

Г.В. Солдатов, С.П. Тарасов, Т.А. Чаус

**ДИСТАНЦИОННЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДНА
МЕЛКОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ И ШЕЛЬФА МОРЕЙ**

Данная статья посвящена проблеме экологического мониторинга мелководных водоемов. Рассмотрены методы дистанционного определения структуры и состава донного грунта. Предложенная комплексная система, состоящая из гидролокатора бокового обзора и параметрического профилографа, позволяет получить сведения об экологическом состоянии среды на достаточно больших площадях и значительно сократить время проведения экологического мониторинга.

Параметрический профилограф; экологический мониторинг; исследование дна; гидроакустика.

G.V. Soldatov, S.P. Tarasov, T.A. Chaus

**HYDROACOUSTIC METHOD FOR REMOTE ECOLOGICAL SEABED
MONITORING OF SHALLOW WATER AREAS**

The paper is dealing with the problem of ecological monitoring. Methods for remote recognition of seabed sediments were considered. Complex system to obtain ecological parameters of large areas and to reduce time of investigation were proposed.

Parametric chirp; ecological monitoring; seabed research; underwater acoustic.

Обладание примерно пятой частью мировых запасов пресной воды накладывает на нашу страну огромную ответственность за сохранение этого богатства. Современные тенденции изменения экологического состояния внутренних водоемов, а также морской водной среды с учетом непрерывного появления все более и более мощных загрязнителей без преувеличения можно назвать угрожающими, особенно в прибрежных мелководных районах. Как известно, именно в зоне шельфа обитает преобладающее большинство видов морской фауны. В то же время эта зона наиболее интенсивно используется для добычи углеводородных ресурсов. Попадающая в воду нефть образует на поверхности воды пленку, препятствующую проникновению кислорода, и оказывает вредное воздействие на морские организмы. Под действием нефтяного загрязнения у планктонных микроскопических водорослей замедляется темп деления клеток, некоторые виды теряют способность к размножению и погибают. Одной из основных причин загрязнения гидросферы является сброс сточных вод. Не последнее место в числе загрязнителей занимает современное сельское хозяйство по количеству и ассортименту различного рода потребляемых химических веществ. С полей они попадают в реки, а затем в моря. Под влиянием загрязнителей изменяется в худшую сторону биологический состав обитателей водоемов.

Водные бассейны обладают удивительной способностью самоочищаться, в результате чего, благодаря работе бактерий и осаждению на дно, постепенно исчезают вредные примеси, попавшие в воду. Однако запасы прочности, которыми природа наделила большие водоемы, не безграничны.

Необходимо непрерывно следить за процессом опасного загрязнения и своевременно реагировать на него. Одна из идей исследования связана с использованием биоаккумуляции вредных веществ. Поскольку концентрация токсичных ве-

ществ в биоорганизмах иногда увеличивается во много раз, можно, произведя химический анализ, например, мидий, поглощающих токсичные вещества, следить за содержанием последних в воде. Другой подход предполагает контроль состава и характеристик донных осадков, существенно определяющих экологическое состояние водной среды, морей и внутренних водоемов. Этот подход требует разработки технических средств, одними из которых являются гидроакустические, и использования их наряду с другими инструментами экологических исследований.

Гидроакустическая аппаратура такого класса должна позволять не только фиксировать с высоким разрешением состояние, структуру, рельеф дна водоемов, но и получать сведения о свойствах, характеристиках и составе донного грунта.

Для целей экологического мониторинга наиболее удобным и перспективным по многим критериям представляется гидроакустический комплекс, в состав которого входит гидролокатор бокового обзора (правого и левого борта) и параметрический профилограф.

Высокоточный гидролокатор бокового обзора с линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом позволяет за счет «ножевидной» характеристики направленности получать панорамное изображение дна с находящимися на его поверхности неровностями и объектами [1]. Параметрический профилограф, принцип действия которого основан на нелинейном взаимодействии акустических волн, дает возможность изучить с высоким разрешением структуру донных осадков и получить сведения о характере донного грунта [2]. С помощью параметрического профилографа, в принципе, можно «прозвучить» донные осадки на значительную глубину, однако для решения экологических задач вполне достаточно стратификации верхней кромки осадочного чехла, но необходимо иметь возможность классификации донных структур.

Методы классификации донных осадков могут быть основаны как на физической модели отражения, преломления, рефракции волн в слоистой среде, так и на выделении статистических параметров из акустических сигналов. При прохождении акустических колебаний через осадочные слои изменяются спектральные характеристики сигнала в зависимости от типа осадков, что позволяет на основе анализа изменения огибающей сигнала определять морфологические параметры среды.

Акустический импеданс приповерхностного слоя донных осадков можно определить по амплитудным коэффициентам отражения. Методика основана на эмпирически установленной зависимости импеданса от коэффициента отражения и литологии морских осадков. По коэффициенту отражения

$$R = (\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1) / (\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)$$

от границы вода-дно и импедансу морской воды $z_1 = \rho_1 c_1$ можно вычислить импеданс в поверхностном слое морских осадков:

$$z_2 = \rho_2 c_2 = \rho_1 c_1 (1+R)/(1-R).$$

Импеданс воды определяется из гидрологических данных.

Скорость звука в донных осадках может быть определена по критическим углам отражения. При падении волны на границу раздела под критическим углом коэффициент отражения достигнет максимального значения $R=1$ вне зависимости от типа осадков и различий акустических импедансов, т.е. происходит полное отражение падающей акустической энергии в верхнее полупространство с образованием головной волны, распространяющейся вдоль границы раздела [3]. Зная критический угол $\alpha_{кр}$ и скорость звука в воде c_1 , можно определить скорость звука в донных осадках

$$c_2 = c_1 / \sin \alpha_{кр}$$

Свойства донных осадков могут быть определены по характеру поглощения акустических волн. Затухание в морском грунте можно описать, разбив энергетические потери на две существенно различные группы. В первую группу входят потери, связанные с диссипацией в минеральном скелете грунта, в другую – потери, связанные с вязкостью воды, движущейся относительно скелета [4].

Коэффициент поглощения можно представить в виде

$$\alpha = k \cdot f^n.$$

В гранулированных осадках, таких, как песок и алевролит, потери первого типа обусловлены главным образом трением на контактах зерен и пропорциональны f . В осадках с более мелкими частицами (глина, илистые глины) потери объясняются рядом процессов, зависящих от скорости смещения и обусловленных электрохимической связью между частицами, и пропорциональны f^2 на низких частотах и $f^{1.5}$ на высоких. Определив частотную зависимость коэффициента поглощения, становится возможным определение структуры морских осадков.

Свойства морского грунта можно определить на основе анализа энергетического спектра эхо-сигналов. До отражения от акустически жесткой границы сигнал проходит через акустически мягкие границы осадочных слоев. Из-за малого различия в ρc слоистого дна отражения практически не происходит, и поэтому регистрация структуры стандартными методами невозможна. Однако изменяются спектральные характеристики прошедшего через слои сигнала. Структура и состав осадочных слоев оказывает значительное влияние на форму энергетического спектра эхо-сигнала. Исследование характеристик спектральной плотности сигнала, а именно ширины, асимметрии и других характеристик спектра, позволит получить признаки для классификации морского дна. Применение спектральных моментов позволит классифицировать осадочный слой на пески, глину и ил с точностью до 90 % [5]. Однако при переходе к анализу в частотной области происходит потеря информации. Избежать этого позволяет применение вейвлет-анализа. По энергии коэффициентов вейвлет-преобразования, найденных в разных масштабах, возможна классификация морского дна с точностью до 98 % [6].

Классификацию осадков методом отраженных волн при наклонном падении луча можно осуществить, если положить, что скорость звука над исследуемым слоем зависит только от глубины. В этом случае траектория луча характеризуется фиксированным лучевым параметром p , из закона Снеллиуса получаем:

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

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

Тогда толщина слоя Δz и скорость звука в слое c_1 определяются по формулам [7]

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

где Δx – расстояние между приходом отраженных лучей от верхней и от нижней границы слоя, Δt – расстояние между приходом отраженных лучей от верхней границы слоя.

Перечисленные методы вполне могут быть реализованы с использованием рассматриваемого комплекса, в составе которого – гидролокатор бокового обзора и параметрический профилограф. Широкий диапазон излучаемых частот и большой диапазон углов излучения акустических волн относительно поверхности дна и осадочных слоев дает возможность использования комплекса для исследования дна в интересах экологического мониторинга.

Принципиальным недостатком обычных широкополосных профилографов является то, что на разных частотах они озвучивают различный объем среды, в результате чего физические характеристики грунтов, определяемых по отраженным сигналам, в общем смысле, не сопоставимы, так как соответствуют различным объемам осадков.

В отличие от них параметрические профилографы озвучивают один и тот же участок в пределах узкого луча, одинакового на всех частотах разностного низкочастотного сигнала, обеспечивая наибольшее пространственное разрешение и достоверность измеряемых параметров.

Применение параметрических антенн позволяет за счет их широкополосности, высокой направленности, низкого уровня бокового поля существенно увеличить отношение сигнал/помеха в сложной помеховой обстановке, повысить информативность и получить дополнительные признаки для распознавания.

Основным элементом параметрической антенны является антенна накачки, представляющая собой антенную решетку, состоящую из двух подрешеток из элементов с разными резонансными частотами. Подрешетки вставлены друг в друга так, что элементы располагаются в порядке чередования типов. На рис. 1 представлена антенна накачки круглой формы параметрического профилографа. Вокруг антенной решетки располагается приемная антенна в форме кольца. Обе антенны помещены в обтекатель.

На рис. 2 представлена характеристика направленности параметрической антенны на разностных частотах 7, 12, 14, 20 кГц. Уровень бокового поля не превышает 40 дБ.

Для иллюстрации возможности применения параметрических антенн в экологических исследованиях ниже приводятся примеры использования параметрического профилографа с широкополосными сигналами при проведении мониторинга морских донных осадков. Параметрический профилограф излучает сигналы накачки на частотах накачки 130 и 150 кГц. Диапазон разностных частот составляет 7–20 кГц, ширина характеристики направленности составляет 3° и практически постоянна на всех разностных частотах. Высокая направленность параметрических приборов при излучении низких, хорошо проникающих в грунт частот, позволяет добиться хорошего разрешения и за счет этого получить детальную информацию об изучаемом участке.

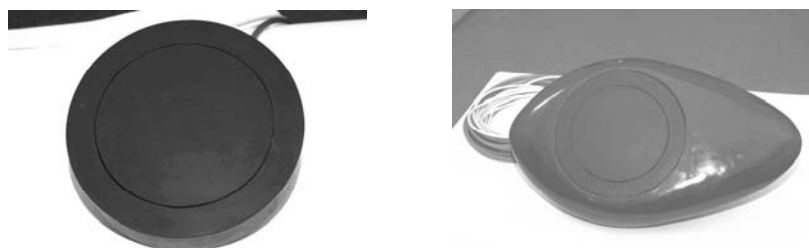


Рис. 1. Антенна накачки параметрического профилографа

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.

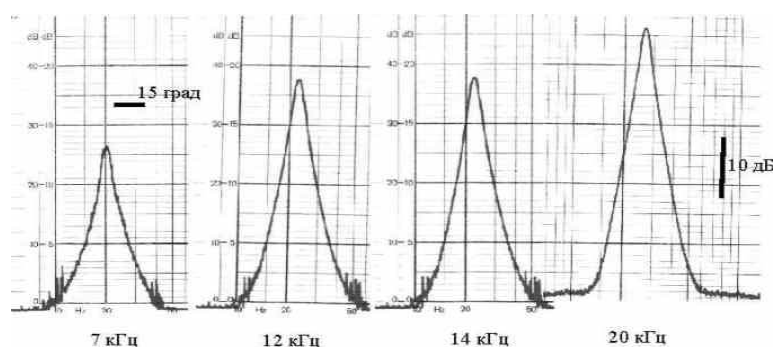


Рис. 2. Характеристики направленности параметрической антенны на разностных частотах 7, 12, 14 и 20 кГц

Анализ профилограммы показывает, что использованные параметры обеспечили разрешение по дистанции 10 – 15 см, что существенно для разрешения тонкой структуры верхнего слоя донных осадков и поиска объектов, находящихся в верхнем слое осадков. Глубина профилирования (более 20 м) показывает высокую энергетическую способность профилографа. Увеличение длительности импульса без изменения мощности приведет к увеличению дистанции зондирования слоев, а увеличение девиации частоты – к увеличению разрешающей способности профилографа по дальности. Результаты использования параметрических антенн для экологического мониторинга описаны нами в [8].

В представленном комплексе был использован гидролокатор бокового обзора с широкополосным сигналом в виде импульса с линейной частотной модуляцией [1]. Частоты, на которых работает гидролокатор бокового обзора, составляют 240 и 290 кГц. Длительность импульса может изменяться от 30 мкс до 7 мс. Девиация частоты составляет 16 и 32 кГц. Ширина характеристики направленности антенны в горизонтальной плоскости составляет 1 градус, и эта величина определяет разрешение локатора по углу, а в вертикальной плоскости ширина характеристики направленности составляет 42 градуса. Эта величина определяет полосу обзора локатора. Минимальное разрешение по дистанции составляет 2,5 см и зависит от длительности импульса при работе тональным сигналом или от девиации частоты при работе ЛЧМ-сигналом с последующим его сжатием.

На рис. 4 приведена эхограмма участка дна Черного моря в районе, для которого сделан профиль осадков, показанный на рис. 3.

Запись сделана на частоте 240 кГц с длительностью импульса 8 мс и девиацией частоты 32 кГц. На эхограмме видна структура дна. Приведенная эхограмма показывает высокую разрешающую способность гидролокатора бокового обзора по угловым координатам и по дистанции и позволяет судить о возможности его использования для проведения экологического мониторинга дна. Метод профилирования донных осадков с целью экологического контроля может представлять собой комплексное исследование акватории с помощью контактных и дистанционных методов.

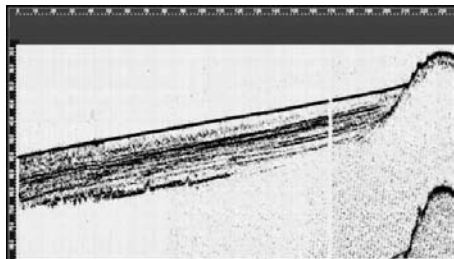


Рис. 3. Профилограмма структуры верхнего слоя донных осадков. Геленджик. Черное море

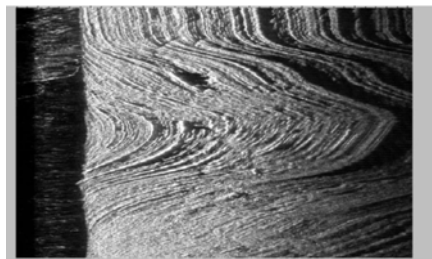


Рис. 4. Эхограмма участка дна Черного моря

Исследуемая площадь покрывается сеткой галсов судна, на борту которого установлена аппаратура гидролокаторов бокового обзора и параметрического профилографа с приемоизлучающей антенной системой, направленной в сторону дна. В результате исследований должна быть получена своеобразная карта дна исследуемого района в виде панорамы дна и вертикальных разрезов, которая позволит оценить структуру, тип, состав донных осадков и определить их изменчивость.

Исходя из этого, в определенных местах (количество точек определяется периодом изменчивости структуры дна) берутся пробы донного грунта с помощью геологических трубок, которые подвергаются подробному физико-химическому анализу.

Анализ физических свойств осадков проводится как на основе исследований акустических характеристик посредством обработки эхо-сигналов на ЭВМ, так и путем прямого анализа свойств проб грунта.

Использование технологий гидроакустических исследований с помощью параметрического профилографа позволяет получить сведения об экологическом состоянии среды на достаточно больших площадях и значительно сократить время проведения экологического 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., Ходотов А.В., Скнар А.В., Тарасов С.П., Трусилов В.Т. Использование гидролокатора бокового обзора со сложным сигналом для экологического мониторинга дна и инженерных подводных сооружений // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Экология 2004 – море и человек»: Материалы Третьей Всероссийской конференции с международным участием. – Таганрог: ТРТУ, 2004. №5 (40). – С. 80-82.
3. Орленок В.В. Морская сейсмоакустика: Учеб. пособие. – Калининград: Калининград. ун-т, 1997. – 150 с.
4. Ховем Е.М. Поглощение звука в морских осадках. Акустика дна океана. – М.: Мир, 1984. – 454 с.
5. J. Te. gowski, Z. Łubniewski : Seabed Characterization Using Spectral Moments of the Echo Signal. *Acoustica / Acta Acoustica* 88 (2002). P.623-626.

6. L. Atallah, P.J. Probert Smith: Using Wavelet Analysis to Classify and Segment Sonar Signals Scattered from Underwater Sea Beds.
7. Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – 533 с.
8. 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.

Тарасов Сергей Павлович

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

E-mail: tarasov@fep.tsure.ru

347900, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Мариупольское шоссе, д.27, кв.60

Телефон: 8(8634) 31-06-35

Заведующий кафедрой электрогидроакустики и медицинской техники

Солдатов Геннадий Валерьевич

E-mail: g.soldatov@gmail.com

Чаус Татьяна Александровна

E-mail: damndest@gmail.com

Tarasov Sergey Pavlovich

Taganrog Institute of Technology - Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"

E-mail: tarasov@fep.tsure.ru

347900, Russia, Rostov areas, Taganrog, Mariupolskoe shosse, 27, 60, Ph.: 8(8634)31-06-35

Soldatov Gennady Valerevich

E-mail: g.soldatov@gmail.com

Chaus Tatiana Aleksandrovna

E-mail: damndest@gmail.com

УДК 53.06

С. Б. Наумов, В. Ф. Смирнов, П. А. Волков, Л. В. Губко

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПОДВОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В докладе рассмотрена зависимость разницы во времени приёма сейсмической волны, а также зависимость электромагнитной волны от расстояния до эпицентра. Установлено, что физический процесс, вызывающий фоноки и генерирование электромагнитной волны, протекает в эпицентре примерно за десятки часов – до нескольких часов перед землетрясением.

Предвестники землетрясения; энергия сейсмических волн; электромагнитная волна; краткосрочный прогноз.

S.B. Naumov, V.F. Smirnov, P.A. Volkov, L.V. Gubko

THE SHORT-TERM FORECAST OF UNDERWATER EARTHQUAKES

In the report dependence of a difference in time of reception of a seismic wave, and also an electromagnetic wave from distance up to an epicentre is considered. It is estab-