МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА В ВЕРТИКАЛЬНО-ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ С ПОГЛОЩЕНИЕМ

Лысь Е.В., Лисица В.В.

(ИНГГ СО РАН, г.Новосибирск, Россия)

В работе представлен алгоритм расчёта волновых полей при акустическом каротаже, в вертикально-трансверсально-изотропных средах (VTI), учитывающий добротность горных пород. Алгоритм базируется на применении линейной теории вязкоупругости. Построена конечно-разностная аппроксимация осесимметричной динамической задачи вязкоупругости, основанная на применении схемы на сдвинутых сетках (Верё, 1986), исследована устойчивость, проведен дисперсионный анализ. Для моделирования в неограниченных областях используются два подхода: идеально согласованный слой (англ. аббревиатура PML-perfectly matched layer) и продолжение целевой области на оптимальных сетках (V.Druskin et al.).

При решении задач акустического каротажа, исключительно важно уметь эффективно рассчитывать волновое поле в некоторой известной модели. Далеко не все геологические объекты адекватно описываются моделью изотропной идеально упругой среды, не учитывающей такие важные факты, как диссипация энергии в реальных сейсмических средах и анизотропия скоростей сейсмических волн.

Основополагающее соотношение для линейной теории вязкоупругости было получено Р.Кристенсоном (1982)

$$\sigma_{ij} = G_{ijkl} * \dot{\epsilon}_{kl} \quad (1)$$

Здесь, * - подразумевает оператор свертки, точка над символом означает производную по времени. G_{ijkl} - тензор четвёртого ранга, содержащий функцию релаксации. Вместе с уравнение равновесия $\rho \dot{v}_i = \partial_j \sigma_{ij}$, мы получаем замкнутую систему, описывающую распространение волн в вязкоупругой среде.

Для того чтобы учесть поглощение энергии, мы должны определить механизм затухания. В работе [2] было показано, что «обобщённая стандартная линейная модель твёрдого тела» (англ. аббревиатура GSLS-generalized standard linear solid) даёт реалистичное описание волновых процессов, проходящих в земной коре, что подтверждают и экспериментальные данные. В рамках GSLS, мы получаем следующие выражения для функции релаксации:

$$G(t) = M_R \left(1 + \sum_{l=1}^L \left(\frac{\tau_{el}}{\tau_{ol}} - 1 \right) e^{-t/\tau_{ol}} \right) H(t)$$

Здесь M_R - упругая постоянная, τ_{el}, τ_{ol} - времена релаксации, $H(t)$ - функция Хевисайда, L - число механизмов затухания.

Мерой диссипации энергии, в вязкоупругих средах служит параметр Q - добротность. Он определён, как число длин волн, после прохождения, которых первоначальный импульс затухнет в e^π

раз. В частотной области $Q = \frac{\text{Re } G(\omega)}{\text{Im } G(\omega)}$ поэтому тен-

зор Q_{ij} будет повторять структуру тензора упругих модулей в VTI и для определения заданной добротности возможно использование параметров аналогичных параметрам Томсона для скоростей упругих волн. Задавая несколько механизмов затухания, мы добиваемся частотной независимости в определении добротности.

В докладе описан способ моделирования добротности называемый тау-методом, справедливый для значений $Q > 10$ и позволяющий получить существенную экономию машинных ресурсов.

Известно, что для некоторых моделей анизотропии идеально согласованный слой неустойчив, в этом случае предлагается расширять расчётную область с помощью оптимальных сеток, это позволяет избежать отражений от границ целевой области за расчётное время, при этом существенно экономятся вычислительные ресурсы по сравнению с расширением на равномерной сетке.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кристенсен Р. 1974. Введение в теорию вязкоупругости. Москва «Мир»
- [2] Liu, H.P., Anderson, D.L., Kanamori, H., 1976. Velocity dispersion due to anelasticity: implications for seismology and mantle composition. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 47, 41–58.
- [3] S.Asvadurov, V.Druskin, S.Moskow, Optimal grids for anisotropic problems. *Wave propagation, ETNA*, 2007, V.26; v.Lisitsa, Optimal grids for numerical solution of wave equation with variable coefficients, *SJCM*, 2005, v.8(3).
- [4] Joakim O. Blanch, Johan O. A. Robertsson and William W. Symes Modeling of a constant Q: Methodology and algorithm for an efficient and optimally inexpensive viscoelastic technique