи с помощью стандартных численных методик. Реконструкция характеристик дна осуществляется путем проведения ряда последовательных расчетов в рамках выбранной

модели. Для определения величин значений физических характеристик модели вводится стоимостная функция:

$$P = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_m(\theta_i) - V(\theta_i))^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где θ_i – углы скольжения;

N – число измерений, i – номер измерения;

определяющая корень из среднеквадратичной разности между измеренным:

$$V_m(\theta_i) = 10^{-\frac{BL_m(\theta_i)}{20}}$$

где $BL_m(\theta_i)$ – потери при отражении звука,

и расчетным $V(\theta_i)$ коэффициентами отражения.

При этом определяются те параметры модели дна, которые минимизируют стоимостную функцию P .

Возрастание числа рассматриваемых донных слоев усложняет математические формулы. В случае учета упругих свойств дна математические формулы так сложны, что становится невозможно реконструировать верные параметры дна, даже используя свободные от ошибок данные работы [14].

В данной статье рассматривается методика оценки характеристик слоистой среды в несколько этапов. Предлагаемая методика основана на зависимости формы проекции выбранного уровня коэффициента отражения на плоскость характеристик среды (например, проекции на плоскость: толщина слоя осадков - продольная скорость звука в полупространстве) для различных углов падения плоской волны при фиксированной частоте излучения f . На каждом этапе рассчитывается хорошее приближение только для нескольких из неизвестных параметров среды, и только на конечном этапе может быть применен процесс математической минимизации с использованием всех неизвестных параметров.

При восстановлении характеристик морского дна важным вопросом является выбор модели дна, адекватно описывающей отражение звука. Большинство моделей, основанных на геофизических данных строения дна, сложны. Так, дно в общем случае может быть представлено четырехслойной моделью жидких и упругих осадков с градиентами параметров и поглощением, покрывающих упругое полупространство. Наличие шероховатостей на границах слоев еще более усложняет данную модель. Использование такой модели для решения обратной задачи затруднено из-за большого числа подлежащих определению параметров среды. В то же время известно, что достаточно простые модели дна часто удовлетворительно описывают распространение и отражение звука в волноводах и позволяют получить удовлетворительное согласование экспериментальных данных с численными расчетами. Численные исследования поведения коэффициентов отражения

звука с использованием различных моделей дна показали [16], что наиболее важным является учет первого осадочного слоя и упругого полупространства. Поэтому в качестве рабочей модели дна возьмем модель с одним поглощающим слоем осадков, лежащим на упругом поглощающем полупространстве. О возможности использования данной модели дна говорится в работах [17, 18].

Для расчетов был использован развитый в работах [19, 20] метод расчета коэффициентов отражения. Коэффициенты отражения V (или потери при отражении BL) представлены в данной работе в цветной линейной палитре, где красный цвет на графиках соответствует максимальному значению коэффициента отражения, который изменяется в пределах $V = 0 - 1$. Здесь и в дальнейшем индексом ∞ будут помечены параметры среды, относящиеся к упругому полупространству. Так, C_l, η_l, ρ, d – продольные скорости звука, затухание в слое, плотность и толщина слоя, $C_{l\infty}, C_{t\infty}, \eta_{l\infty}, \eta_{t\infty}, \rho_{\infty}$ – продольные и поперечные скорости звука, затухание и плотность в полупространстве. Зависимости коэффициента отражения от параметров дна $V(d, C_{l\infty})$, рассчитанные на трех различных углах падения $\theta_1 = 80^\circ, \theta_2 = 50^\circ$ и $\theta_3 = 30^\circ$, представлены в цветном виде на плоскости $(d, C_{l\infty})$ (рис. 1, 2, 3); толщина осадочного слоя меняется в пределах $d = 0-30$ м, а скорость продольных волн в упругом полупространстве – $C_{l\infty} = 2400-2700$ м/с, все остальные параметры среды $C_l, \eta_l, \rho, C_{l\infty}, \eta_{l\infty}, \eta_{t\infty}, \rho_{\infty}$ постоянны и берутся равными средним значениям, характерным для молодых пород (менее 0,5 млн. лет) (табл. 1 [14]).

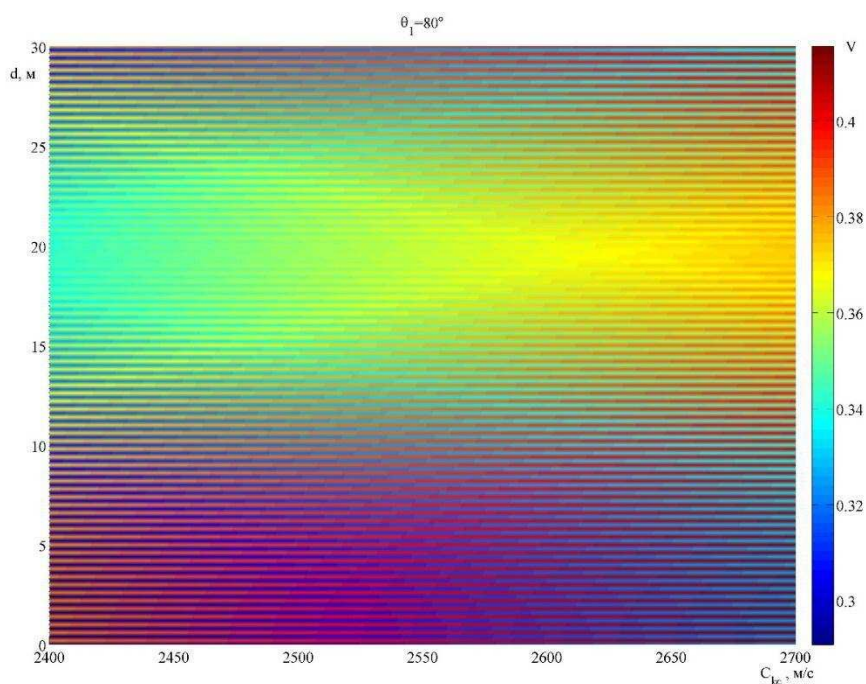


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента отражения от толщины слоя осадков d и продольной скорости звука $C_{l\infty}$ в упругом полупространстве при угле падения $\theta_1 = 80^\circ$ и частоте

$$f = 10 \text{ кГц}$$

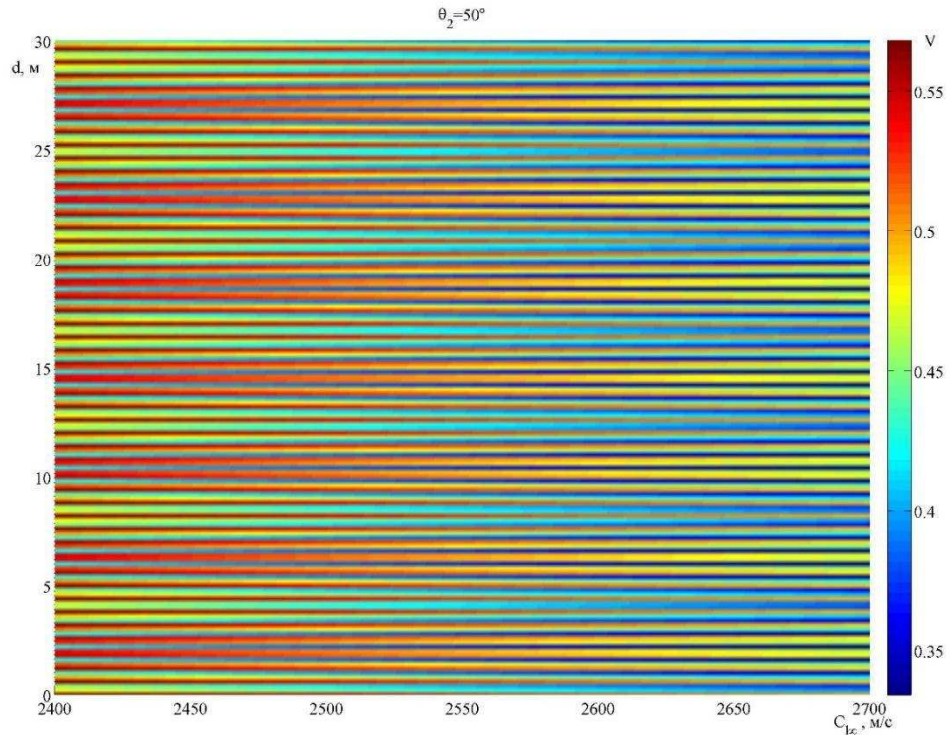


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента отражения от толщины слоя осадков d и продольной скорости звука $C_{l\infty}$ в упругом полупространстве при угле падения $\theta_1 = 50^\circ$ и частоте $f = 10$ кГц

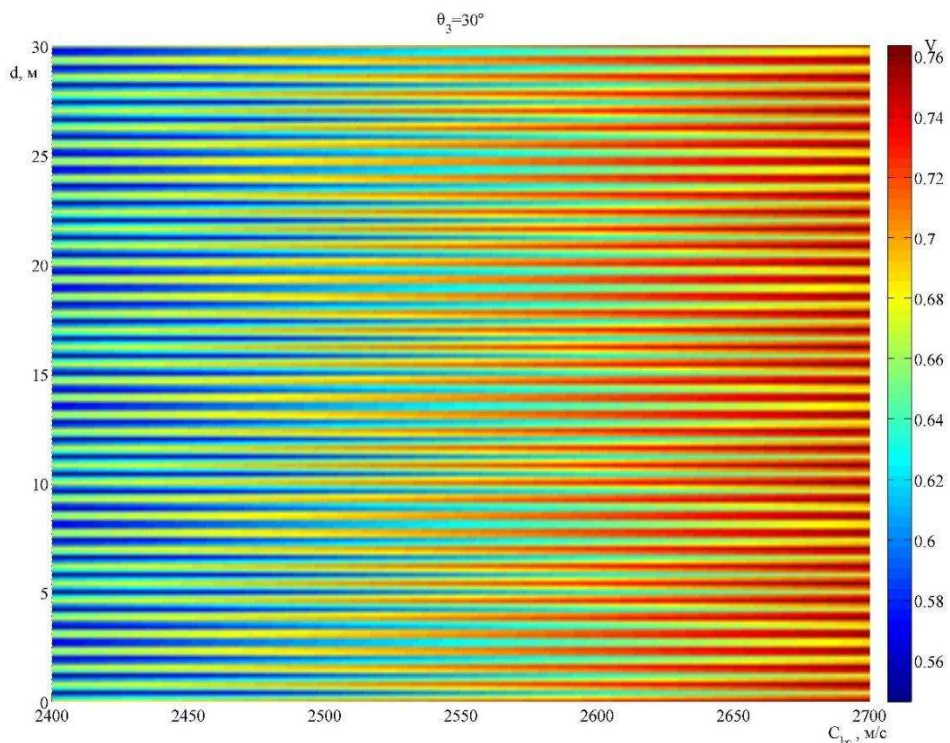


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента отражения от толщины слоя осадков d и продольной скорости звука $C_{l\infty}$ в упругом полупространстве при угле падения $\theta_1 = 30^\circ$ и частоте $f = 10$ кГц

Таблиця 1 – Параметри модели дна с одним слоем осадков, лежащем на упругом полупространстве [14]

Слой	Параметры	Пределы	Оценки
Вода	C_0 , м/с	-	1540
	ρ_0 г/см ³		1,1
Осадок	C_1 , м/с	1535	1535
	d , м	<30	<10
	ρ_0 г/см ³	1,3 – 1,7	1,35
Базальт	$C_{l\infty}$, м/с	2400 – 2700	2510
	$C_{t\infty}$, м	400 – 900	510
	ρ_∞ г/см ³	2,2 – 2,8	2,6

Полученные зависимости коэффициента отражения $V(d, C_{l\infty})$ позволяют как оценить совместное влияние на модуль коэффициента отражения одновременно двух параметров используемой модели дна d и $C_{l\infty}$, так и сопоставить степень чувствительности коэффициента отражения к различным характеристикам слоистого дна. При фиксированных углах скольжения варьирование параметров слоя и полупространства приводит к изменению значения V в определенных пределах. При фиксировании величины коэффициента отражения (на рис. 1-3 интервал значений V изображается определенным цветом) можно выделить область параметров модели дна, при которых возможно получение данного значения коэффициента отражения. Чем уже выбранный диапазон изменения V , тем более узкая область значений d и $C_{l\infty}$, обеспечивающих получение данного значения коэффициента отражения, наблюдается на плоскости $(d, C_{l\infty})$. Будем называть полученные таким образом области областями параметров.

Форма областей параметров может существенно меняться как при смене выбранной величины V , чему соответствуют различные цвета на рис. 1-3, так и при изменении угла падения падающей на слоистое дно плоской волны. Зависимость формы областей параметров, соответствующих определенному диапазону изменения коэффициента отражения, от угла падения позволяет предложить методику определения параметров слоистого дна.

Пусть требуется определить только два параметра слоистого дна, например, d и $C_{l\infty}$ (остальные параметры C_1 , η_1 , ρ , $C_{l\infty}$, $\eta_{l\infty}$, η_∞ , ρ_∞ будем считать известными). Так как все экспериментальные измерения выполняются с некоторой точностью и, кроме того, подвержены флуктуациям, будем также считать известной погрешность ε в измерении величины потерь при отражении $BL_m(\theta_i)$ на различных углах падения. Погрешность ε будет определять диапазон возможного изменения расчетной величины $BL(\theta_i)$ относительно экспериментально измеренных значений $BL_m(\theta_i)$ и, следовательно, ширину области на плоскости $(d, C_{l\infty})$, в которой расчетные потери с требуемой степенью точности совпадают с экспериментальными.

Рассмотрим численную реализацию предлагаемой методики для конкретных модельных данных. Предположим, что нам известны потери при отражении $BL_m(\theta_1)$, $BL_m(\theta_2)$, $BL_m(\theta_3)$ на трех углах падения $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ$ и $\theta_3 = 30^\circ$. Значения $BL_m(\theta_i)$ возьмем из модельных расчетов $BL_m(\theta_i) = BL(\theta_i)$, в которых все характеристики дна, в том числе и $d = d_m$, $C_{1\infty} = C_{1\infty m}$, считаются известными. Для большей наглядности и с целью иллюстрации существа предлагаемой методики в нашем модельном численном примере примем $\varepsilon = 1\%$. Несомненно, что проведение измерений в натуральных океанических условиях с такой точностью практически невозможно. Однако такое допущение позволит нам показать, что для реконструкции характеристик среды достаточно знания коэффициента отражения лишь на нескольких углах. Рассчитаем зависимость $BL(d, C_{1\infty})$ или $V(d, C_{1\infty})$ при тех же значениях углов падения, на которых измерены потери при отражении (коэффициент отражения) (рис. 1-3). Выделим на расчетных графиках области, соответствующие изменению потерь при отражении (коэффициенту отражения) от величины $|BL_m - \varepsilon \cdot BL_m|$ до $|BL_m + \varepsilon \cdot BL_m|$. Подобную операцию проведем для всех углов падения, на которых известны экспериментальные значения потерь при отражении. Полученные таким образом области параметров для трех углов падения (рис. 4-6) из-за различия в своей форме при их наложении на плоскости $(d, C_{1\infty})$ будут совпадать только частично, что сузит множество параметров среды, при которых возможно получение экспериментально измеренных значений потерь при отражении. Таким образом, будет выявлен интервал значений параметров дна, при котором возможно получение экспериментально измеренных значений потерь при отражении для всех углов падения, на которых были выполнены измерения.

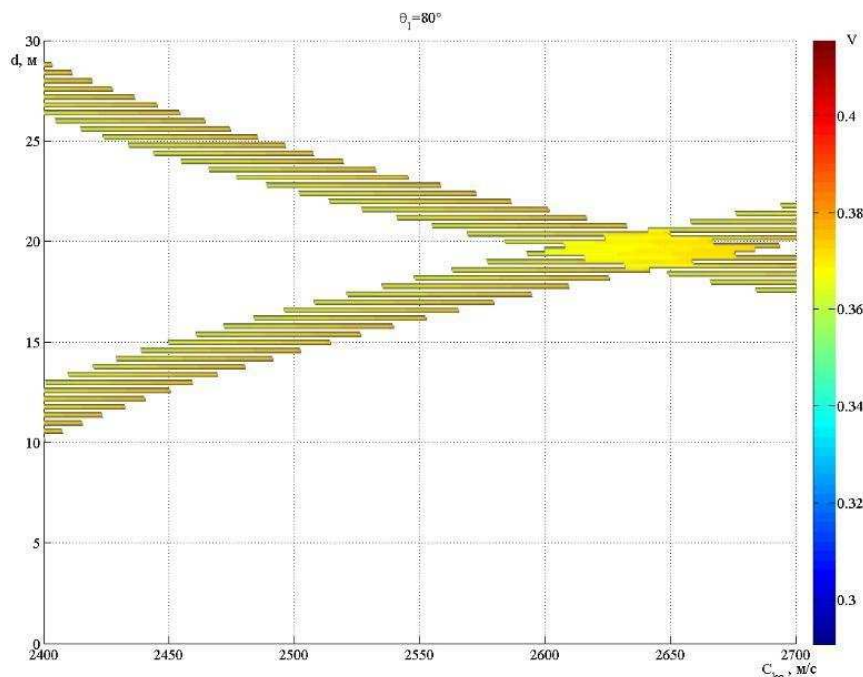


Рисунок 4 – Область параметров, соответствующая диапазону коэффициента отражения

$$V_{1m} = 0,3691 \pm \varepsilon, \text{ при угле падения } \theta_1 = 80^\circ$$

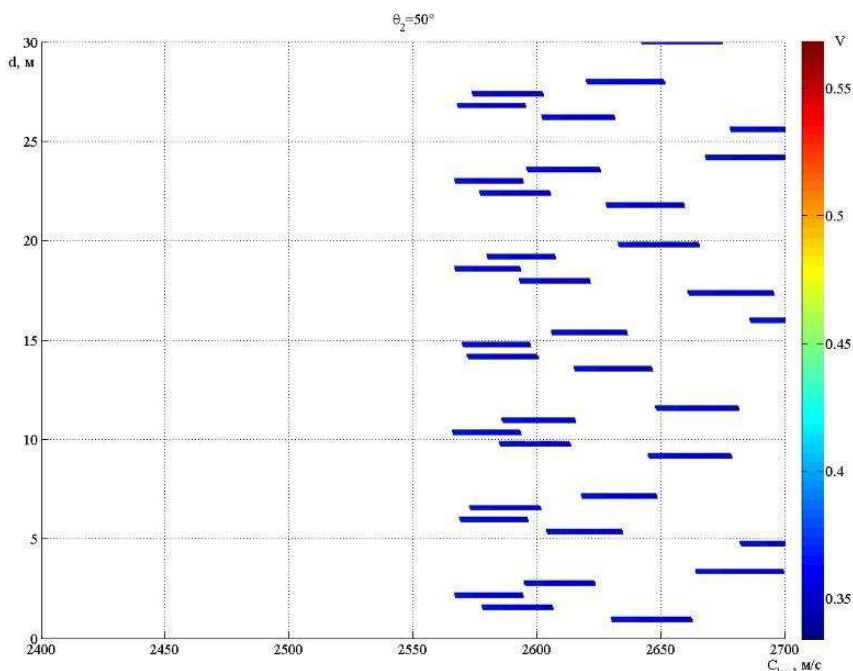


Рисунок 5 – Область параметров, соответствующая диапазону коэффициента отражения $V_{2m} = 0,3620 \pm \epsilon$, при угле падения $\theta_2 = 50^\circ$

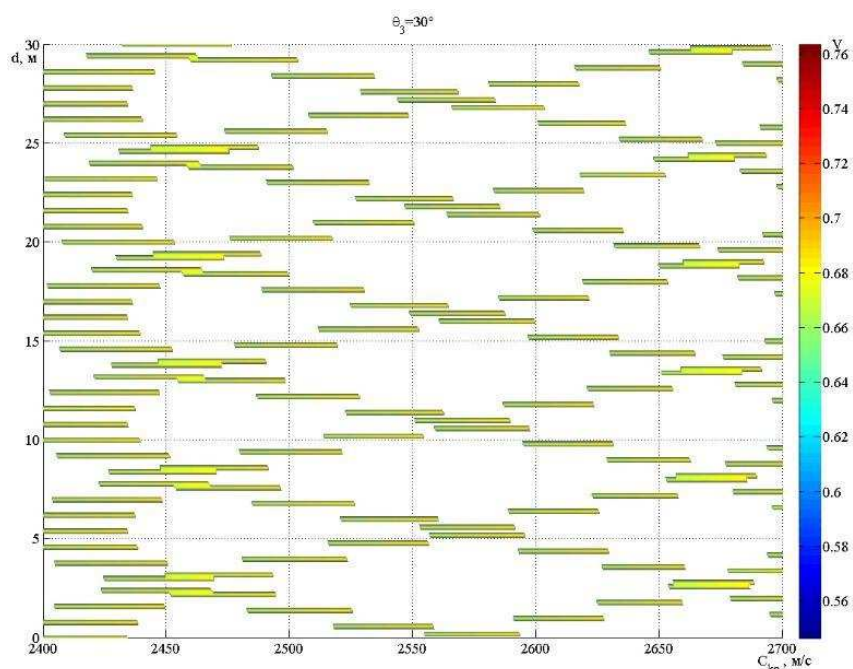


Рисунок 6 – Область параметров, соответствующая диапазону коэффициента отражения $V_{1m} = 0,6748 \pm \epsilon$, при угле падения $\theta_3 = 30^\circ$

Процедура получения d и C_{100} проиллюстрирована на рис. 7. Так, на рис. 7 на плоскости (d, C_{100}) совмещены области параметров d и C_{100} , представляющие собой рассчитанные значения потерь при отражении $BL(d, C_{100})$ (коэффициентов отражения $V(d, C_{100})$) для трех анализируемых углов падения $\theta_1 = 80^\circ, \theta_2 = 50^\circ$ и $\theta_3 = 30^\circ$.

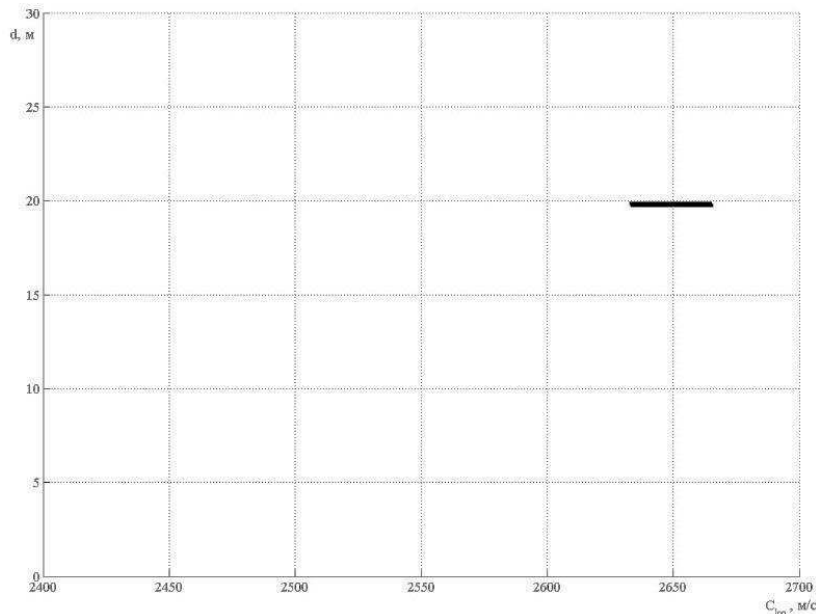


Рисунок 7 – Область пересечения рассчитанных $V(d, C_{100})$ для трех анализируемых углов падения $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ$ и $\theta_3 = 30^\circ$

Область пересечения $V(d, C_{100})$ выделена темным цветом и соответствует восстанавливаемым значениям d и C_{100} . Полученные в результате проведенной процедуры восстановления значения d и C_{100} хорошо совпадают с точными значениями d_m и C_{100m} . Ошибка восстановления определяется шириной области пересечения, и чем точнее были выполнены измерения, тем при меньшем числе измерений и с большей точностью возможно восстановление характеристик среды.

Для уменьшения количества необходимых для реализации метода вычислений при восстановлении нескольких характеристик среды предположим, что координаты области пересечения областей параметров не изменятся, если провести интегрирование по одному из подлежащих определению параметров среды, и, что зависимость координат области пересечения от характеристик среды, которые незначительно влияют на потери при отражении, слаба.

Дополнительный учет корреляционной связи между физическими параметрами дна при их варьировании также может существенно сузить область изменения варьирующихся параметров и уменьшить количество необходимых вычислений. Различная степень чувствительности коэффициента отражения к параметрам среды в различных угловых диапазонах также может быть использована в процедуре восстановления.

Ошибка в определении потерь при отражении ε может существенно зависеть от угла, на котором выполнены измерения. Задание максимальной погрешности приведет к расширению области пересечения и уменьшению точности восстановления характеристик среды. Если при восстановлении задать величину погрешности измерения потерь при отражении ε меньше реально существующей, то размеры области пересечения всех областей параметров уменьшатся. Однако при этом возможно, что не все области

параметров будут пересекаться.

Введем функцию ϕ , определенную в области реконструируемых параметров среды, как:

$$\phi = \sum_n \mathcal{G}(p_1, p_2, \dots, p_n),$$

$$\mathcal{G}(p_1, p_2, \dots, p_n) = \begin{cases} 1, & \text{если } |V - V_m| \leq \varepsilon \\ 0, & \text{если } |V - V_m| > \varepsilon, \end{cases}$$

где V_m – измеренные значения коэффициента отражения (или потери при отражении);

V – расчетные значения коэффициента отражения (или потери при отражении);

p_1, p_2, \dots, p_n – параметры среды;

n – число углов падения, на которых выполнены измерения;

ε – погрешность измерения коэффициента отражения V_m .

Значения параметров среды определяются по максимуму данной функции ϕ . Значения восстанавливаемых параметров могут быть определены также путем интегрирования данной функции по всем координатам, кроме реконструируемого параметра, и нахождения максимума данного интеграла.

Следует отметить, что предлагаемая методика имеет некоторые ограничения. В частности, предполагается известной структура и тип пород, образующих слоистое дно, что определяет диапазон возможного изменения характеристик дна. При увеличении частоты для получения достоверных результатов, возможно, потребуется усложнение используемой модели дна.

Таким образом, предложена методика, позволяющая проводить поэтапное восстановление параметров среды по экспериментальным данным. Методика может быть использована как самостоятельно, так и для предварительной оценки характеристик слоистого дна и последующего их восстановления с использованием других методов. Возможность предварительного определения всех или некоторых параметров слоистого дна может существенно сузить диапазон поиска решения.

Литература

1. Caiti A. In-situ acoustic properties of a chalk seafloor / Caiti A., Max M.D. // Proc. the Second European Conference on Underwater Acoustics. – 1994. – V. 2. – P. 949-954.
2. Jesus S. A sensitivity study for full-field inversion of geo-acoustic data with a towed array in shallow water / S. Jesus // Proc. the Second European Conference on Underwater Acoustics. – 1994. – V. 2. – P. 899-904.
3. Vidmar P.J. A plane wave reflection loss model including sediment rigidity / P.J. Vidmar, T.L. Foreman // JASA. – 1979. – V. 66, № 6. – P. 1830-1835.
4. Chapman N.R. A coherent ray model of plane-wave reflection from a thin sediment layer / N.R. Chapman, D.M.F. Chapman // JASA. – 1993. – V. 94, № 5. – P. 2731-2738.
5. Carbo R. Wave reflection from a transitional layer between the seawater and the bottom / R. Carbo // JASA. – 1997. – V. 101, № 1. – P. 227-232.

6. Glegg S.A.L. The effective depth approximation for sound propagation in shallow water over a sediment layer and a hard rock basement / S.A.L. Glegg // JASA. – 1993. – V. 94, № 6. – P. 3302-3311.
7. Студеничник Н.В. Влияние дна Баренцева моря на низкочастотные звуковые поля / Н.В. Студеничник // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42, №1. – С. 134-139.
8. Микрюков А.В. Рефракция волн в слое осадков при дальнем распространении звука в океане / А.В. Микрюков, О.В. Попов // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42, № 5. – С. 672-678.
9. Агеева Н.С. Частотные характеристики нормальных волн в мелком море со слоистым поглощающим дном / Н.С. Агеева, В.Д. Крупин // Акустический журнал. – 1981. – Т. 27, № 5. – С. 669-677
10. Агеева Н.С. Некоторые особенности затухания мод в мелком море с трехслойным поглощающим дном / Н.С. Агеева, В.Д. Крупин // Акустический журнал. – 1985. – Т. 31, № 1. – С. 1-6.
11. Студеничник Н.В. Построение геоакустической модели дна в мелком море / Н.С. Агеева, В.Д. Крупин, В.П. Перельгин, Н.В. Студеничник // Акустический журнал. – 1994. – Т. 40, № 2. – С. 181-188
12. Гончаров В.В. Оценка акустических параметров морского дна по интерференции широкополосного звука / А.И. Веденев, В.В. Гончаров, Б.Ф. Курьянов // Акустические волны в океане. Под ред. Бреховских Л.М., Андреевой И.Б. – М.: Наука. – 1987. 215с.
13. Papadakis P.J. Recovery of the properties of an elastic bottom using reflection coefficient measurements / P.J. Papadakis, M.I. Taroudakis, J. Papadakis // Proc. the Second European Conference on Underwater Acoustics. – 1994. – V. 2. – P. 943-948.
14. Chapman N.R. Inversion of reflection loss versus angle data for elastic ocean bottom environments / N.R. Chapman D.E. Hannay, K.M.M. Rohr // Proc. the Third European Conference on Underwater Acoustics. – 1996. – V. 2. – P. 613-618.
15. Papadakis P.J. An inverse procedure for the reconstruction of a sea bottom consisting of two elastic materials / P.J. Papadakis, G.S. Piperakis // Proc. the Third European Conference on Underwater Acoustics. – 1996. – V. 2. – P. 619-624
16. Фокин В.Н. К вопросу о выборе модели дна в мелком море/ Б.В. Кержаков, В.Н. Фокин, М.С. Фокина // – Н. Новгород. – 1996, –22с. (Препринт № 415 ИПФ РАН)
17. Хэмптон Л. Акустика морских осадков / Л. Хэмптон – М.: Мир, 1977. – 536 с
18. Воловов В.И. Отражение звука от дна океана / Воловов В.И. – М.: Наука, 1993. – 270 с.
19. Молотков Л.А. Матричный метод в теории распространения волн в слоистых упругих и жидких средах / Молотков Л.А. – Д.: Наука, 1994. – 201 с.
20. Бреховских Л.М. Акустика слоистых сред / Л.М. Бреховских, О.А. Годин. – М.: Наука, 1989. – 412 с.

Стаття надійшла до редакції 21 жовтня 2013 р. російською мовою

А.И. Гончар, С.Г. Федосеенков, О.И. Шундель

РЕКОНСТРУКЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖНОГО ДНА ЗА КОЕФФИЦИЕНТОМ ВДБИТТЯ

Запропоновано методику оцінки характеристик шаруватого середовища в кілька етапів. Запропонована методика заснована на залежності форми проекції обраного рівня коефіцієнта відбиття на площину характеристик середовища (наприклад, проекції на площину: товщина шару осадків-поздовжня швидкість звуку в півпросторі) для різних кутів падіння плоскої хвилі при фіксованій частоті випромінювання. Уперше виконано чисельну реалізацію запропонованої методики для конкретних модельних даних.

Anatoly I. Gonchar, Sergey G. Fedoseenkov, Alexey I. Shundel

RECONSTRUCTION OF THE ELASTIC CHARACTERISTICS OF THE BOTTOM FROM THE REFLECTION COEFFICIENT

Proposed a method evaluation of the characteristics of the layered medium in several stages. The proposed methodology is based on the projection dependence of the shape the selected level of the reflection coefficient on the plane characteristics of the environment (for example, the projection on a plane: the thickness of sedimentary layer-longitudinal sound velocity in the half) for different angles of incidence of a plane wave at a fixed frequency radiation. First performed numerical realization of the proposed methodology for specific data model.