

Degtyarov Vladimir Pavlovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: dvp777@mail.ru; 2, Shevchenko street, k. E, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371795; phone/fax: +78634310635; competitor; deputy of director on Science CB «Vector».

Minina Marina Vissarionovna – Russian State Hydrometeorological University; e-mail: m-minina@yandex.ru; 14-16, Markin street, of. 42, Saint-Petersburg, 197198, Russia; phone/fax: +78124984227; fax: +78123719257; phone: +79216321186; can. of eng. sc.; associate professor; senior lecturer of Scientific Secretary of the Arctic Public Academy of Sciences.

Mit'ko Valery Bronislavovich – e-mail: vmitko@yandex.ru; vmitko@ArcticAS.ru; 22, Iskrovskiy pr., of. 175, Saint-Petersburg, 193168, Russia; phone: +79213944397, fax: +78123719257; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.883.072

А.Н. Куценко, Д.С. Слуцкий

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Решается задача экологического контроля донных осадков путем дистанционного измерения их акустического импеданса. Применяемые сейчас методы экологического мониторинга донных осадков чаще всего представляют собой совокупность механических методов забора проб грунта в виде керна и дистанционных гидроакустических методов отслеживания динамики изменения свойств донных осадков. Предлагается метод дистанционного измерения акустического импеданса донных осадков путем определения модового состава акустических волн при помощи расчета и анализа двумерного пространственного спектра акустического поля в мелком море, представляющем собой гидроакустический волновод.

Гидроакустика; пространственный спектр; моды; грунт; экологический мониторинг.

A.N. Kutsenko, D.S. Slutskiy

**THE EFFICIENCY INCREASING OF HYDROACOUSTICS FACILITIES
BY USING MULTIVARIATE FUNCTION FOR THE ECOLOGICAL
MONITORING PROBLEMS**

The problem of the bottom sediments ecological monitoring by way of the remote measurement their acoustic impedance is decided in this article. Methods now used for environmental monitoring of bottom sediments often are a combination of mechanical methods of sampling the soil in the form of core and remote hydroacoustic methods for tracking the dynamics of changes in the properties of bottom sediments. Propose a method for remote measurement of the acoustic impedance of the sediments by determining the mode of acoustic waves through the calculation and analysis of two-dimensional spatial spectrum of the acoustic field in shallow water, which is a hydro-acoustic waveguide.

Hydroacoustic; spatial spectrum; modes; soil; ecological monitoring.

В настоящее время существует проблема определения состава донных осадков. Достоверная и точная информация о материале грунта необходима при экологическом мониторинге прибрежных акваторий, при строительстве различных гидротехнических сооружений (дамбы, плотины, гидроэлектростанции, мосты), при прокладке глубоководных кабелей, нефте- и газопроводов, а также при поиске полезных ископаемых, расположенных в толще донного грунта, в первую очередь, нефти. Последнее особенно актуально в связи с перспективой освоения шельфа Северного Ледовитого океана.

Хозяйственная деятельность человека приводит к постоянному загрязнению окружающей среды нефтью и нефтепродуктами, промышленными отходами, сточными водами. Оценка степени загрязнения донных осадков в реках и прибрежных акваториях обычными методами представляет собой трудоемкий процесс, вследствие того, что для определения материала и степени загрязнения образцы донного грунта собираются механически. Такой способ сбора информации трудоемок и затратен, а при больших глубинах невозможен. Для устранения этих недостатков необходима система дистанционного определения материалов донных осадков. Наиболее часто подобные задачи решаются с помощью гидроакустических средств. Характерным признаком, позволяющим провести такую классификацию, может служить импеданс донных осадков.

Применяемые сейчас методы экологического мониторинга донных осадков чаще всего представляют собой совокупность механических методов забора проб грунта в виде керна и дистанционных гидроакустических методов мониторинга. При механическом заборе составляется сетка галсов судна, в узлах которой и производится забор проб донных осадков. Такой метод не позволяет точно оценить экологическую обстановку ввиду того, что заборы проб покрывают исследуемую область слишком крупной сетью. Поэтому необходимы дистанционные методы для отслеживания динамики изменения структуры и состава донных осадков. Тогда как механические методы хорошо известны и описаны, дистанционные методы отличаются большим разнообразием.

В настоящее время существует несколько методов дистанционного определения материалов донных осадков. Первый основан на измерении амплитудного коэффициента отражения от границы раздела, контактно или дистанционно. Методика основана на эмпирически установленной зависимости акустического импеданса от коэффициента отражения и литологии морских осадков в пределах первых нескольких метров от поверхности дна, откуда производился массовый отбор проб грунта. Импеданс морских осадков определяется по выражению

$$\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1 \left(\frac{1+R}{1-R} \right). \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет по коэффициенту отражения R от границы вода–дно и импедансу морской воды $z = \rho_1 c_1$ находить импеданс в поверхностном слое морских осадков. Импеданс морской воды z определяется из гидрологических данных, по океанологическим таблицам или из атласов. Вычисления коэффициентов отражения можно производить по одно- и двукратно отраженному от дна импульсу эхолота [1].

Также существует метод определения импеданса донных осадков по спектральным коэффициентам отражения. Он основан на том, 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 ($h/\lambda < 2$). При наличии тонкого слоя спектральный коэффициент отражения будет представлять собой квазипериодическую функцию частоты и характеризоваться серией максимумов и минимумов. По экстремальным значениям коэффициента отражения можно вычислить импеданс данного тонкого слоя [2].

Также существуют методы определения импеданса донных осадков по коэффициенту поглощения акустических волн в них. Анализ затухания волн с глубиной позволяет получить сведения о поглощающих свойствах среды, знание кото-

рых может оказать существенную помощь при определении коэффициента отражения на отдельных границах. В качестве зондирующего сигнала применяется либо достаточно длинная последовательность импульсов, как в методе отраженных волн, либо широкополосный сигнал. В последнем случае при излучении в грунт широкополосного сигнала ослабление сигнала в грунте будет неравномерным на разных частотных составляющих излученного сигнала. Таким образом, путем восстановления закона затухания акустического сигнала в грунте можно определить коэффициент затухания звука в грунте. Зная коэффициент затухания и скорость звука в грунте, можно оценить его акустический импеданс, что позволит провести классификацию исследуемого слоя донных осадков [3].

Известны также способы измерения акустического импеданса резонансными методами, основанными на исследовании распространения и взаимодействия акустических волн на различных частотах при волноводном распространении звука. Одним из таких методов является возбуждение в волноводах нормальных волн с разными номерами и анализ их поперечного распределения, которое напрямую зависит от импеданса границ волновода. Для оценки импеданса донных осадков по поперечному амплитудному распределению необходимо определить модовый состав распространяющихся в мелком море волн и их поперечные волновые числа. Применение подобного подхода ранее было затруднено тем, что мелкое море, как правило, имеет очень много помех, затрудняющих определение поперечного распределения давления.

Из литературы известно, что при распространении акустических волн в волноводе волны в слое можно рассматривать как суперпозицию плоских волн, распространяющихся под углами к оси волновода [4]. Это означает, что направление волнового вектора не совпадает с направлением распространения волны в волноводе. Причем вертикальная составляющая волнового вектора k_z может принимать только определенные дискретные значения, определяемые типом границ волновода. Для определения направления волнового вектора в мелком море предлагается использовать анализ двумерного пространственного спектра акустического поля в волноводе [5, 6]. Данный метод позволяет определять направление волнового вектора путем анализа пространственного распределения давления акустического поля даже в условиях малых отношений сигнал/помеха, поскольку двумерный спектр нормального шума равен нулю.

Для подтверждения возможности практического применения метода определения модовой структуры поля в волноводе при помощи двумерного пространственного спектра были использованы экспериментальные данные, полученные на кафедре электрогидроакустической и медицинской техники ТРТУ на трассе Азовского моря [7].

Для снятия поперечного распределения амплитуды давления в волноводе была использована вертикальная антенная решетка из шести гидрофонов, расположенных на расстоянии 0,5 м друг от друга. Верхний гидрофон был заглублен на 0,25 м. Глубина моря в месте проведения испытаний составляла 3 м. Испытания проводились на частотах 13 и 20 кГц при разных углах излучения относительно оси волновода, что позволяло проводить селективное возбуждение разных мод и на разных расстояниях от излучателя. В качестве излучателя применялась параметрическая антенна.

Примеры вертикальных распределений, полученных экспериментально, приведены на рис. 1.

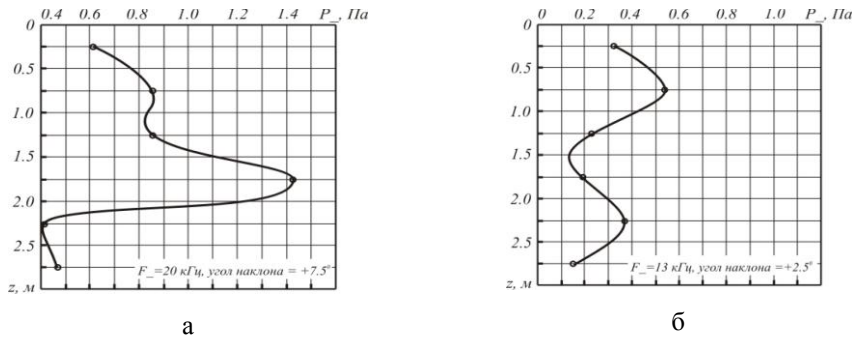


Рис. 1. Экспериментально полученные вертикальные амплитудные распределения для частоты излучения 20 кГц и угла наклона $+7,5^\circ$ (а), частоты излучения 13 кГц и угла наклона $+2,5^\circ$ (б)

Для того чтобы определить модовую структуру поля в волноводе необходимы значения k_x и k_z . Но поскольку известно, что в данном эксперименте целенаправленно возбуждались низшие моды колебаний, можно принять $k_x=k$. Данное приближение обусловлено тем, что на низших модах отклонение волнового вектора от оси волновода незначительно, следовательно, k_z мало по сравнению с k_x . Тогда выражение для анализируемого поля в волноводе примет вид

$$P(x, z) = P_{-}(z) \cdot \exp(-i \cdot k \cdot x), \quad (2)$$

где $P_{-}(z)$ – экспериментально полученное поперечное распределение давления в волноводе. Поскольку исходные экспериментальные данные носят дискретный характер, тогда как для расчетов необходимо непрерывное распределение, то для получения зависимости $P_{-}(z)$ была применена сплайновая интерполяция. Из полученного дискретного поля был рассчитан двумерный пространственный спектр по формуле [5]

$$B_{q_1, q_2} = \frac{1}{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{L-1} P_{n,m} \cdot \exp\left(\frac{-i \cdot 2 \cdot \pi}{L-1} \cdot (n \cdot q_1 + m \cdot q_2)\right). \quad (3)$$

На рис. 2 приведены рассчитанные пространственные спектры (рис. 2,а,в) и их сечения (рис. 2,б,г) для распределений давления, приведенных на рис. 1.

На рис. 2,б,г видно, что в каждом случае имеется несколько максимумов с разными амплитудами, т.е. в каждом случае в волноводе возбуждались несколько мод колебаний с разными амплитудными соотношениями. Номера возбуждаемых мод могут быть определены по соответствию углов и номеров мод, поскольку каждой моде соответствует определенный угол.

Для проверки точности определения модовой структуры поля в волноводе для поперечных распределений давления, приведенных на рис. 1, по полученным данным были рассчитаны поперечные распределения по выражению

$$p(x, z) = \sum_i A_i \cdot \cos(k \cdot \sin(\alpha_i) z), \quad (4)$$

где A_i , α_i – измеренные значения амплитуд и углов.

Из рис. 3 приведены экспериментальные (пунктирная линия) и восстановленные предлагаемым методом (сплошная линия) поперечные распределения давления в волноводе для разных исходных распределений давления.

На рис. 3 показано, что исходные и рассчитанные амплитудные распределения имеют достаточно высокую степень совпадения, это позволяет говорить о правильности предлагаемого метода определения модовой структуры поля в волноводе.

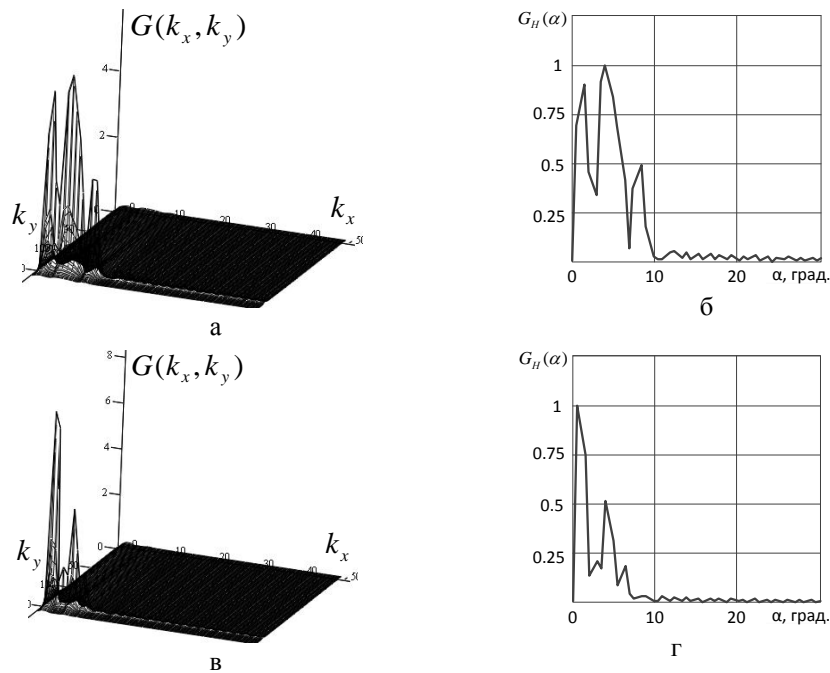


Рис. 2. Пространственные спектры и их сечения для распределений давления, полученных для частоты излучения 20 кГц и угла наклона $+7,5^\circ$ (а, б), частоты излучения 13 кГц и угла наклона $+2,5^\circ$ (в, г)

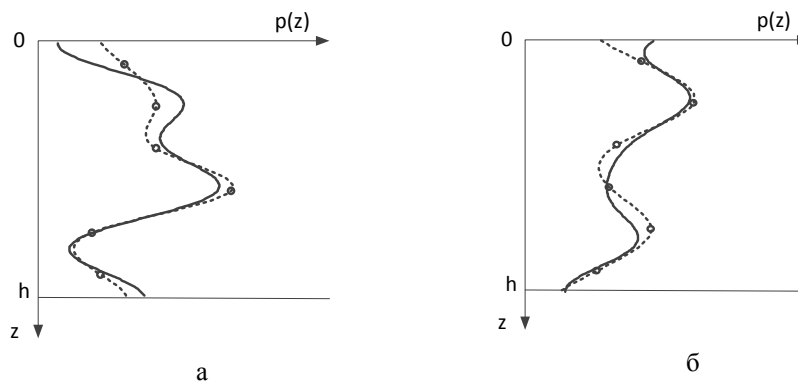


Рис. 3. Экспериментальные (пунктирная линия) и восстановленные (сплошная линия) поперечные распределения в волноводе для распределений давления, полученных для частоты излучения 20 кГц и угла наклона $+7,5^\circ$ (а), частоты излучения 13 кГц и угла наклона $+2,5^\circ$ (б)

Таким образом, предлагаемый метод является достаточно точным инструментом оценки модового состава акустического поля в мелком море и, как следствие, хорошим инструментом для дистанционной оценки импеданса донных осадков. Созданные на основе данного метода гидроакустические средства могут и должны входить в состав комплексного оборудования судов, проводящих экологический мониторинг прибрежных акваторий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орленок В.В. Морская сейсмоакустика: Учеб. пособие.– Калининград: Калининград. ун-т, 1997.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973
3. Слуцкий Д.С., Куценко А.Н. К вопросу о классификации донных осадков в целях экологического мониторинга прибрежных акваторий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 6 (96). – С. 96-103.
4. Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978.
5. Слуцкий Д.С., Куценко А.Н. Использование многомерных спектральных функций в гидроакустических системах поиска полезных ископаемых // Сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011». Т. 4. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2011. – С. 28-31.
6. Волощенко А.П., Куценко А.Н., Резниченко А.А., Слуцкий Д.С. Исследование характеристик акустических и биомедицинских сигналов для создания диагностической и гидроакустической аппаратуры // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 1 (138). – С. 20-26.
7. Кравчук Д.А., Куценко А.Н. Экспериментальные исследования модового распределения сигнала в мелком море // Сб. тр. «Нелинейная гидроакустика». – Таганрог, ТРТУ, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Слуцкий Дмитрий Сергеевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: sdiman85@mail.ru; г. Таганрог, ул. Розы Люксембург, 175; тел.: 89185101935; ассистент.

Куценко Александр Николаевич – e-mail: kan1208@mail.ru; г. Таганрог, ул. Октябрьская, 18/1, кв. 46; тел.: 88634311132; к.т.н.; доцент.

Slutsky Dmitry Sergeevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: sdiman85@mail.ru; 175, Roza Luxemburg street, Taganrog, Russia; phone: +79185101935; assistant professor.

Kutsenko Aleksandr Nikolaevich – e-mail: kan1208@mail.ru; 18/1-46, Oktyabrskaya street, Taganrog, Russia; phone: +7634311132; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.37.1:519.21

С.В. Горовой

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ РАЙОНОВ**

Рассматриваются вопросы, связанные с использованием оценок трехмерных корреляционных функций (КФ) для экологического мониторинга. Обсуждаются вопросы выбора полосы частот и времени накопления при оценивании КФ. Приведены результаты оценивания двумерных и трехмерных КФ гидроакустических шумов в заливе Петра Великого Японского моря в диапазоне частот 4–5 кГц при времени накопления 3 с. Проанализирована их временная изменчивость. Показано, что анализ трехмерных КФ позволяет выявлять особенности подводного шума, малозаметные при анализе двумерных КФ, которые могут быть использованы для обнаружения изменений структуры шума в автоматическом режиме. Это может оказаться полезным при решении задач экологического мониторинга и обработки гидроакустических сигналов без участия человека-оператора.

Экологический мониторинг; шумы моря; многомерные корреляционные функции; обработка гидроакустических сигналов