

**Pashnja Anna Sergeevna**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: anna.paschnya@yandex.ru.

27, Garibaldi Street, Ap. 49, Taganrog, Russia.

Phone: +79525735406.

The Department of Hydroacoustics and Medical Engineering; Postgraduate Student.

УДК 534.883:577.4

**Г.В. Солдатов**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ  
ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ В ЦЕЛЯХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА**

*Данная статья посвящена проблеме экологического мониторинга мелководных водоемов. В работе рассмотрены методы, позволяющие определять структуру и параметры морского донного грунта дистанционным способом. Для реализации предложенных методов необходима антенная система с высокой направленностью низкочастотного луча, отсутствием бокового поля, высокой разрешающей способностью по дальности. Применение параметрической излучающей антенны позволяет реализовать предложенные методы, при исследовании на малых глубинах, а также определить параметры дна с высокой точностью.*

*Экологический мониторинг; параметрический профилограф; исследование дна; гидроакустика.*

**G.V. Soldatov**

**DEFINING THE PARAMETERS OF SEDIMENTS REMOTE SENSING FOR  
ENVIRONMENTAL MONITORING**

*This article is devoted to environmental monitoring of shallow reservoirs. The paper discusses methods to determine the structure and parameters of the sea-bottom soil remote way. To implement the proposed method requires an antenna system with high-frequency beam orientation, lack of lateral field, high resolution in range. The use of parametric emitting antenna makes it possible to implement the proposed methods in the investigation at shallow depths, as well as to determine the parameters of the bottom with high accuracy.*

*Ecological monitoring; parametric chirp; seabed reaserch; underwater acoustic.*

На экологическое состояние водной среды, морей и внутренних водоемов большое влияние оказывает состояние донных осадков. Необходимо непрерывно следить за процессом опасного загрязнения осадков и своевременного реагировать на него. Контролировать структуру и характеристики донного грунта можно путем непосредственного взятия проб. Все чаще трудоемкие и дорогостоящие методы определения свойств морского дна путем непосредственного измерения физических характеристик заменяются более дешевыми и требующими меньших временных затрат дистанционными геофизическими методами с возможностью проведения периодического мониторинга.

Тонкая структура придонных осадков традиционно изучается с помощью технологий сейсмопрофилирования. Недостатком обычных широкополосных профилографов является то, что на разных частотах они «озвучивают» различный объем среды, в результате чего физические характеристики грунтов, определяемые по отраженным сигналам на разных частотах, несопоставимы, так как они соответствуют различным объемам осадков. В сейсморазведочных работах для опре-

деления типов донных осадков применяют ряд стандартных методов, таких как методы преломленных и отраженных волн. В качестве источников акустических колебаний в морской среде используют мощные всенаправленные источники ударных волн, такие как бумер, спаркер. Перспективным направлением для решения задач исследования донных осадочных структур является использование методов нелинейной гидроакустики, реализуемых с помощью так называемых параметрических систем [1].

Высокая направленность параметрических антенн при излучении низких, хорошо проникающих в грунт частот, позволяет добиться хорошего разрешения и за счет этого получить детальную информацию об изучаемом участке. В силу своей широкополосности параметрический профилограф способен адаптивно решать задачу профилирования донных отложений, позволяя выбрать оптимальную рабочую частоту в зависимости от вида и типа донного грунта [1, 2].

В данной работе рассматриваются методы определения мощности и скорости звука в морских донных осадках с помощью параметрического профилографа.

Рассмотрим два плоских слоя, лежащих в полубесконечной среде (рис. 1). Толщины слоев обозначим  $H_1$  и  $H_2$ , скорости волн в них  $V_1$  и  $V_2$ , а скорость в нижележащем пространстве  $V_3$ . В точке 1 устанавливается излучатель, приемники располагаются в точках 1 и 2.

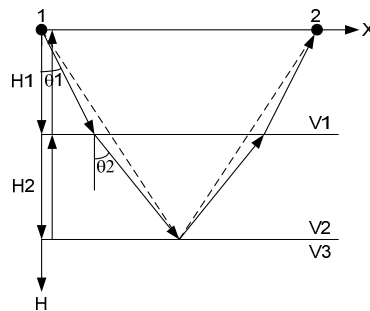


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация метода

Если бы луч сквозь слои распространялся по кратчайшей траектории (пунктирные линии на рис. 1) годограф  $T(x)$  соответствующей волны представлял бы собой гиперболу, как и в случае одного слоя. На самом деле траектория луча не прямолинейна, а, согласно принципу Ферма, удовлетворяет требованию минимальности времени (стрелки на рис. 1). Поэтому истинная зависимость  $T$  от  $X$  совпадает только в начале координат, расхождение увеличивается с расстоянием. Данная методика имеет ограничения применимости. Во-первых, горизонтальное расстояние  $X$  должно быть много меньше толщины слоев, тогда углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  будут примерно равны, следовательно, теоретическая и истинная траектории будут различаться незначительно. Во-вторых, толщина слоя  $H_2$  не должна быть много меньше  $H_1$ . Если  $H_1 \gg H_2$ , то на траекторию луча сильное влияние оказывает вертикальное распределение скорости звука в первом слое. Если отношение мощностей слоев больше 15, то данный метод не применим [3].

Уравнение годографа для волны, траектория которой показана пунктирной линией на рис. 1, имеет вид [4]:

$$T^2(x) = T^2(0) + \frac{1}{V_{\text{эф}}^2} \cdot X^2, \quad (1)$$

где  $H_{\text{эф}}$  – эффективная мощность слоя от поверхности до полупространства,  $V_{\text{эф}}$  – эффективная скорость звука.

Величина  $V_{эф}$  связана с мощностями и пластовыми скоростями исследуемой слоистой среды соотношением [4]:

$$V_{эф} = \sqrt{V_1^2 \cdot \frac{T_1(X)}{T(X)} + V_2^2 \cdot \frac{T_2(X)}{T(X)}} \quad (2)$$

где  $T_1(X)$  – время, за которое сигнал пройдет сквозь первый слой,  $T_2(X)$  – время, за которое сигнал пройдет сквозь второй слой,  $T(X) = T_1(X) + T_2(X)$  – время пробега волны от поверхности до нижней границы раздела и обратно к приемнику в точке 2.

Соотношения между  $T_1(X)$ ,  $T_2(X)$  и  $T(X)$  легко найти из подобных треугольников:

$$\frac{T_1(X)}{T(X)} = \frac{T_1(0)}{T(0)} = K; \quad (3)$$

$$T_1(X) = \frac{T(X)}{K}; \quad (4)$$

$$T_2(X) = T(X) - T_1(X). \quad (5)$$

Мощность слоя  $H_2$  определяется из уравнения

$$H_2 = V_2 \cdot T_2(0)/2. \quad (6)$$

Рассмотрим методику определения мощности слоя донных осадков ( $H_2$ ) и скорости звука в нем (рис. 1). Для того чтобы определить  $T_1(0)$  и  $T(0)$  ось излучателя необходимо установить перпендикулярно поверхности дна и зафиксировать время прихода отраженных от границ раздела сигналов. Далее ось излучателя перемещается в направлении приемника 2 до тех пор, пока не будет получен сигнал от нижней границы раздела на приемнике 2. Теперь можно определить время  $T(X)$  и измерить расстояние от излучателя до приемника ( $X$ ). Полученные данные подставляются в выражение (1) для определения  $V_{эф}$ . Времена пробега волны  $T_1(X)$  и  $T_2(X)$  определяются из выражений (3–5). Для определения скорости звука в донном грунте ( $V_2$ ) подставим полученные значения в выражение (2). И, зная скорость звука и время пробега волны сквозь слой и обратно, определим мощность слоя осадков по формуле (6).

Предлагаемая методика позволяет сравнительно простым способом определить мощность и скорость звука в слое морских донных осадков. Однако исследование тонких слоев невозможно данным методом из-за ограничений, описанных выше.

Существует альтернативный метод определения скорости в однородном слое, залегающем в разрезе произвольного строения, а также толщины этого слоя. Этот метод не требует предварительных знаний о среде, находящейся над исследуемым слоем [1].

Траектория луча характеризуется фиксированным лучевым параметром  $p$ , получаемым из закона Снеллиуса:

$$p = \frac{\sin \theta(z, p)}{c(z)}, \quad (1)$$

где  $z$  – глубина;  $c(z)$  – профиль скорости звука;  $\theta(z, p)$  – угол между лучом, характеризующим параметром  $p$ , и вертикалью на глубине  $z$ .

Время распространения  $t$  и горизонтальное расстояние  $x$ , соответствующие траектории луча с параметром  $p$ , можно определить через интегралы по траектории луча. На практике величины  $t$  и  $x$  известны для некоторой области значений  $p$ , поэтому полученные уравнения должны быть решены относительно профиля скорости  $c(z)$ .

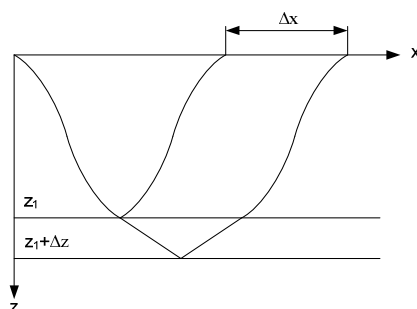


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация метода

Рассмотрим теперь однородный слой, ограниченный горизонтальными отражающими границами на глубинах  $z_1$  и  $z_1 + \Delta z$  (рис. 2); скорость звука внутри слоя обозначим  $c_1$ . Скорость звука над исследуемым слоем зависит только от глубины. Задание лучевого параметра  $p$  полностью определяет ход лучей, отраженных от каждой из границ. В данном случае пара отраженных лучей связана с одним и тем же значением  $p$ . Действительно, над границей слоя с координатой  $z_1$  оба луча всюду параллельны друг другу. Разности времен пробега  $\Delta t$  горизонтальных расстояний  $\Delta x$ , пройденных этими двумя лучами, определяются из уравнений:

$$\Delta t(p) = 2 \int_{z_1}^{z_1 + \Delta z} c^{-1} (1 - p^2 c^2)^{-1/2} dz, \quad (3)$$

$$\Delta x(p) = 2 \int_{z_1}^{z_1 + \Delta z} p c (1 - p^2 c^2)^{1/2} dz, \quad (4)$$

в которые множитель 2 введен для учета полного пути отраженного луча. Если внутри слоя скорость  $c_1$  постоянна, интегралы берутся непосредственно.

Тогда толщина слоя  $\Delta z$  и скорость звука в слое  $c_1$  определяются по формулам:

$$c_1 = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}}, \quad (5)$$

$$\Delta z = \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot \Delta t \cdot \sqrt{1 - p^2 c^2}, \quad (6)$$

где  $\Delta x$  – расстояние между приходом отраженных лучей от верхней и от нижней границы слоя,  $\Delta t$  – время между приходом отраженных лучей от верхней границы слоя.

Из выражения видно, что благодаря выбору определенных лучей, структура среды, находящейся над рассматриваемым слоем, из рассмотрения исключается.

Для реализации данных методов необходима антенна с высокой направленностью низкочастотного луча, отсутствием бокового поля, и возможностью электронного или механического сканирования характеристики направленности. Для более точного определения времен пробега необходимо обеспечить высокую разрешающую способность по дальности. Такие возможности предоставляются при использовании параметрической антенны.

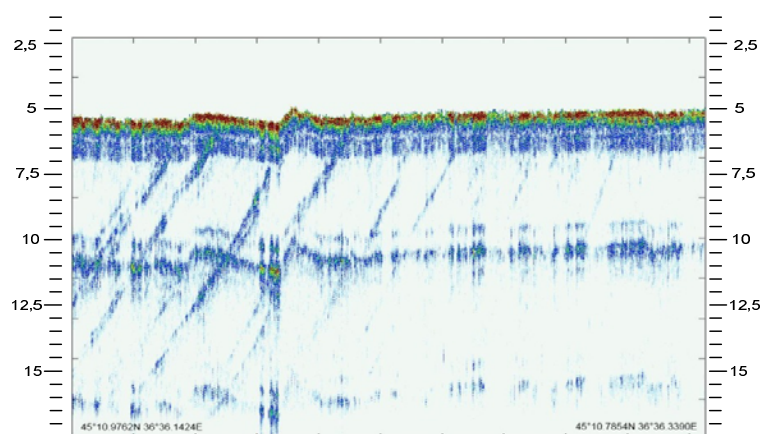


Рис. 3. Профилограмма структуры верхнего слоя донных осадков

На рис. 3 представлена профилограмма участка дна и придонных осадков Черного моря, полученная профилографом при длительности зондирующего импульса 2 мс. Начальная частота разностного (рабочего) линейно-частотно-модулированного сигнала равнялась 7 кГц. Девиация частоты составляла 8 кГц. Разрешение по дистанции составило 10–15 см. Система с такими параметрами позволяет с успехом решать задачи профилирования тонкой структуры верхнего слоя донных осадков и поиска объектов, находящихся в верхнем слое осадков. Глубина профилирования (более 20 м) показывает высокую энергетическую способность профилографа.

Основным достоинством параметрического профилографа является возможность излучать широкополосные сигналы (1–2 октавы) без бокового поля. При этом «озвученный» объем на разных частотах одинаков благодаря свойству постоянства характеристики направленности в широком частотном диапазоне. Таким образом, применение параметрического профилографа позволяет осуществить приведенные выше методы.

Использование технологий гидроакустических исследований с помощью параметрического профилографа позволяет получить сведения о состоянии морского дна на достаточно больших площадях и значительно сократить время проведения мониторинга.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
2. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. – 448 с.
3. Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – 533 с.
4. Хмелевской В.К., Горбачев Ю.И., Калинин А.В., Попов М.Г., Селиверстов Н.И., Шевнин В.А. Геофизические методы исследований. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2004. – 232 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.И. Тимошенко.

**Солдатов Геннадий Валерьевич**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: g.soldatov@gmail.com.

347900, г. Таганрог, пер. Некрасовский, д. 17, кв. 338.

Тел.: +79185886600.

Ведущий электроник.

**Soldatov Gennady Valerevich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: g.soldatov@gmail.com.

17, Nekrasovsky, Apt. 338, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +79185886600.

Electronic.

УДК 534.222

**И.Б. Старченко**

**МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГИДРОСФЕРЫ  
ПРИ ПОМОЩИ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭВОЛЮЦИИ  
ИСКАЖЕНИЙ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ\***

*Рассматриваются методы нелинейной хаотической динамики сложных систем применительно к гидроакустическому сигналу, излученному в реальную морскую среду, прошедшему в ней определённое расстояние и претерпевшему ряд искажений формы, спектрального состава и др. Определены такие нелинейные инварианты как фазовый портрет (аттрактор), максимальный показатель Ляпунова, рекуррентные графики, корреляционная размерность, внедренная размерность. Проведены дополнительные вычисления функции взаимной информации и ближайших ложных соседей. Показано, что в рассматриваемом случае, среда добавляет две степени свободы к исходному сигналу, что нужно учитывать при проектировании устройств обработки информации.*

*Искажение сигнала; степень свободы; хаотическая система.*

**I.B. Starchenko**

**MONITORING AND FORECASTING OF HYDROSPHERE CONDITION  
WITH NON-LINEAR ANALYSIS OF THE DISTORTION'S EVOLUTION  
OF ACOUSTIC SIGNALS IN-SITU**

*This article deals with methods of nonlinear chaotic dynamics of complex systems applied to sonar signals emitted into the real marine environment, passed in it certain distance and has undergone a number of distortions of shape, spectral composition, etc. Such invariants of nonlinear dynamics as phase portrait (attractor), the maximum Lyapunov exponent, recurrence plots, correlation dimension, embedded dimension were defined. Additional calculations of the function of mutual information and false nearest neighbors were performed. It is shown that in the given case, the medium of propagation adds two degrees of freedom to the initial signal that must be considered when designing processing devices.*

*Signal distortion; degree of freedom; chaotic system.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ГК №П1148 от 03.06.2010).