

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ В ЗАДАЧАХ АКУСТИКИ ШЕЛЬФА И КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА

Л. Н. ЗАМАРЕНОВА, М. И. СКИПА, А. С. ТИТЯПКИН

*Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института
НАН Украины, г. Одесса*

The characteristic sea bottom model types of the Ukrainian shelf and continental slope of the Black Sea are determined. The impedance boundary conditions for corresponding characteristic sea bottom types of shelf included in boundary problem in terms of normal mode theory are described. The example of calculation results of sound field ray structure for the sea bottom model of continental slope with arbitrary bottom profile is presented.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективными методами решения проблем освоения сырьевых и рекреационных ресурсов шельфа и континентального склона Черного моря являются акустические методы. Одним из направлений их развития является углубление знаний о свойствах дна, в частности, применительно к краевым задачам. Хотя типы граничных условий хорошо известны, существуют и сложности описания поведения границы сред [1, 2]. Поведение границы водного слоя с дном зависит от поля скорости звука в водном слое, свойств дна как жидкого или упругого тела, геометрии границы. В разных задачах акустики используются различные частоты, от которых также зависит поведение нижней границы.

Трудности описания нижней границы волновода возникают уже на этапе создания геоакустической модели дна. Данных о свойствах дна часто бывает недостаточно, но и имеющиеся данные могут определять слишком сложную модель дна для теоретического представления звукового поля. Геоакустическая модель дна лишь приближенно отражает свойства нижней границы волновода, а сами граничные условия являются моделями границ, существующих в реальных условиях, и могут быть настолько сложными, насколько это допускают априорные данные о свойствах дна и возможности решения краевой задачи. Геоакустические модели украинского шельфа, некоторые вопросы их адекватности рассмотрены в работах [3–7]. Дно континентального склона исследовалось и раньше [8], а в последнее время – при исследованиях метановых сипов [9]. Краевые задачи в модовом представлении с различными граничными условиями, характерными для шельфа, решены при параллельности границ волновода [1, 10–12] и в частных случаях неоднородной геометрии нижней границы [10, 13–16]. Численное решение задач распространения звука в волновом представлении по-прежнему неэффективно для высоких частот и глубокого океана, ограничено отдельными случаями неоднородной геометрии границ и свойств дна [17]. Численные модели учитывают зависимость от расстояния свойств водной среды и дна в представлении нормальных мод («Coupled», «Snap», «Kraken», «Prosim») и лучевой акустики («Bellhop», «Rayson») [17, 18]. Для акустики украинского шельфа и континентального склона вопросы обобщения типов дна и граничных условий, численное моделирование распространения звука, в том числе в лучевом приближении при произвольном профиле дна остаются актуальными.

Целью данной работы является определение характерных типов моделей дна, геометрического положения границ волновода в украинской зоне шельфа и

континентального склона, описание условий на нижней границе для выделенных типов моделей дна для краевых задач, решение которых известно, представление результатов численного моделирования лучевой структуры для случая произвольного профиля дна.

СВОЙСТВА ДНА ШЕЛЬФА И КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА

В результате анализа информации о составе осадочных слоев, физических свойствах и стратификации дна украинского шельфа, об уклоне и составе пород дна континентального склона [3–5, 8, 9] выделены характерные типы геоакустических моделей этих зон с целью определения граничных условий.

Введем обозначения характеристик дна: $c_L^* = c_L \cdot (1 - i\eta_L)$, η_L – скорость продольных волн и коэффициент их поглощения, соответственно; $c_T^* = c_T \cdot (1 - i\eta_T)$, η_T – скорость сдвиговых волн и коэффициент их поглощения, соответственно; ρ_b – плотность материала дна. Под эффективным значением скорости звука будем понимать значение, характерное для верхнего слоя осадков с волновой толщиной $\sim 2\lambda$ (примем $\lambda \approx 3$ м).

Выделены четыре характерных типа геоакустических моделей дна. Первые три типа представляют шельф. Для акустики шельфа важно знание акустических свойств дна и геометрии границ волновода. Дно северо-западного шельфа имеет слабый уклон в южном направлении. Численные исследования для идеализированных граничных условий показали, что при малых наклонах дна обменные процессы между модами выражены слабо [10, 13, 14]. Поэтому на северо-западном шельфе допустима аппроксимация границ параллельными плоскостями. Модели дна I и II типа аппроксимируют верхний слой неконсолидированных осадков, представленных в основном илами различного типа, глинами и ракушечниками с детритовым материалом. Модель I типа – жидкое однородное поглощающее полупространство. Эффективные значения $c_L = (1470–1550) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $\eta_L = (0,001–0,027)$, $\rho_b = (1,24–2,04) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Модель II типа – вертикально стратифицированные жидкие однородные поглощающие слои, лежащие на жидком полупространстве. Значения скорости звука в слоях – те же, что и для модели I типа. Модель дна III типа аппроксимирует верхний слой полуконсолидированных осадков, представленных песками, ракушечниками, известняками, галькой. Модель дна III типа – упругое полупространство. Эффективные значения: $c_L = (1610–2300) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $\eta_L = (0,001–0,01)$; $c_T = (188–205) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и более, η_T на порядок больше η_L ; $\rho_b = (1,6–2,15) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

В зоне континентального склона встречаются мелководные осадки, галька, отсутствие современных отложений [8, 9]: $c_L = (1500–2300) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $\eta_L = (0,001–0,01)$; $c_T = (200–760) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, η_T на порядок больше η_L ; $\rho_b = (1,6–2,15) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Импедансные свойства дна в виде осадочного или упругого слоя легко учесть. Принципиально важным является положение нижней границы относительно верхней, что и примем в качестве критерия для описания этой модели. Модель дна IV типа – волновод переменной глубины, $H(r)$ (здесь r – расстояние, H – глубина моря). Учитывая особенности рельефа континентального склона (изрезанность, расчленение на ступени и др.) [8], выберем зависимость $H(r)$ произвольной.

В одних задачах акустики шельфа необходимо использование волнового подхода к описанию звукового поля, в других – метода лучевой акустики. Граничные условия для

волновода с плоскопараллельными границами на шельфе могут быть включены в краевую задачу Штурма-Лиувилля. Если геометрия границ волновода неоднородна, задачу можно реализовать в рамках лучевого приближения, в волновой же акустике это вызывает большие трудности даже для идеализированных случаев. Таким образом, характерные типы дна отличаются разнообразием, так же различны и граничные условия, которые относятся к классу импедансных. Обратимся к граничным условиям, соответствующим характерным типам моделей дна.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ШЕЛЬФА И КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА

Для описания звукового поля в морской среде используется волновой и лучевой метод. В условиях шельфа могут быть использованы оба метода, что зависит от частоты источника звука, для континентального склона эффективен лучевой метод.

В случае цилиндрической симметрии волновое поле точечного гармонического источника, излучающего волну круговой частоты ω , описывается скалярной функцией $\Phi(r, z, t) = \Phi(r, z) \exp(-i\omega t)$, удовлетворяющей уравнению Гельмгольца [10]:

$$\Delta \Phi(r, z) + k^2 \Phi(r, z) = 0, \quad k = \omega / c(r, z), \quad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа;

$$r^2 = x^2 + y^2;$$

k – волновое число;

$$\omega = 2\pi f, \quad f – \text{частота};$$

$c(r, z)$ – скорость звука в водном слое.

Здесь Φ – потенциал скорости.

В акустике шельфа широко используется теория нормальных мод, основанная на применении функции Грина. Модель волновода представим в виде водного слоя $0 \leq z \leq H$ со скоростью звука $c(z)$ и плотностью ρ_w , лежащего на полупространстве, свойства которого аппроксимируют свойства дна. Функция Грина удовлетворяет уравнению Гельмгольца (1) во всех точках, кроме точки (r, z_0) , в которой находится источник [10, 11]:

$$\Phi(r, z, z_0) = \frac{V}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(z, z_0, \xi^2) \xi H_0^{(1)}(\xi r) d\xi, \quad (2)$$

где V – объемная колебательная скорость источника;

ξ – спектральный параметр;

$H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля.

Функция $G(z, z_0, \xi^2)$ – это функция Грина дифференциальной краевой задачи Штурма-Лиувилля:

$$\begin{aligned} \psi''(z) + (\omega^2 / c^2(z) - \xi^2) \psi(z) &= 0; \\ [\psi(z) + g(\xi) \cdot \psi'(z)]_{z=H} &= 0; \quad \psi(z)|_{z=0} = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

здесь штрих обозначает дифференцирование по переменной z .

Таким образом, задача сводится к построению функции Грина G , которая выражается через решения дифференциальных уравнений (3), удовлетворяющие граничным условиям. Верхнюю границу волновода считают акустически мягкой. На нижней границе должны выполняться условия непрерывности давления и вертикальной составляющей колебательной скорости при переходе от водного слоя к дну. Обратимся к

выделенным характерным моделям дна I, II и III типа, которым соответствуют вполне определенные граничные условия. Анализ решения краевой задачи (3) для этих граничных условий приведен в работах [11, 19, 12, 20].

Модель дна I типа – жидкое однородное поглощающее полупространство. В этом случае в краевой задаче (3) комплексный импеданс дна $g(\xi)$ соответствует импедансу жидкого однородного поглощающего полупространства $g_0(\xi)$ следующего вида [11]:

$$g_0(\xi) = m / \alpha, \quad \alpha = \sqrt{\xi^2 - k^2 n^2}; \quad m = \rho_b / \rho_w; \quad k = \omega / c(0); \quad n = c(0) / c_L^*. \quad (4)$$

В случае аппроксимации полупространства слоем конечной толщины S^* , на внешней границе которого выполняется условие Неймана, комплексный импеданс $g(\xi)$ в краевой задаче (3) принимает вид [19]:

$$\tilde{g}(\xi) = (m / \alpha) \cdot \text{th}(\alpha S^*); \quad \alpha = \sqrt{\xi^2 - k^2 n^2}. \quad (5)$$

Модель дна II типа – вертикально стратифицированные жидкие однородные поглощающие слои, лежащие на жидком полупространстве. Нижнее полупространство состоит из $N+1$ слоев толщиной h_i с плотностью $\rho_{b,i}$, скоростью звука $c_{L,i}$. Граничные условия имеют тот же вид (3), а функция $g(\xi)$ для каждой моды $g_j(\xi)$, определяется из рекуррентной системы с убывающей последовательностью номеров, которая получается после сшивания величин $\rho_{b,i}(\psi_j / \psi_j')$ на границах слоев $i-1$ и i [12]:

$$g_i(\xi) = \frac{\rho_{b,i}}{\rho_{b,i-1} \kappa^{(i)}} \cdot \frac{\kappa^{(i)} g_{i+1} - \text{th} \kappa^{(i)} h_i}{1 - \kappa^{(i)} g_{i+1} \text{th} \kappa^{(i)} h_i}; \quad g_{N+1}(\xi) = \frac{\rho_{b,N+1}}{\rho_{b,N} \kappa^{(N+1)}}; \quad \kappa^{(i)} = \sqrt{\xi^2 - k_{b,i}^2}; \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

Модель дна III типа – упругое полупространство. Выражение для импеданса $w(\xi)$, который соответствует $g(\xi)$ в системе уравнений (3), принимает следующий вид [20]:

$$w(\xi) = m \left[\frac{(2\xi^2 - q_T^2)^2}{(\xi^2 - q_L^2)^{1/2}} - 4\xi^2 (\xi^2 - q_T^2)^{1/2} \right]; \quad q_L = \omega / c_L^*; \quad q_T = \omega / c_T^*. \quad (7)$$

В районах континентального склона используется лучевое приближение, нижняя граница также является импедансной. Рассмотрим случай произвольного задания геометрии границ.

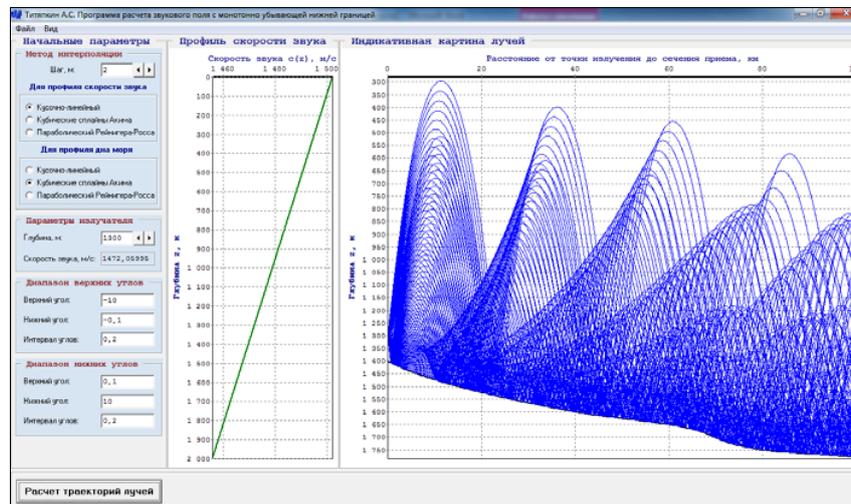
Модель дна IV типа – волновод переменной глубины. В Отделении гидроакустики ведутся работы по созданию программы расчета звукового поля в приближении лучевой акустики при произвольном задании профиля дна. В этом случае коэффициент отражения плоской волны, падающей из водного слоя на границу раздела с однородным упругим полупространством, определяется формулой Френеля [10]:

$$K = \frac{W-1}{W+1}; \quad W = m \sin \mathcal{G} \left[\frac{l(2t^2 \cos^2 \mathcal{G} - 1)^2}{\sqrt{1 - l^2 \cos^2 \mathcal{G}}} + 4t^3 \cos^2 \mathcal{G} \sqrt{1 - t^2 \cos^2 \mathcal{G}} \right], \quad (8)$$

где \mathcal{G} – угол скольжения луча по отношению к касательной к профилю дна в точке отражения;

$l \equiv l^*$ и $t \equiv t^*$ – комплексное значение отношения скорости продольных и поперечных волн в материале дна, соответственно, к скорости звука на нижней границе водного слоя.

Пример траекторий лучей, полученных с помощью разрабатываемой программы для случая произвольного задания профиля дна, и интерфейс приведены на рисунке.



Рисунок

Таким образом, определены характерные типы моделей дна и граничные условия, которые позволяют определить состав программ для прикладных задач акустики украинского шельфа и континентального склона. В дальнейшем углубление знаний о свойствах дна приведет к выделению и других типов его моделей. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные Отделением гидроакустики на шельфе, свидетельствует о необходимости усложнения геоакустической модели дна и граничных условий [6, 21] в направлении учета упругих свойств материала дна и его слоистой структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Определены характерные для шельфа типы дна, приведены соответствующие граничные условия для задачи Штурма-Лиувилля, решения которой известны.
- В качестве критерия описания граничных условий, характерных для континентального склона, выбрана геометрия границ волновода. Представлен пример расчета лучевой картины для произвольного профиля дна по разрабатываемой в Отделении гидроакустики программе.
- Выделенные типы граничных условий в дальнейшем могут быть использованы для совершенствования акустической модели шельфа, усложнения геоакустической модели и граничных условий, создания пакета программных средств, необходимых для решения прикладных задач акустики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.Л. Шендеров. Волновые задачи гидроакустики – Л.: Судостроение, 1972. – 348 с.
2. В.Т. Грінченко, І.В. Вовк, В.Т. Маципура. Основы акустики: Навчальний посібник. – К.: Наукова думка, 2007. – 640 с.
3. И.В. Наумов. Геоакустическая модель донных осадков Каркинитского залива (Черное море) // Вопросы судостр. Сер. Акустика. ЦНИИ РУМБ. – 1980. – вып. 14. – С. 79-83.

4. А.В. Ильин. О геологических моделях дна в акустике океана / Акустические волны в океане. Под ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреевой – М.: Наука, 1987– С. 130–137.
5. А.И. Гончар, С.И. Донченко, Л.И. Шлычек, А.И. Шундель. Синтез структурно-акустических моделей морского дна // КОНСОНАНС – 2005, Акустический симпозиум 27-29 сентября 2005 г., г. Киев – Сб. тр. – 2005. – С. 142–152.
6. Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа. Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 1 Концепция исследований // Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана): Сб. науч. тр. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. – 2009. – №6. – С. 10–23.
7. Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа. Акустическая модель квазистационарных трасс. Часть 2 Оценка физической адекватности акустической модели // Гидроакустический журнал (Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана): Сб. науч. тр. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины. – 2010. – №7. – С. 58–72.
8. Черное море. Сборник – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 407 с.
9. Е.Ф. Шнюков, В.И. Старостенко, О.М. Русаков, Р.И. Кутас. Глубинная природа газовых факелов западной части Черного моря по результатам геофизических исследований // Геология и полезные ископаемые Мирового океана – 2005. – №1. – С. 70–82.
10. Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. Теоретические основы акустики океана – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – С. 264.
11. В.Ю. Завадский. Вычисление волновых полей в открытых областях и волноводах – М.: Наука, 1972. – 558 с.
12. Б.Г. Кацнельсон, В.Г. Петников. Акустика мелкого моря. – М.: Наука, 1997. – 189 с.
13. В.М. Кудряшов. Звуковое поле в волноводе с наклонным дном // Акуст. журн. – 1987. – 33. – вып. 1. – С. 55–59.
14. С.О. Папков, Ю.И. Папкина, А.А. Ярошенко. Звуковое поле в неоднородном гидроакустическом волноводе со ступенчатым дном // Акустичн. вісн. – 2003. – 6. – 1. – С. 32–42.
15. С.О. Папков, Ю.И. Папкина, А.А. Ярошенко. Моделирование неровностей донных слоев в гидроакустическом волноводе на основе метода нормальных волн // Акустичн. вісн. – 2002. – 5. – 3. – С. 61–71.
16. Б.Г. Кацнельсон, Ю.А. Кравцов, Л.Г. Кулапин, В.Г. Петников, О.И. Сабиров. Особенности энергетических характеристик придонного распространения звука в мелком море / Акустические волны в океане. Под ред. Л.М. Бреховских, И.Б. Андреевой – М.: Наука, 1987– С. 76–84.
17. SACLANT Undersea Research Center / <http://www.saclantc.nato.int/index.html> (09.06.2004)
18. RAYSON / Web:<http://semantic-ts.fr> (18.08.2009)
19. В.Д. Крупин. Вычисление звукового поля точечного гармонического излучателя в слоисто-неоднородном волноводе, расположенном на жидком однородном полупространстве, методом обобщённых нормальных волн. Отчёт АКИН – М., 1974.
20. Н.Е. Мальцев. Математическое моделирование звуковых полей в океане / Акустика океана. Современное состояние – М. Наука, 1982. – С. 5–24.
21. Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа. Влияние дна на формирование звукового поля на шельфе (по результатам эксперимента) // – доклад на Акустическом симпозиуме КОНСОНАНС – 2011, 27-29 сентября 2011 г., г. Киев