

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)

СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПОСЛОЙНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОФИЛОГРАММАХ

В статье предложены спектральные методы послойного определения литологических свойств донных отложений в профилограммах. Выполнено математическое моделирование предложенных методов, которое показало их эффективность.

АЛГОРИТМЫ, ДЕВИАЦИЯ ЧАСТОТЫ, ЛЧМ-СИГНАЛ, ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПРОФИЛОГРАФ,
ПРОФИЛОГРАММА, СПЕКТР СИГНАЛА

Распределение амплитуды отраженного сигнала в толще донного грунта дает информацию о глубине дна, наличии слоев и других неоднородностей. Однако это не дает прямых измерений акустических свойств среды распространения сигнала, таких, например, как скорость звука в грунте. Перспективным направлением является использование и других источников информации о физических свойствах донных отложений.

Использование в профилографах сигналов с линейной частотной модуляцией – ЛЧМ-сигналов и цифровая регистрация полного сигнала открывают возможность использования дополнительно к мощности (амплитуде) также спектральных характеристик отраженных сигналов для целей исследования структуры морского грунта.

Исследования возможности вычисления скорости звука в верхнем слое уже проводились авторами [1]. Они показали, что:

$$c_2 = \frac{\rho_1 c_1 \left(\frac{1+R}{1-R} \right)},$$

где $\rho_1 c_1$ – импеданс воды;

c_2 – скорость звука в первом (верхнем) слое дна;

R – коэффициент отражения;

ρ_2 – плотность донного грунта в верхнем слое.

При этом величина ρ_2 находится из зависимостей $\rho=f(R)$ по соответствующим регрессионным уравнениям или петрофизическим моделям.

Глубоководные сейсмические исследования указывают на почти повсеместный многослойный характер структуры донных осадков [2]. В связи с этим можно предположить, что при широкополосной регистрации волн всегда можно найти

придонный слой, который для данной частоты будет являться тонким, т.е. отношение мощности слоя h к длине падающей волны λ будет меньше двух ($h/\lambda < 2$). Если слой h , обладающий акустической жесткостью z_2 , однородный и заключен между двумя полупространствами, характеризующимися акустическими жесткостями z_1 и z_3 , причём $z_1 < z_2 < z_3$, то для модуля коэффициента отражения при условии нормального падения волны на поверхность такого слоя справедливо следующее выражение [2]:

$$|R|^2 = \frac{(R_{23} + R_{12})^2 - 4R_{23}R_{12} \sin^2 k_2 h}{(R_{23}R_{12} + 1)^2 - 4R_{23}R_{12} \sin^2 k_2 h}, \quad (1)$$

где R_{12} , R_{23} – коэффициенты отражения от границ тонкого слоя;

k_2 – волновое число, $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$;

c_2 – скорость прохождения акустических волн в тонком слое;

h – мощность слоя.

Как видно из формулы (1), модуль коэффициента отражения имеет максимум при толщине слоя h , равной целому числу полуволн, и минимум – при толщине h , равной нечётному числу четвертей длин волны.

Это означает, что точки экстремумов R_{\max} и R_{\min} кривой $R = R(f)$ при наличии тонкого однородного слоя будут располагаться на равных частотных интервалах Δf .

Это обстоятельство играет существенную роль при анализе волновой картины в диапазоне спектра частот регистрируемых колебаний. В полосе более высоких частот увеличивается возможность влияния на форму спектральной кривой $R = R(f)$ наличия в разрезе очень тонких слоев.

Точки экстремумов, определяющие экстремальные значения модуля коэффициента отражения, позволяют определить скорости звуковых волн в тонком слое и в подстилающей среде при известных значениях ρ_1, ρ_2 и c_1, ρ_3 . Из формулы (1) получено [1]:

$$c_3 = c_1 \frac{\rho_1}{\rho_3} \left(\frac{1 + R_{\max}}{1 - R_{\max}} \right) \quad (2)$$

где c_3 – скорость звука в тонком слое;

ρ_1 – плотность морской воды;

ρ_3 – плотность тонкого слоя донных отложений.

Аналогичным образом найдено [1]:

$$c_2 = c_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} \left[\frac{(1 + R_{\min})(1 + R_{\max})}{(1 - R_{\min})(1 - R_{\max})} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Наличие тонкого слоя устанавливается, как исследовано в [3], по присутствию в спектре отраженной волны побочных максимумов.

Все величины в формулах (2) и (3) известны, кроме ρ_2 и ρ_3 . Плотность ρ_2 самого верхнего осадочного слоя определяется по пробам грунта или, при отсутствии непосредственных определений ρ_2 и ρ_3 , путем использования среднестатистических данных о плотности осадков.

Формула для отношения спектров двух однократно отраженных волн при наличии тонкого слоя имеет вид [3]:

$$\frac{S_1(f)}{S_2(f)} = \frac{R_1(f)}{R_2(1 - R_1^2(f))} \left(1 + \frac{h_2 c_2}{h_1 c_1} \right) e^{2\alpha_2(f)h_2}, \quad (4)$$

где $S_1(f)$ – спектр однократно отражённой волны от верхнего слоя;

$S_2(f)$ – спектр однократно отражённой волны от тонкого слоя,

откуда находится значение спектрального коэффициента отражения $R_1(f)$ от тонкого слоя [1]:

$$R_1(f) = \frac{S_1(f)}{S_2(f)} R_2 e^{-2\alpha_2(f)h_2} \left(\frac{1}{1 + \frac{h_2 c_2}{h_1 c_1}} \right) \quad (5)$$

Зная величину $R_1(f)$, можно определить $|R|$:

$$|R| = \frac{R_1(f)}{(1 - R_1^2(f))} e^{-\varphi} \quad (6)$$

Величина φ в формуле (6) представляет собой отрезок, отсекаемый аппроксимирующей прямой на оси ординат.

Таким образом, после построения спектральной кривой $|R(f)|$ и учета поглощения $\alpha_2(f)$, используя формулы (5) и (6), можно приступить к непосредственному определению скоростей в придонном и подстилающем слоях, пользуясь выражениями (2) и (3).

Проведем расчет скорости звука по спектральным коэффициентам отражения при профилировании модели слоистого дна (рис. 1) с физическими параметрами, указанными в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики слоев модели структуры донных отложений (плотность, скорость звука, мощность, коэффициент затухания)

Номер слоя №	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Мощность слоя, м	Коэффициент затухания, дБ/км×Гц
1	1000	1500	10	0
2	1110	1480	3	0.05
3	1530	1650	0.9	0.4
4	1800	1600	5	0.5

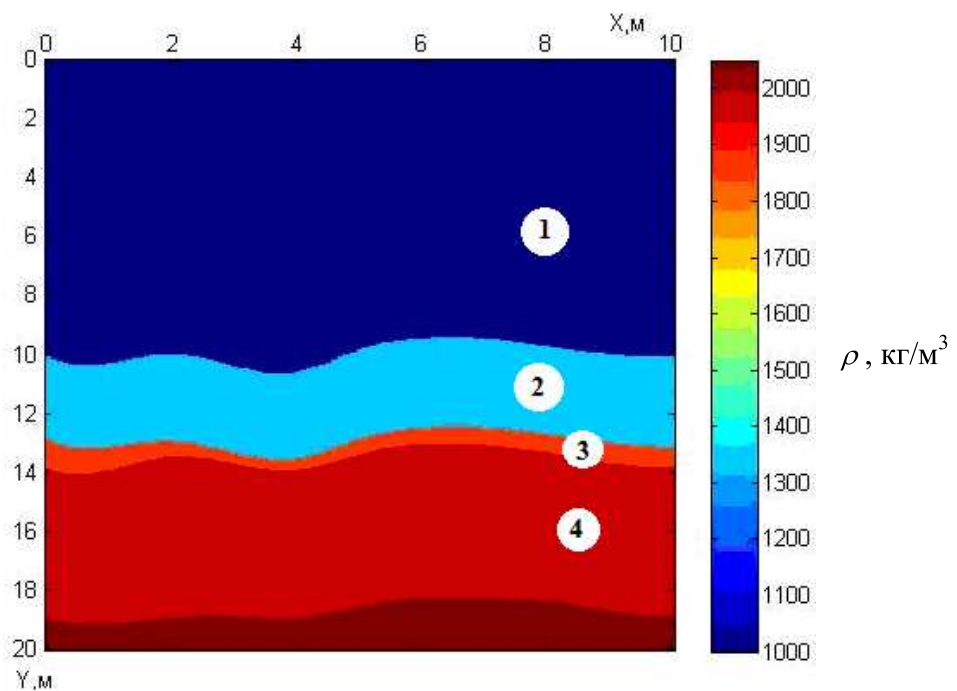


Рисунок 1 – Модель слоистой структуры морского дна с показаниями плотности и помеченными номерами слоев

В качестве модели зондирующего импульса используется ЛЧМ-сигнал с параметрами:

- нижняя частота 3 кГц;
- девиация частоты 5 кГц;
- длительность импульса 4 мс.

Используя результаты работы [4], построим математическую модель профилограммы (рис. 2).

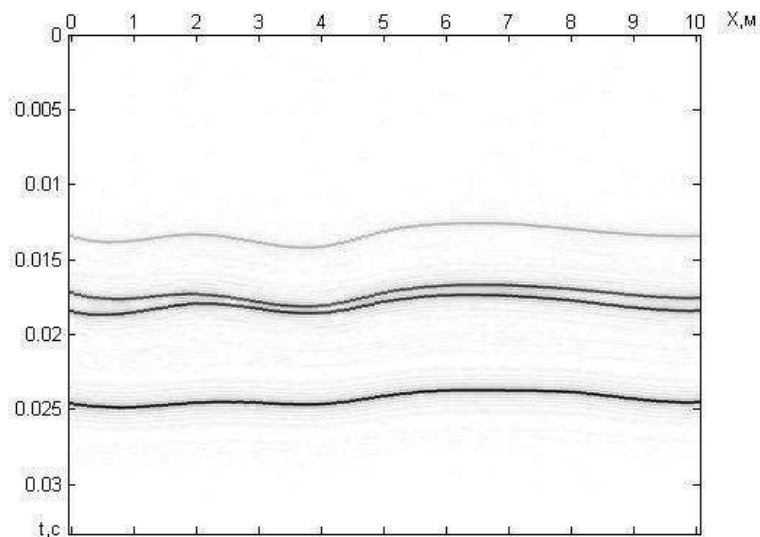


Рисунок 2 – Модельная профилограмма

Спектральная плотность сигнала от границ слоев 2 и 3 будет иметь вид (рис. 3).

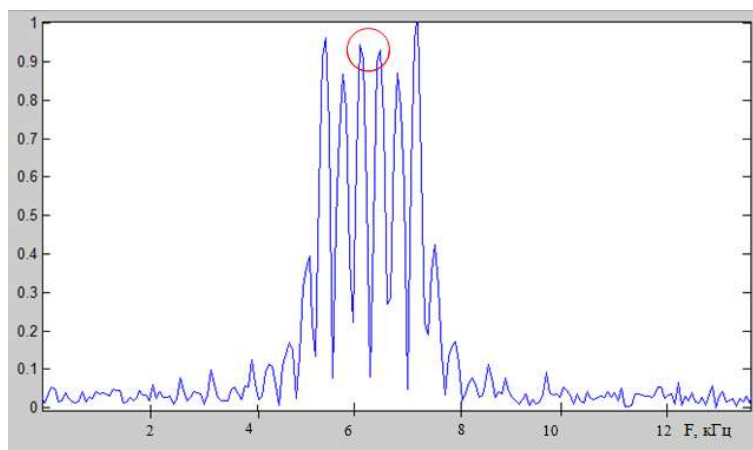


Рисунок 3 – Спектральная плотность отраженного сигнала от границ слоев 2 и 3

Присутствие побочных максимумов на спектральной плотности отраженного от границ слоев 2 и 3 (отмечено на рис. 3) сигнала говорит о наличии тонкого слоя.

На основе методики, разработанной в [5], можно найти закон $\alpha_2(f)$ поглощения акустической энергии в тонком слое. В качестве известной функции, восстанавливаемой искомым полиномом, рассмотрим зависимость коэффициента затухания от частоты, эмпирическая формула которой имеет вид $\beta = k \cdot f^n$ [6], где частота выражена в кГц, а k и n – постоянные, зависящие от типа грунта, причем значение n может изменяться от 0,5 до 2. На частотах от единиц до сотен кГц коэффициент затухания линейно зависит от частоты $-n \approx 1$. Для интерполяции такой функции достаточно многочлена первого порядка.

Исходя из этого, получим выражение, описывающее поглощение акустической энергии в тонком слое:

$$\alpha_2(f) = 2.57 \cdot 10^{-6} f + 2.28 \cdot 10^{-3}.$$

Теперь по формулам (4-6) можно построить график зависимости спектрального коэффициента отражения $|R|$ от тонкого слоя (рис. 4).

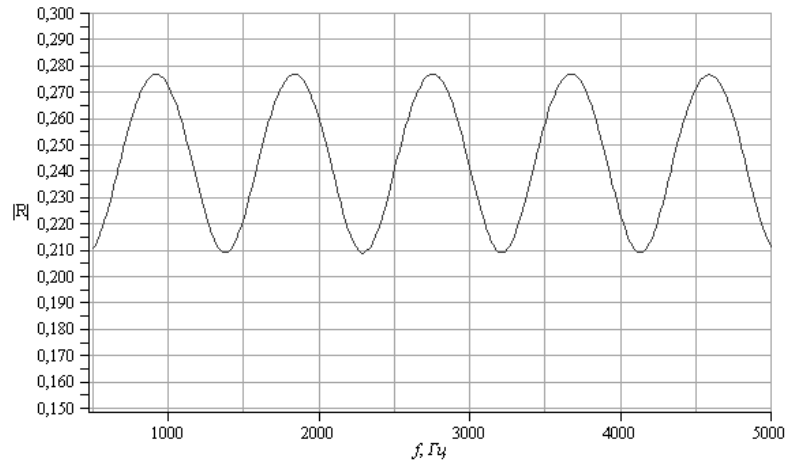


Рисунок 4 – График зависимости спектрального коэффициента отражения $|R|$ от частоты f

График представляет собой квазипериодическую функцию частоты и имеет максимум и минимум функции.

Несложно определить $R_{\max} = 0.277$, $R_{\min} = 0.209$. Эти найденные величины позволяют определить искомые скорости звука c_2 и c_3 по формулам (2) и (3):

$$c_3 = 1482 \cdot \frac{1114}{1808} \cdot \left(\frac{1+0.277}{1-0.277} \right) \approx 1598$$

$$c_2 = 1482 \cdot \frac{1114}{1532} \cdot \left[\frac{(1+0.209)(1+0.277)}{(1-0.209)(1-0.277)} \right]^{1/2} \approx 1652. \quad (7)$$

Сравнивая полученные результаты с результатами работы алгоритмов в [5], где предполагалось, что $c_3 = c_2 = 1500$ м/с, можно увидеть существенную разницу в виде суммарной относительной погрешности определения скорости звука:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{|1480-1500|}{1480} + \frac{|1650-1500|}{1650} + \frac{|1600-1500|}{1600} \right) \cdot 100\% \approx 16\%$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{|1480-1482|}{1480} + \frac{|1650-1652|}{1650} + \frac{|1600-1598|}{1600} \right) \cdot 100\% \approx 0.3\% \quad (8)$$

Как видно из (8), относительная погрешность при предположении, что $c_3 = c_2 = 1500$ м/с, равна 16%, а при использовании изложенной методики с применением

спектрального коефіцієнта отражения в тонком слое относительная погрешность равна 0,3%.

Таким образом, реализован метод определения скорости звука во втором и третьем слое донных отложений по спектральным коэффициентам отражения. Недостатком этого метода является необходимость присутствия тонкого слоя в толще дна. Но тот факт, что статистика морских сейсмических исследований свидетельствует о повсеместных наблюдениях таких слоев в донных отложениях, делает весьма актуальным использование данного алгоритма в технологии автоматизированной дистанционной профильной грунтовой съемки морского дна.

Корреляционная обработка ЛЧМ-сигнала неявно предполагает, что форма отраженного от различных слоев осадочных пород сигнала (или его спектр) не изменяется и совпадает с зондирующим. Очевидно однако, что при отражении от морского грунта следует ожидать изменения спектра широкополосного сигнала. Поэтому исследование характера изменений формы отраженных эхо-сигналов является актуальной задачей для повышения эффективности использования акустических профилографов со сложными сигналами.

По сути, каждый слой донных отложений – это сложный пространственный фильтр, через который проходит сигнал. Очевидно, что отраженный сигнал от различных видов донного грунта (который можно задать с помощью таких характеристик, как скорость звука, плотность, коэффициент отражения, коэффициент затухания) будет иметь разную геометрическую форму, причем малейшие изменения формы сигнала будут говорить об изменении физико-механических параметров слоя донных отложений.

Таким образом, если измерить отраженные сигналы от различных видов донного грунта (например, сопоставить результаты профилирования с пробами, взятыми с помощью грунтовых трубок) и составить эталонную таблицу, по которой в дальнейшем сравнивать результаты профилирования, можно эффективно стратифицировать донные отложения. Оценить геометрическую форму отраженного сигнала от слоя донных отложений можно с помощью нахождения его спектра и на его основе нахождения оценок грунта.

Анализ данных заключался в исследовании изменения спектра отраженного сигнала в зависимости от глубины H проникновения в морской грунт. Спектральный анализ проводился на фиксированных по длине последовательных интервалах времени.

Для проверки этой теории был проведен расчет спектральной плотности отраженных моделей сигналов с известными акустическими параметрами в слоях. В качестве излучаемого широкополосного сигнала был взят ЛЧМ-сигнал. Модель сигнала с законом затухания в исследуемом слое донных осадков можно представить в виде:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta(\omega)h} \cos(\omega(t)), \quad (9)$$

где A_0 – максимальная амплитуда сигнала;

h – ширина слоя;

$$\omega(t) = \omega t + \frac{\omega(\tau)}{\tau} t^2 - \text{закон изменения частоты сигнала;}$$

$\Delta\omega$ – девиация частоты;

τ – длительность импульса;

$\beta(\omega)$ – коэффициент затухания.

В качестве функции $\beta(\omega)$ рассмотрим зависимость коэффициента затухания от частоты, эмпирическая формула которой имеет вид $\beta = k \cdot f^n$ [6].

Путем анализа данных о коэффициентах затухания акустического сигнала в грунте [6] была выявлена средняя зависимость коэффициента затухания от частоты для разных типов донного грунта. На рис. 5 приведены усредненные зависимости коэффициента затухания от частоты для песчаного грунта (кривая 1), алевроитовых глинистых пород (кривая 2) и илистого грунта (кривая 3).

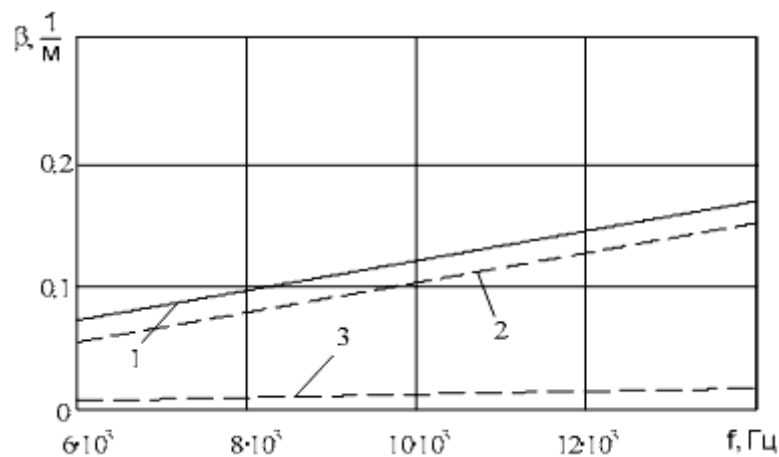


Рисунок 5 – Усредненная зависимость коэффициента затухания от частоты для песчаного грунта (кривая 1), алевроитовых глинистых пород (кривая 2) и илистого грунта (кривая 3)

Вследствие слоистой структуры донного грунта реальный акустический сигнал будет представлять собой наложение сигналов, отраженных от границ раздела между слоями. В этом случае акустический сигнал, отраженный от первого слоя, будет иметь закон затухания, зависящий от материала первого слоя донного грунта. Сигнал, отраженный от второго слоя, при наложении на сигнал от первого слоя будет иметь закон затухания, представляющий собой сумму законов затухания от первого и второго слоев. В результате сигнал от каждого последующего слоя будет нести информацию не только о законе затухания в этом слое, но и о законах затухания нескольких предыдущих слоев.

На рис. 6 приведена модель такого акустического сигнала (в присутствии случайной помехи), состоящего из трех сигналов, отраженных от разных слоев донных отложений с параметрами, указанными в табл. 2. При этом зондирующий ЛЧМ-сигнал имел параметры:

центральная частота $f_0 = 11$ кГц;

длительность импульса $\tau = 4$ мс;

девиация частоты $\Delta f = 9$ кГц.

Таблиця 2 – Параметри слоев донных отложений

№ слоя	Тип грунта	Толщина слоя, м	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Коэф. затухания, 1/м
1	ил	1,45	1100	1450	0,01
2	глина	1,52	1420	1520	0,05
3	песок	1,55	1560	1550	0,08

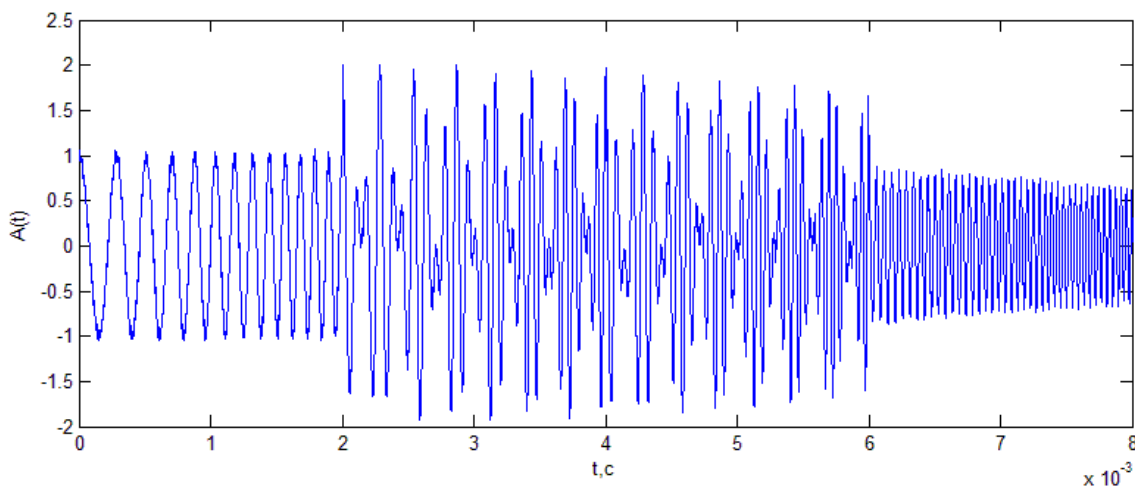
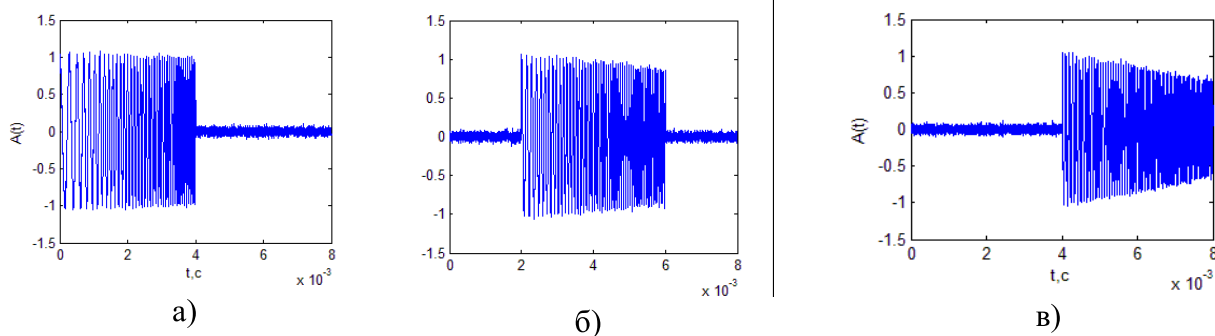


Рисунок 6 – Модель сигнала, прошедшего через донный грунт

На рис. 7 приведены сигналы, отраженные от первого, второго и третьего слоев соответственно.

Рисунок 7 – Модельные сигналы, отраженные от трех разных слоев
а) ил; б) глина; в) песок

Из рис. 6 видно, что сигнал сильно искажен. Но при этом часть сигнала без наложения (от 0 до 2 мс) не искажена и несет в себе информацию о затухании в грунте, что позволяет восстанавливать по разработанной методике [5] зависимость коэффициента затухания от частоты для первого слоя грунта. Если из данной модели исключить отраженный от первого слоя донного грунта сигнал, становится возможным восстановить сигнал, отраженный от второго слоя и т.д.

На рис. 7 показаны спектральные плотности восстановленных сигналов.

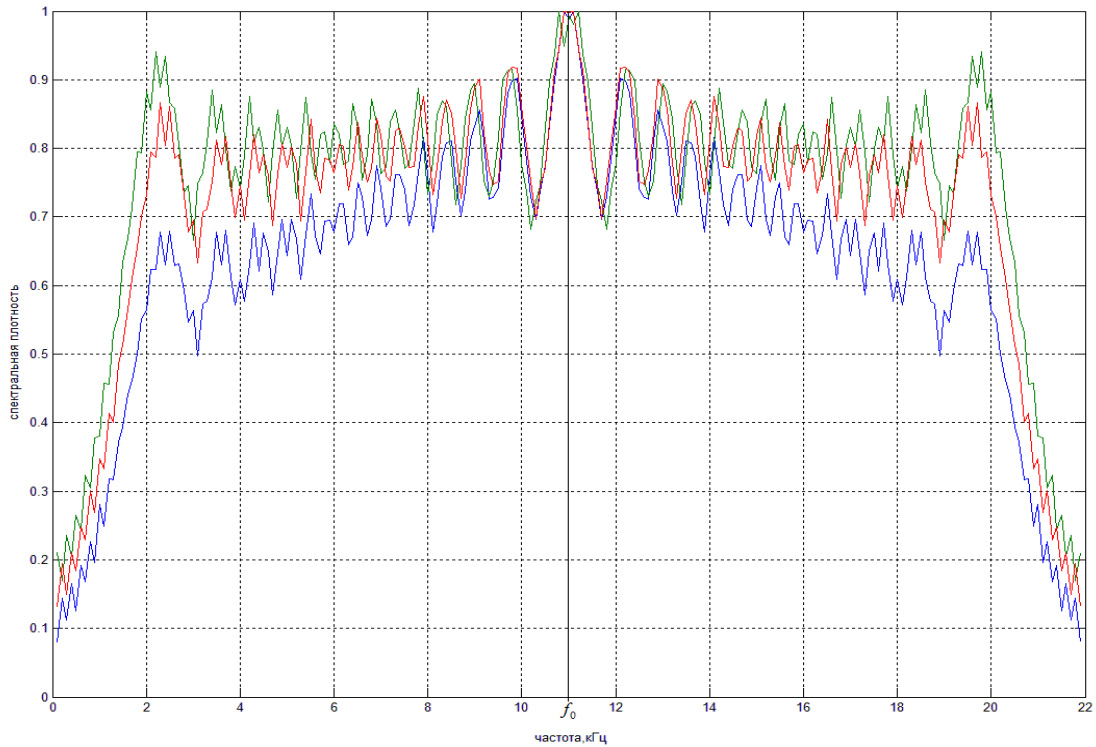


Рисунок 7 – Спектральные плотности отраженных сигналов от слоя №1 (ил) – зеленый цвет графика; слоя №2 (глина) – красный цвет графика; слоя №3 (песок) – синий цвет графика

Спектральная плотность $G(f)$ на рис. 7 показывает распределение энергии отраженного сигнала по частотам. Возникает вопрос: как оценить количественно распределение этой энергии?

В статистике для характеристики формы распределения используется несколько интегральных характеристик. Эти величины можно использовать и для описания формы спектра $G(f)$, в частности:

- коэффициент асимметрии k характеризует симметрию спектра относительно нижней частоты f_0 , он равен [7]:

$$k = \frac{\int (f - f_0)^3 G(f) df}{\left(\int (f - f_0)^2 G(f) df \right)^{3/2}}. \quad (10)$$

Неформально говоря, коэффициент асимметрии положителен, если правый хвост $G(f)$ длиннее левого, и отрицателен в противном случае. Если распределение симметрично относительно центральной частоты f_0 , то его коэффициент асимметрии равен нулю.

Коэффициент эксцесса ν , характеризующий сглаженность спектра в окрестности центральной частоты f_0 , равен [7]:

$$v = \frac{\int (f - f_0)^4 G(f) df}{(\int (f - f_0)^2 G(f) df)^2} - 3. \quad (11)$$

Он положителен, если кривая распределения около центральной частоты f_0 острая, и отрицателен, если пик гладкий.

Применяя формулу (11) к спектральной плотности отраженных сигналов на рис. 7, получим такие значения (табл. 3):

Таблица 3 – Значения коэффициента эксцесса V спектра отраженного сигнала для каждого слоя донных отложений

№ слоя	Тип грунта	Коэффициент эксцесса V
1	ил	12,4596
2	глина	4,4562
3	песок	1,6982

Коэффициент асимметрии k для каждого слоя, очевидно, будет равен нулю (так как «хвосты» спектра симметричны относительно f_0). В реальных отраженных сигналах коэффициент асимметрии будет отличен от нуля, что в свою очередь даст дополнительный признак при стратификации донных отложений.

Таким образом, по табл. 3 можно судить о форме спектра отраженного сигнала, или, другими словами, о литологических свойствах донного грунта.

В дальнейших разработках этой методики необходимо произвести ряд измерений: записать отраженный сигнал от заранее известных типов грунта, затем вычислить спектр отраженного сигнала и его коэффициенты эксцесса и асимметрии, далее составить некую эталонную таблицу, с помощью которой можно будет проводить стратификацию донных отложений.

Литература

1. Исследование слоистости дна с использованием сложных зондирующих сигналов для определения структуры донных отложений и водной среды: Отчет по НИР / НТЦ ПАС НАН Украины; № 0109U003224. Запорожье, 2009. – 152 с.
2. Акустика океана / [под ред. Л.М. Бреховских]. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
3. Орленок В. В. Морская сейсмоакустика / В. В. Орленок – Калининград, 1997. – 150 с.
4. А.И. Гончар, С.Г. Федосеенков, А.И. Шундель. Цифровое моделирование параметрического профилографа / Труды IV межд. конференции «Проблемы, методы и средства исследования Мирового океана» (Запорожье, 14-15 мая 2013 г.): – Запорожье, 2013. – С. 132-144.
5. Створення технології автоматизованої дистанційної профільної ґрунтової зйомки морського дна: Звіт з НДР / НТЦ ПАС НАН України; № 0110U003681. Запоріжжя, 2012. – 74 с.
6. Акустические и механические свойства осадков: в книге "Акустика морских осадков" / Д.Т. Смит (под ред. Л. Хэмптона), М.: Мир. – 1977.– С.47-65.
7. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Корн Г., Корн Т. М. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

Стаття надійшла до редакції 14 жовтня 2013 р. російською мовою

А.І. Гончар, С.Г. Федосєєнков, О.І. Шундель
СПЕКТРАЛЬНІ МЕТОДИ ПОШАРОВОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЛІТОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ДОННИХ ВІДКЛАДІВ У ПРОФІЛОГРАМАХ

У статті запропоновано спектральні методи пошарового визначення літологічних властивостей донних відкладів у профілограмах. Виконано математичне моделювання запропонованих методів, що показало їх ефективність.

Anatoly I. Gonchar, Sergey G. Fedoseenkov, Alexey I. Shundel
SPECTRAL METHODS OF LAYER-BY-LAYER DETERMINATION OF BOTTOM MATERIALS
LITHOLOGIC FEATURES IN PROPHILOGRAMS

Spectral methods of layer-by-layer determination of lithologic features of bottom materials in profilograms are proposed in this work. It was performed a mathematical simulation of suggested methods where the efficiency of the last was shown.