

УДК 534 (204.1)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ**А.Г. Ченский, Г.С. Коренблит****NUMERICAL MODELING OF A SOUND WAVES SPREADING IN THE LAKE BAIKAL****A.G. Chensky, G.S. Korenblit**

На основе экспериментальных данных по давлению, температуре и солёности воды в озере Байкал проведено численное моделирование распределения скорости звука и распространения звуковых волн, указывающее на существование вблизи поверхности озера подводного звукового канала.

A numerical modeling of a sound velocity distribution and of sound waves spreading is made by using an experimental data about the pressure, the temperature and salinity of water in lake Baikal. The result points to the existence of underwater sound channel near the lake surface.

Введение

В данной работе на основе массива экспериментальных данных по давлению, температуре и солёности воды в озере Байкал проведено численное моделирование распространения звуковых волн в рамках лучевого приближения без учета поглощения.

Профили температуры, солёности и давления были измерены ранее на различных расстояниях от берега СТД-зондом SB-25. Погрешность измерения температуры не более 0.002 °. Солёность озера 0.1 кг на литр, а изменение солёности по глубинам озера не превышает 20 %, поэтому влияние этой составляющей на величину скорости звука практически очень мало. Главная причина изменчивости профилей скорости звука в озере оказалась связана с сезонным изменением температуры.

В зимний период непрерывно увеличивающаяся с глубиной скорость звука приводит к образованию приповерхностного звукового канала. В августе – сентябре вертикальное распределение скорости звука соответствует асимметричному, расположенному близко к поверхности (50–70 м для источника) подводному звуковому каналу.

Численное моделирование распространения звуковых волн

Зависимость скорости звука $V(z)$ от глубины z может быть восстановлена из данных по температуре T , давлению P и солёности S по формуле Чена-Миллера [1]:

$$V(z) = c(T, P, S) = c_0(T) + c_1(T, P) + c_2(T, P) + c_3(T, P) + c_4(T, P, S) + c_5(T, P, S), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} c_0(T) &= 1402.388 + 5.03711 \cdot T - 5.80852 \cdot 10^{-2} T^2 + \\ &+ 3.3420 \cdot 10^{-4} T^3 - 1.47800 \cdot 10^{-6} T^4 + \\ &+ 3.1464 \cdot 10^{-9} T^5, \quad c_3(T, P) = \\ &= (-9.7729 \cdot 10^{-9} + 3.8504 \cdot 10^{-10} T - 2.3643 \cdot 10^{-12} T^2) P^3, \\ c_1(T, P) &= (0.153563 + 6.8982 \cdot 10^{-4} T - \\ &- 8.1788 \cdot 10^{-6} T^2 + 1.3621 \cdot 10^{-7} T^3 - 6.1185 \cdot 10^{-10} T^4) P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_2(T, P) &= (3.1260 \cdot 10^{-5} - 1.7107 \cdot 10^{-6} T + 2.5974 \cdot 10^{-8} T^2 - \\ &- 2.5335 \cdot 10^{-10} T^3 + 1.0405 \cdot 10^{-12} T^4) P^2, \\ c_4(T, P, S) &= (1.389 - 1.262 \cdot 10^{-2} T + 7.164 \cdot 10^{-5} T^2 + \\ &+ 2.006 \cdot 10^{-6} T^3 - 3.21 \cdot 10^{-8} T^4 + \\ &+ (9.4742 \cdot 10^{-5} - 1.2580 \cdot 10^{-5} T - 6.4885 \cdot 10^{-8} T^2 + \\ &+ 1.0507 \cdot 10^{-8} T^3 - 2.0122 \cdot 10^{-10} T^4) P + \\ &+ (-3.9064 \cdot 10^{-7} + 9.1041 \cdot 10^{-9} T - \\ &- 1.6002 \cdot 10^{-10} T^2 + 7.988 \cdot 10^{-12} T^3) P^2 + \\ &+ (1.100 \cdot 10^{-10} + 6.649 \cdot 10^{-12} T - 3.389 \cdot 10^{-13} T^2) P^3) S, \\ c_5(T, P, S) &= (-1.922 \cdot 10^{-2} - 4.42 \cdot 10^{-5} T + \\ &+ (7.3637 \cdot 10^{-5} + 1.7945 \cdot 10^{-7} T) P) S^{\frac{3}{2}} + \\ &+ (1.727 \cdot 10^{-3} - 7.9836 \cdot 10^{-6} P) S^2. \end{aligned}$$

Ее характерный профиль, усредненный по различным расстояниям от берега, имеет вид, приведенный на рис. 1. Он имеет характерный минимум на глубине порядка 50 м, с которым и связано существование расположенного близко к поверхности подводного звукового канала с глубиной проникновения лучей 45–75 м, показанного на рис. 2.

В приближении геометрической акустики [2] без учета поглощения для горизонтально стратифицированного водоема постоянной глубины ход с глубиной ζ луча, испущенного источником на глубине z_0 под углом α или $\pi - \alpha$ к вертикали, определяется интегралом:

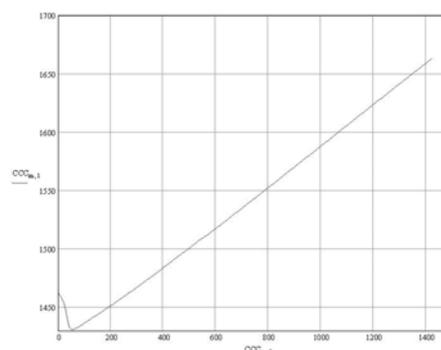


Рис. 1. Профиль скорости звука $V(z)$ (по вертикали) с глубиной z (по горизонтали).

$$R(\zeta, z_0) = \int_{z_<}^{z_>} \frac{dz}{\sqrt{\left(\frac{V(z_0)}{V(z) \sin \alpha}\right)^2 - 1}}, \quad (2)$$

где $z^> = \max(z_0, \zeta)$, $z_< = \min(z_0, \zeta)$.

Численная оценка этого интеграла для заданного массива экспериментальных данных по скорости V_s на глубине z_s для углов α , близких или равных $\pi/2$, затруднена неизбежной особенностью подынтегральной функции на конце интервала интегрирования, не зависящей от способа сглаживания данных по V_s . Эту трудность можно обойти, если заметить, что для линейной зависимости скорости от глубины $V(z) = c - \beta z$ интеграл в (2) вычисляется аналитически. Тогда для линейной аппроксимации, например, с постоянным шагом h экспериментальных данных по скорости $V_i \equiv V(z_i)$ на глубине $z_i = -hl$ при значениях глубины проникновения луча $\zeta \Rightarrow z_k = -hk$ от источника на глубине $z_0 \Rightarrow z_j = -hj$, кратных величине h , определяемый интегралом (2) горизонтальный ход луча $R(\zeta, z_0)$ сводится к легко и быстро считаемой на компьютере сумме однотипных несингулярных слагаемых:

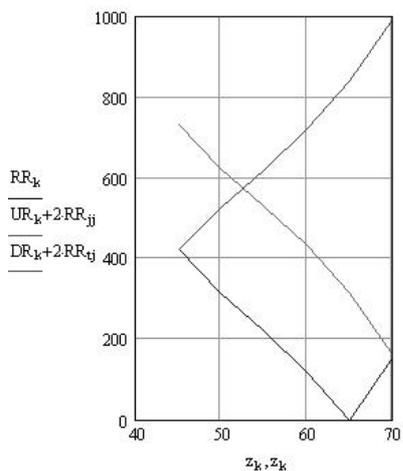
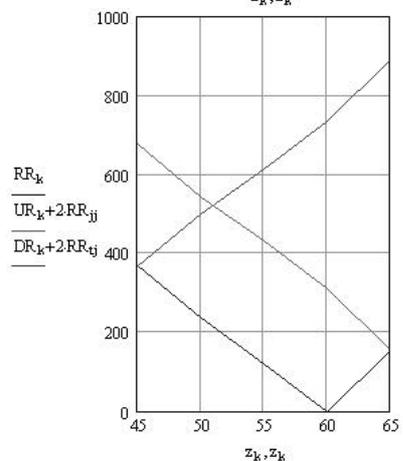
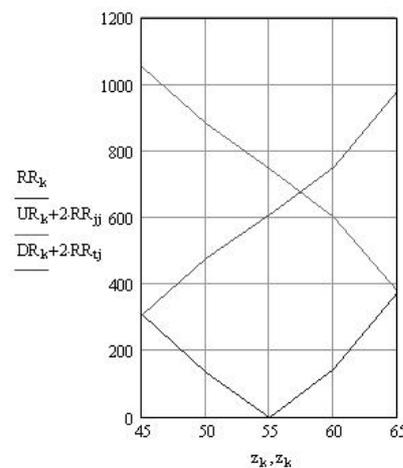
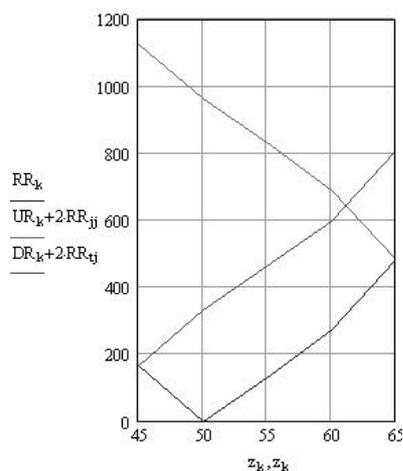
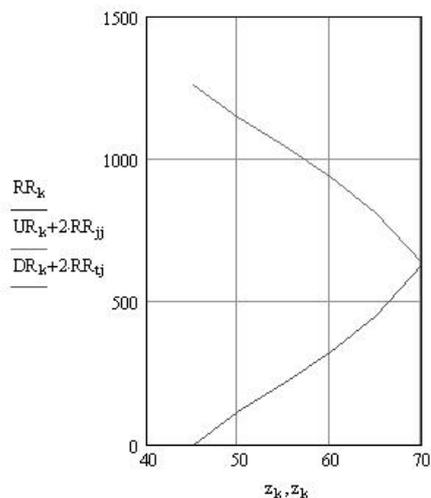
$$R_\alpha^{(+)}(-hk, -hj) = \sum_{l=k}^{j-1} r_l^{(j)},$$

$$R_\alpha^{(-)}(-hk, -hj) = \sum_{l=j}^{k-1} r_l^{(j)},$$

где

$$r_l^{(j)} = \frac{h(V_l + V_{l+1})}{\sqrt{\left(\frac{V_j}{\sin \alpha}\right)^2 - V_l^2} + \sqrt{\left(\frac{V_j}{\sin \alpha}\right)^2 - V_{l+1}^2}}, \quad (3)$$

и (+) отвечает лучу, идущему вверх, $k < j$; а (-) отвечает лучу, идущему вниз, $k > j$.



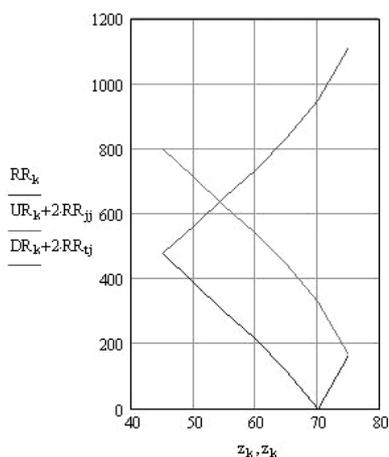


Рис. 2. Ход лучей $R(\zeta, z_0)$ (по вертикали) с глубиной ζ (по горизонтали) в подводном звуковом канале при $\alpha = \pi/2.05$, $\sin \alpha = 0.999$ и $z_0 = 45, 50, 55, 60, 65, 70$ м.

Из $R(\zeta, z_0)$, приведенных на рис. 2, видно, что верхней границе канала на первом из этих рисунков отвечает отсутствие луча, идущего вверх, а нижней границе канала отвечает очень быстрый (за один шаг $h = 5$ м) разворот луча, идущего вниз, на последних двух рисунках. Это свойство сохраняется и при дальнейшем увеличении глубины источника на рис. 3.

Оно связано, очевидно, с дальнейшим ростом скорости звука с глубиной на рис. 1. Реально с ростом глубины существенную роль начинает играть поглощение и подводный звуковой канал исчезает [2, 3].

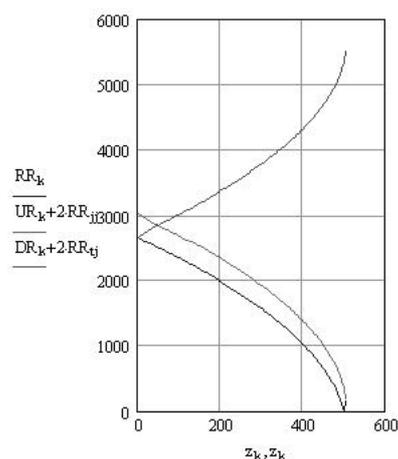
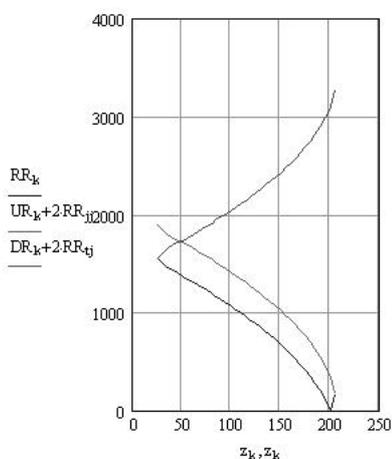


Рис. 3. Ход лучей $R(\zeta, z_0)$ от источника на глубине $z_0 = 200, 500$ м.

Закключение

Предложенный метод численного моделирования распространения звуковых волн очень прост в своей реализации на ЭВМ, допускает повышение точности путем уменьшения шага аппроксимации h и позволяет исследовать ход лучей при любых углах излучения. Его сравнение с прямым вычислением интеграла (2) средствами программы MathCad 2001 Pro, с использованием различных сплайн-аппроксимаций данных по V_s показало полное совпадение результатов вычислений вплоть до $\sin \alpha = 0.997$.

Использованное здесь лучевое представление справедливо до тех пор, пока длина акустической волны мала по сравнению с масштабами изменений скорости звука $V(z)$ и горизонтальными вариациями глубины [2]. При этом выявленный в данной работе подводный звуковой канал в оз. Байкал с точностью до масштабного фактора $\approx 1/10$ повторяет аналогичное явление в океане [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen C-T.A., Millero F.J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only limnological range // Limnol.Oceanogr. V. 31, N 3. 1986. P. 657–662.
2. Кеплер Д.Б., Пападакис Д.С. Распространение волн и подводная акустика. М.: Мир, 1980.
3. Степанов А.Н. Мультипольная модель гидроакустических источников. Самара, 2000.