

УДК 551.462, 551.46.072

© **А.И. Гончар**, чл.- корр. НАН Украины, д.т.н., с.н.с., директор;
С.Г. Федосеенков, ведущий инженер; **Л.И. Шлычек**, ученый секретарь;
А.И. Шундель, научный сотрудник; **С.И. Неверова**, научный сотрудник

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

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ: КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ

В статье показана возможность определения при дистанционном зондировании нескольких акустических параметров многослойной структуры морского дна: коэффициента поглощения и его частотной зависимости, а также коэффициента отражения от поверхности дна.

**КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ, СПЕКТР, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ,
ДОННЫЕ ОСАДКИ, КОЭФФИЦИЕНТ ЗАТУХАНИЯ, ИМПЕДАНС**

Коэффициенты затухания и отражения звука и их зависимость от частоты являются важнейшими параметрами среды при её акустическом зондировании. Эти параметры особенно важно и интересно знать при геофизических исследованиях донных отложений, экологическом мониторинге акваторий. Реализация измерений этих параметров *in situ* может привести к созданию распределения коэффициентов затухания и отражения на исследуемой акватории. Кроме того, при реализации обратной задачи гидроакустики необходимо знать коэффициент поглощения.

Методы измерения коэффициента затухания можно разделить на методы, использующие прохождение сигнала через исследуемый образец, и методы, использующие практически полное отражение (в том числе многократное) сигнала от границ раздела донных отложений [1]. В гидроакустике первый метод практически не применим, т.к. измерение коэффициентов затухания «на просвет» требует двустороннего доступа к исследуемому образцу, а такая возможность не может быть реализована *in situ*. Для этого необходимо поднятие образцов донных проб на борт судна с целью лабораторного определения их механико-акустических характеристик (плотность, скорость звука, затухание, пористость и т.д.). Возможно, именно из-за этого в литературе данные по коэффициентам затухания и отражения приводятся с существенным разбросом [2, 3].

Интерес представляют методики, основанные на эхо-импульсном зондировании и использующие спектральные характеристики широкополосных отраженных или рассеянных сигналов.

В литературе описаны попытки измерения коэффициентов поглощения на основе трансформации спектра сигнала, отражённого от какой-либо слоистой структуры. Так, в работе [4] предлагается измерение коэффициента поглощения двухчастотным методом при предположении об известности показателя степени частотной зависимости.

В данной статье демонстрируется потенциальная возможность измерения как коэффициента затухания и его частотной зависимости в режиме работы «на отражение» при неизвестном коэффициенте отражения от слоёв донных осадков, так и одновременного измерения собственно коэффициента отражения.

Сделаем основные допущения. Во-первых, примем, что коэффициент отражения от границы двух сред не зависит от частоты падающей акустической волны. Это условие не

слишком жёсткое. Коэффициент отражения зависит от соотношения импедансов, которые в средах без поглощения являются действительными и не зависят от частоты. При наличии поглощения импеданс становится комплексным и появляется частотная зависимость, однако, эта зависимость слабая. Импеданс поглощающей среды определяется следующим выражением [5]:

$$Z = Z_0 \left(1 + j \frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right), \quad (1)$$

где α – коэффициент затухания на данной длине волны λ ;

$Z_0 = \rho c$ – импеданс среды без поглощения (ρ – плотность, c – скорость звука).

Мнимая часть коэффициента отражения мала, а частотная зависимость модуля коэффициента отражения – ничтожна.

Второе допущение касается частотной зависимости скорости звука. Считаем скорость звука постоянной величиной, не зависящей от частоты.

Считаем волну плоской, и это является третьим допущением. Для иллюстрации рассмотрим случай, когда в среде существуют границы, которые легко разрешаются зондирующим импульсом. Спектр сигнала, отражённого от одной из границ, можно записать следующим образом:

$$S(f) = VS_0 \exp(-2\alpha f^n x), \quad (2)$$

где V – коэффициент отражения;

$S_0(f)$ – спектр зондирующего сигнала;

n – показатель степени;

x – расстояние до отражающей границы, определяемое по времени задержки отражённого импульса;

α – независимый от частоты множитель в коэффициенте затухания.

Рассмотрим сначала простейший случай $n=1$. Запишем спектр отражённого сигнала на двух частотах f_1 и f_2 :

$$S(f_1) = VS_0 \exp(-2\alpha f_1 x), \quad (3)$$

$$S(f_2) = VS_0 \exp(-2\alpha f_2 x).$$

Возьмём отношение значений спектра на частотах f_1 и f_2 и прологарифмируем:

$$\ln \frac{S(f_1)}{S(f_2)} = 2x\alpha(f_2 - f_1). \quad (4)$$

Из выражения (4) находим α :

$$\alpha = \frac{\ln \frac{S(f_1)}{S(f_2)}}{2x(f_2 - f_1)} \quad (5)$$

Однако в реальности $n \neq 1$, что усложняет задачу. Для определения n и α потребуется значение спектра отражённого сигнала на трёх частотах f_1 , f_2 и f_3 :

$$\begin{aligned} S(f_1) &= VS_0 \exp(-2\alpha f_1^n x), \\ S(f_2) &= VS_0 \exp(-2\alpha f_2^n x), \\ S(f_3) &= VS_0 \exp(-2\alpha f_3^n x). \end{aligned} \quad (6)$$

Возьмём отношение значений спектра на частотах f_1 и f_2 , а также f_3 и f_2 , а затем прологарифмируем:

$$\begin{aligned} \ln \frac{S(f_1)}{S(f_2)} &= 2x\alpha(f_2^n - f_1^n), \\ \ln \frac{S(f_3)}{S(f_2)} &= 2x\alpha(f_2^n - f_3^n). \end{aligned} \quad (7)$$

Поделив одно уравнение на другое в (7), получим:

$$\frac{\ln \frac{S(f_1)}{S(f_2)}}{\ln \frac{S(f_3)}{S(f_2)}} = \frac{f_2^n - f_1^n}{f_2^n - f_3^n}, \quad (8)$$

или

$$\frac{f_2^n - f_1^n}{f_2^n - f_3^n} - \frac{\ln \frac{S(f_1)}{S(f_2)}}{\ln \frac{S(f_3)}{S(f_2)}} = 0.$$

Данное уравнение является трансцендентным относительно n , его можно решить либо графическим способом, либо, например, методом Ньютона [6, 7]. Подставляя найденное n из (8) в (7), определяем неизвестное α :

$$\alpha = \frac{\ln \frac{S(f_1)}{S(f_2)}}{2x(f_2^n - f_1^n)}. \quad (9)$$

Таким образом, основные параметры затухания можно определить, не зная коэффициента отражения. Можно также определить и сам коэффициент отражения, подставив полученные значения n , α в (2).

В реальных условиях, в том числе при наличии шумов, вычисленные значения могут оказаться неточными. Очевидно, повысить точность измерения можно, проведя измерения не в нескольких точках по частоте, а используя всю спектральную информацию. Для этого надо излучать широкополосный сигнал.

Выполним моделирование вышеизложенной методики определения n , α и V . При численном моделировании зондирующий импульс задается в форме прямоугольного радиоимпульса длительностью $\tau = 1$ мс. Чтобы максимально заполнить частотный диапазон, в качестве зондирующего сигнала используется сумма импульсов с заполнением на трёх частотах (1 кГц, 3 кГц, 5 кГц), имитирующих излучение резонансного преобразователя на нечётных гармониках (спектр составного импульса представлен на рис. 1)

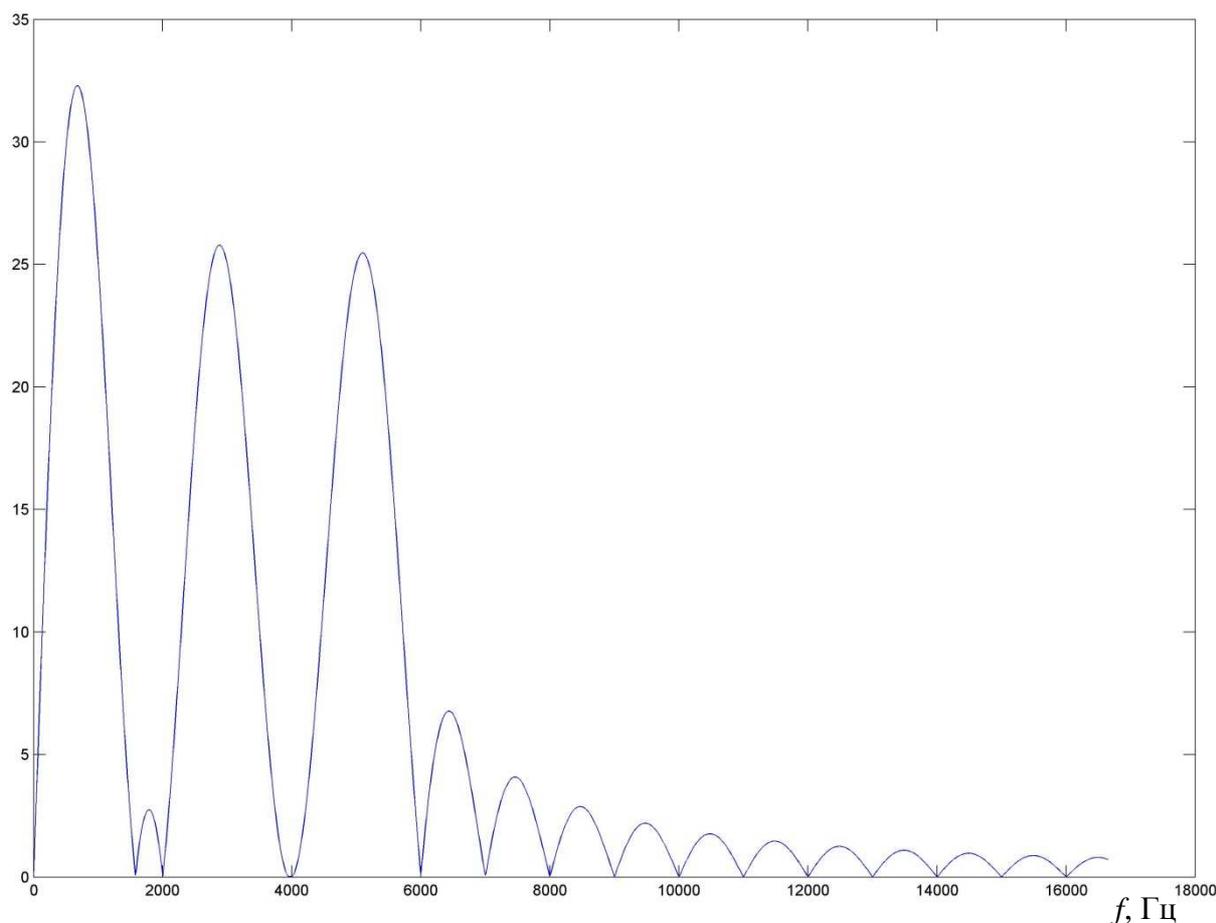


Рис. 1 – Спектр излучаемого импульса S_0

Выполнив нормировку спектра (2) на спектр зондирующего импульса, взяв модуль спектра, а затем, прологарифмировав, получим:

$$\ln|S_H(f)| = -2\alpha f^n x + \ln|V|, \quad (10)$$

где $S_H(f) = \frac{S(f)}{S_0(f)}$ – нормированный спектр.

Характерный вид функции $\ln|S_H(f)|$ показан на рис. 2.

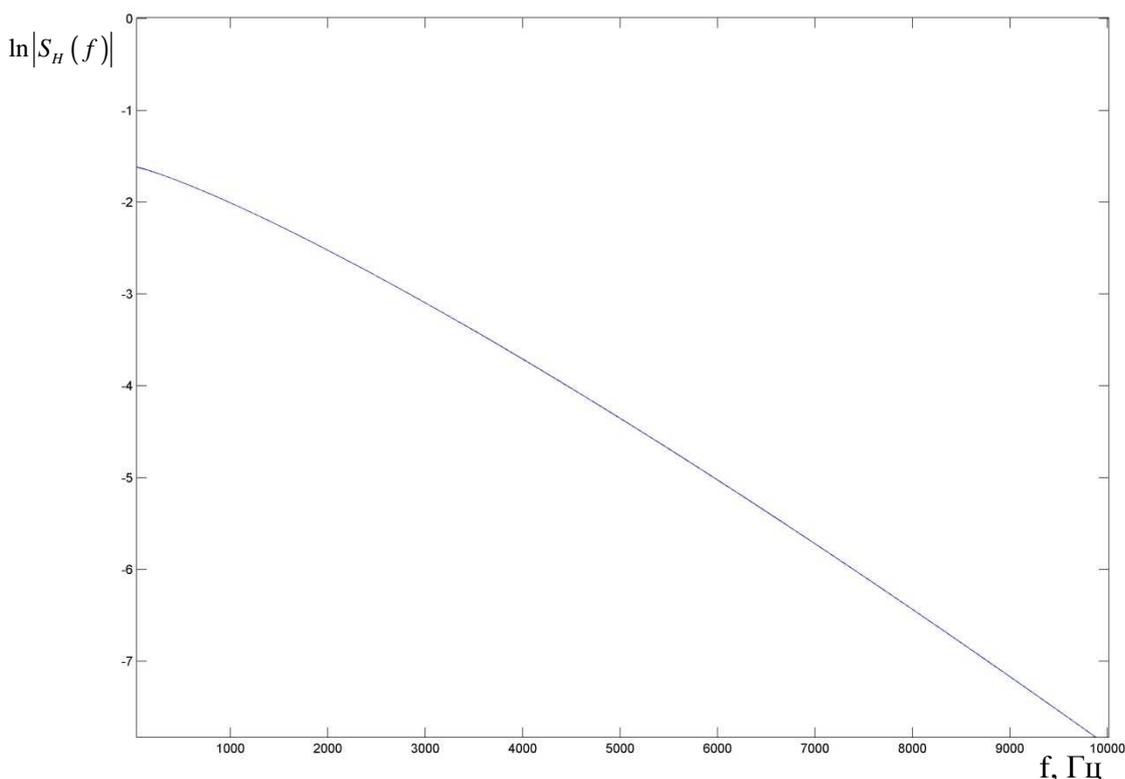


Рис. 2 – Нормированный спектр $\ln|S_H(f)|$

Из (10) видно, что для получения величины коэффициента отражения можно использовать значение нормированного спектра на нулевой частоте:

$$\ln|S_H(0)| = \ln|V|. \quad (11)$$

Однако измерение значения спектра на этой частоте невозможно: пьезоэлемент не излучает и не реагирует на постоянную составляющую. Используя данные о спектре в области частот с высоким отношением сигнал/шум, можно экстраполировать спектральную функцию в область низких частот, например, с помощью полиномиальной регрессии или комбинации интерполяции спектра кубическим сплайном с последующей экстраполяцией в область низких частот. Использование регрессионного анализа методом Левенберга-Марквардта [8] позволяет не только экстраполировать спектр в область низких частот, но и сразу определить значения n , α и V .

При моделировании задавались следующие исходные данные: $n=1.2$, $\alpha=5 \cdot 10^{-7}$, $V=0.2$, $x=100$ м.

Решив трансцендентное уравнение (8) методом Ньютона [6, 7] или графическим способом (рис. 3), определяем n , у нас оно получилось равным 1.196.

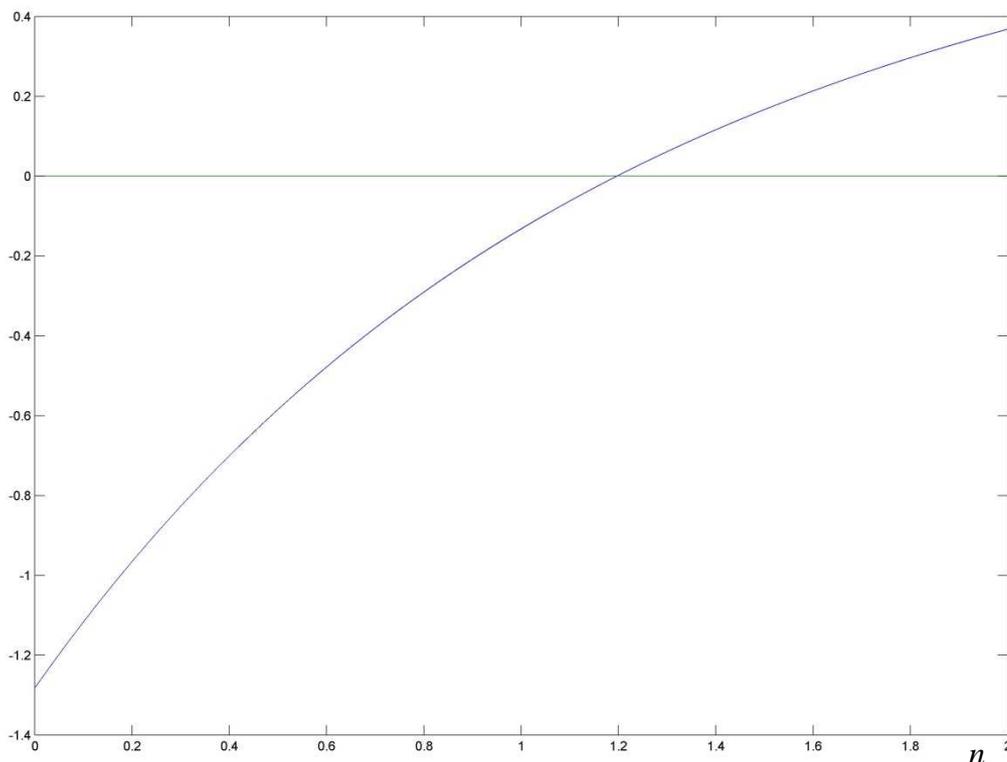


Рис. 3 – Графическое решение уравнения (8)

Определив значение n , подставляем его в формулу (9) и определяем α . Получаем $\alpha = 5,155 \cdot 10^{-7}$. Из формулы (11) определяем $V = 0.2$. Таким образом, по вышеописанной методике были определены все неизвестные n , α и V , и они довольно точно совпадают с заданными.

Сложнее обстоит дело, если отражение происходит от двух и более слоев донных осадков. Так как нам неизвестны ни толщины слоев, ни скорости звука в них, определение коэффициентов затухания в слоях становится невозможным. Однако остается возможным послойное определение коэффициентов отражения V_i ($i = 0 \dots N$, где N число слоев), двигаясь последовательно от верхнего слоя к нижнему.

Если донные осадки представить моделью водонасыщенных донных осадков (что в большинстве случаев имеет место), то становится возможным определение и коэффициентов затухания в слоях.

В работе [9] сопоставление результатов измерений (рис. 4) показало, что расхождение прямых и косвенных измерений по профилю № 1 не превышает 10%. Результаты исследований, выполненных по профилю № 1, подтвердили правомерность принятой модели для илисто-глинистых донных грунтов и доказали существование устойчивых связей между литологическим типом донного грунта и его плотностью.

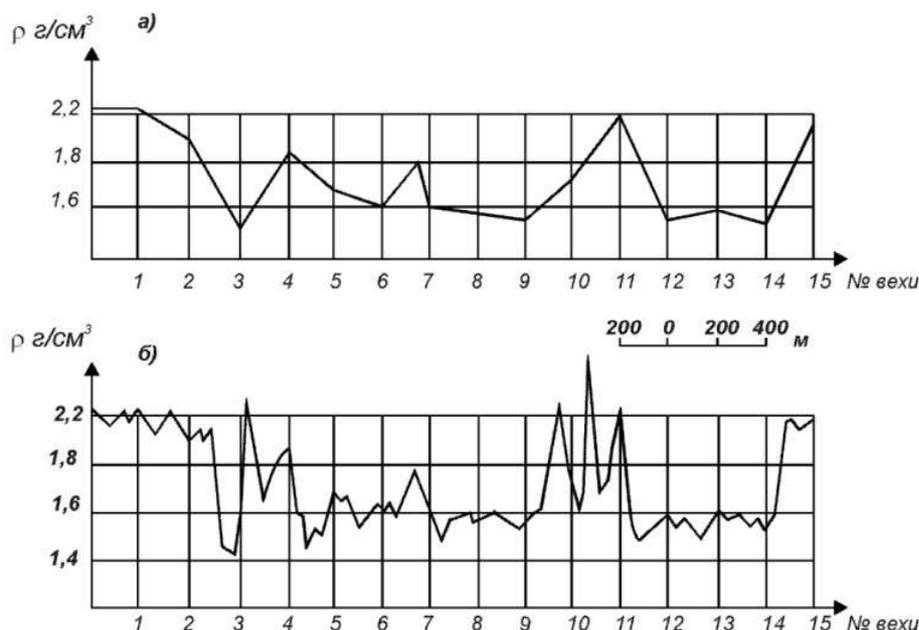


Рис. 4 – График изменения плотности по профилю №1:
а) прямые измерения; б) косвенные измерения [9]

В ходе проведения экспериментальных работ [9], выполненных на участках литологического полигона, донный грунт которого был представлен песками (рис. 5), установлено, что распределение плотности для песчаного грунта в пределах профиля № 2 характеризуется значениями 2,11-2,19 г/см³. В то же время результаты многократных измерений скорости продольных волн, выполненных в характерных точках профиля № 2 с помощью специальной донной установки, не выявили сколь-либо заметных отклонений скорости звука в песчаном грунте от скорости звука в воде.

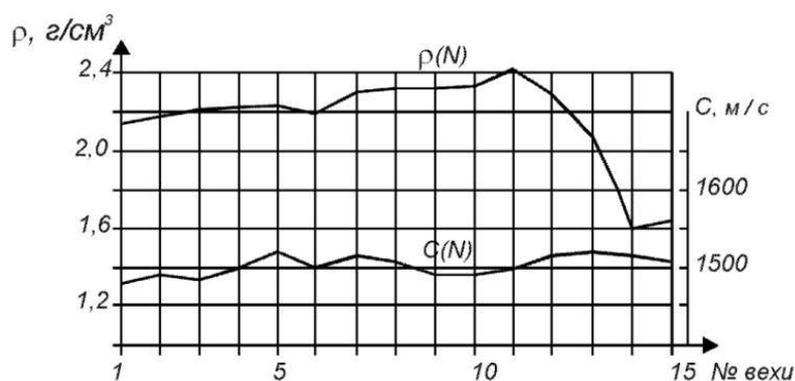


Рис. 5 – Графики изменения плотности ρ и скорости c продольных волн по профилю №2 (прямые измерения) [9]

Модель водонасыщенных донных осадков позволит определять коэффициенты затухания и отражения для каждого слоя, но данный вопрос требует более детального математического описания и проверки на математических моделях.

Литература

1. Труэлл Р. Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Труэлл Р. Эльбаум Ч., Чик Б.; Пер. с англ. под ред. И.Г.Михайлова. М.: Мир, -1972. – 307 с.
2. Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
3. Хэмптон Л. Акустика морских осадков / Хэмптон Л.; пер. с англ. Под ред. Житковского Ю.Ю. – М.: Мир, 1977. – 536 с.
4. Piechocki M. Attenuation measurement method of one side accessible tissues / Piechocki M., Lupaiewicz G. //Proc.4 Ultrasound boil. and med. symp. UBIOMED IV, Vishegrad. - 1979. -V.2.-P. 61-65.
5. Тюрин А.М. Теоретическая акустика / Тюрин А.М. - Л.: Военно-морская академия, 1971. – 443с.
6. Бахвалов Н.С. Численные методы / Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. - М.: Наука, 1987. – 630 с.
7. Корн Г. Справочник по математике : (для научных работников и инженеров) / Корн Г., Корн Т.; пер. со 2-го амер. перераб. издания под ред. Арамановича И.Г. — М.: Наука, 1970. — 832 с. с илл.
8. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. - М.: Мир, 1985. - 509 с.
9. Свечников А.И. Обобщенная модель донного грунта при гидрографических задачах / Свечников А.И. // Навигация и гидрография. – 1998. - №6. – С. 65-68

Стаття надійшла до редакції 28 вересня 2011 р. російською мовою

**© А.І. Гончар, С.Г. Федосєнков, Л.І. Шличек, О.І. Шундель, С.І. Невєрова
СПЕКТРАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ДОННИХ ВІДКЛАДЕНЬ:
КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ І ПОГЛИНАННЯ**

У статті показана можливість визначення при дистанційному зондуванні декількох акустичних параметрів багат шарової структури морського дна: коефіцієнта поглинання та його частотної залежності, а також коефіцієнта відбиття від поверхні дна.

**© Anatoly I. Gonchar, Sergey G. Fedoseenkov, Lubov I. Shlychek,
Alexey I. Shundel, Svetlana I. Neverova**

**SPECTRAL METHOD OF ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE BOTTOM
SEDIMENTS: THE COEFFICIENTS OF REFLECTION AND ABSORPTION**

In the article shows the possibility of determining the several acoustic parameters of the environment: the absorption coefficient and its frequency dependence and the coefficient of reflection from the surface of the multilayer structure of the seabed for remote sensing.