

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕЙСМІЧНОГО ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ
ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА З ОДНОНАПРАВЛЕНОЮ СИСТЕМОЮ ТРІЩИН**

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-наук, проф. С.А. Вижвою)

Розроблений і реалізований алгоритм і програма чисельного моделювання повної хвильової картини сейсмічної хвилі в анізотропному поперечно-ізотропному середовищі для точкового джерела типу "вибух". Проведено математичне моделювання ефективних пружних постійних для моделі тріщинуватого граніту з однонаправленою системою тріщин. Одержані синтетичні сейсмограми вертикальної і горизонтальної компоненти сейсмічних хвиль, які свідчать про можливість застосування методів сейсморозвідки для картування тріщинуватих зон.

The algorithm and application for numerical modeling of full seismic wave pattern in anisotropic transversely isotropic environment for a point source type of "explosion" was designed and implemented. The mathematical modeling of effective elastic constants for the model of fissured granite with unidirectional system of cracks was produced. The synthetic seismograms of vertical and horizontal components of seismic waves was obtained, which indicate the possibility to using seismic methods for mapping the fissured zones.

Переважає більшість родовищ нафти і газу в породах кристалічного фундаменту тяжіє до зон розвитку тріщинних і тріщинно-кавернозних колекторів. У зв'язку з цим надзвичайно важливою задачею є картування таких зон на етапах пошукових і розвідувальних робіт методами сейсморозвідки.

Упорядковані тріщини і каверни спричиняють анізотропію пружних хвиль, яка суттєво впливає на характер розповсюдження хвиль. Розглядається алгоритм і програма чисельних розрахунків сейсмічного хвильового поля для слабоанізотропного середовища із однонаправленою системою тріщин і каверн.

Проблемі моделювання сейсмічних хвиль в анізотропному середовищі присвячено багато робіт, але в біль-

шості випадків одержані розв'язки в інтегральній формі не доводяться до алгоритмів чисельних розрахунків.

Для побудови алгоритму чисельних розрахунків сейсмічного хвильового поля, яке збудується точковим джерелом типу "вибух" в нескінченному поперечно-ізотропному тріщинуватому геологічному середовищі, нами використовуються результати розв'язку цієї задачі, які одержані в роботі П.М. Бокова і А.М. Іонова [1].

Для побудови алгоритму чисельних радіальної $U_r(t, r, z)$ і вертикальної $U_z(t, r, z)$ компонент вектора пружних зміщень хвилі у часовій області використовувалися наступні співвідношення (в асимптотичному наближенні методу стаціонарної фази) [1]:

$$u_r(t, r, z) = \frac{\Psi_s(t - (\zeta_1(P_{qp})|z| + P_{qp}r))}{\alpha_{\perp} R_{qp}^r} + \frac{\Psi_s(t - (\zeta_2(P_{qp})|z| + P_{qp}r))}{\beta_{*} R_{qp}^r}; \quad (1)$$

$$u_z(t, r, z) = \left[\frac{\Psi_s(t - (\zeta_1(P_{qp})|z| + P_{qp}r))}{\alpha_{\perp} R_{qp}^z} + \frac{\Psi_s(t - (\zeta_2(P_{qp})|z| + P_{qp}r))}{\beta_{*} R_{qp}^z} \right] \text{sign}(z); \quad (2)$$

$$(R_{qp}^r)^{-1} = \frac{\alpha_{\perp}^2}{2\beta_{*} \sqrt{|z|r}} \frac{P_{qp}^{3/2}}{\zeta_1(P_{qp})} \frac{[1 + (\alpha_{\perp}^2 - \alpha_{*}^2)P_{qp}^2 + (\alpha_{\perp}^2 - \alpha_{*}^2 - \beta_{*}^2) / c_1^2(P_{qp})]}{\sqrt{Q^2(P_{qp}) - 4\Phi(P_{qp})}} \left| \frac{d^2 \zeta_1(P_{qp})}{dp^2} \right|^{-1/2}; \quad (3)$$

$$(R_{qs}^r)^{-1} = \frac{\alpha_{\perp}}{2\sqrt{|z|r}} \frac{P_{qs}^{3/2}}{\zeta_2(P_{qs})} \frac{[1 + (\alpha_{\perp}^2 - \alpha_{*}^2)P_{qs}^2 + (\alpha_{*}^2 - \alpha_{\perp}^2 - \beta_{*}^2) / c_2^2(P_{qs})]}{\sqrt{Q^2(P_{qs}) - 4\Phi(P_{qs})}} \left| \frac{d^2 \zeta_2(P_{qs})}{dp^2} \right|^{-1/2}; \quad (4)$$

$$(R_{qp}^z)^{-1} = \frac{\alpha_{\perp}^2}{2\beta_{*} \sqrt{|z|r}} \frac{P_{qp}^{1/2}}{\zeta_1(P_{qp})} \frac{[1 - (\alpha_{\parallel}^2 - \alpha_{*}^2)P_{qp}^2 - \beta_{*}^2 / c_1^2(P_{qp})]}{\sqrt{Q^2(P_{qp}) - 4\Phi(P_{qp})}} \left| \frac{d^2 \zeta_1(P_{qp})}{dp^2} \right|^{-1/2}; \quad (5)$$

$$(R_{qs}^z)^{-1} = \frac{\alpha_{\perp}}{2\sqrt{|z|r}} \frac{P_{qs}^{1/2}}{\zeta_2(P_{qs})} \frac{[1 - (\alpha_{\parallel}^2 - \alpha_{*}^2)P_{qs}^2 - \beta_{*}^2 / c_2^2(P_{qs})]}{\sqrt{Q^2(P_{qs}) - 4\Phi(P_{qs})}} \left| \frac{d^2 \zeta_2(P_{qs})}{dp^2} \right|^{-1/2}; \quad (6)$$

де P – горизонтальна компонента вектора повільності хвилі; $c_1(P)$ і $c_2(P)$ – корені бікватратного дисперсійного рівняння:

$$\Phi(P)c^4 - 2\alpha_{\perp}\beta_{*}Q(P)c^2 + \alpha_{\perp}^2\beta_{*}^2 = 0; \quad (7)$$

$$\Phi(P) = 1 + (\alpha_{\perp}^2 + \alpha_{\parallel}^2)P^2 + [(\alpha_{*}^2 - \alpha_{\parallel}^2)(\alpha_{\perp}^2 - \beta_{*}^2) + (\alpha_{*}^2 - \alpha_{\perp}^2)(\alpha_{*}^2 - \beta_{*}^2)]P^4 \quad (8)$$

$$\Phi(P) = (\alpha_{\perp}^2 + \beta_{*}^2 - [(\alpha_{\perp}^2 - \alpha_{*}^2)(\alpha_{*}^2 - 2\beta_{*}^2) + (\alpha_{\parallel}^2 - \alpha_{*}^2)\alpha_{\perp}^2]P^2) / (2\alpha_{\perp}\beta_{*}) \quad (9)$$

$\zeta_{1,2}(P) = \sqrt{c_{1,2}^{-2}(P) - P^2}$ – вертикальна компонента вектора повільності хвилі; $\alpha_{\perp}, \alpha_{\parallel}$ – швидкості позовдужної хвилі у напрямку осі симетрії і в площині, перпендикулярній до осі симетрії; β_{*} – швидкість поперечної хвилі вздовж осі симетрії або в площині, перпендикулярній до осі симетрії.

Для розрахунків функції сейсмічного джерела $\Psi(t)$ використовувався імпульс Берлаге:

$$\Psi(t) = Ate^{-\beta t} \sin \omega t \tag{10}$$

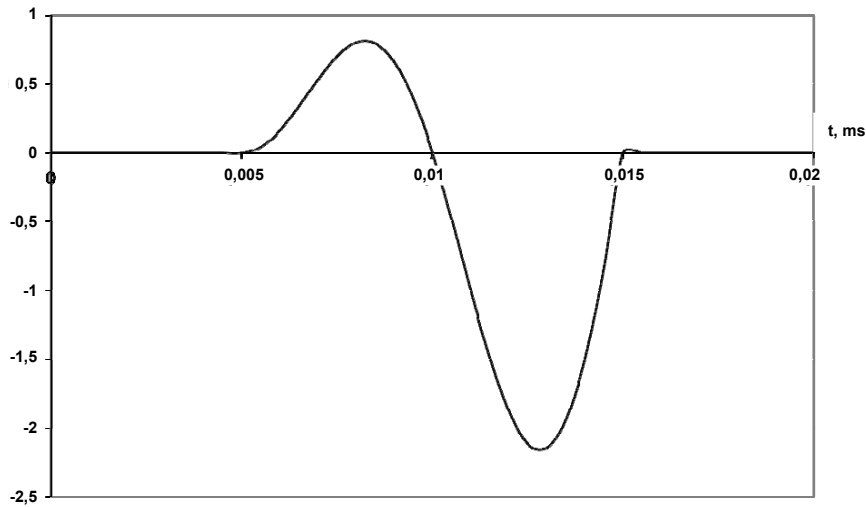


Рис. 1. Імпульс Берлаге і його параметри

При моделюванні задавалась частота $f = \frac{\omega}{2\pi}$ і величина $R = \Psi(t_2)/\Psi(t_0)$ – відношення другого максимуму при часі $t_2 = 5/(4f)$ до першого максимуму (при часі $t_0 = 1/(4f)$). Параметри β і R взаємозалежні, причому в визначають за формулою:

$$\beta = f \ln(5/R). \tag{11}$$

У формулу (10) входить нормуючий множник:

$$A = 4fe^{\beta/4f}, \tag{12}$$

величина якого забезпечує одиничну амплітуду першого максимуму імпульсу Берлаге $\Psi(t_0) = 1$.

Для чисельних розрахунків ефективних пружних постійних моделі тріщинуватого геологічного середовища застосовувався метод умовних моментних функцій [2].

Розглядаються моделі тріщинуватого граніту з однопорядковою орієнтацією сфероїдальних тріщин формату $b = 10^{-3}$ вздовж осі z і об'ємною концентрацією $c_1 = 0.0005$.

Модуль об'ємного стиснення твердого скелету $K = 51$ ГПа, а модуль зсуву скелету $G = 30$ ГПа та густина скелету $\rho = 2634$ кг/м³.

Результати чисельних розрахунків ефективних пружних постійних C_{mn}^* [ГПа] моделі тріщинуватого граніту:

89.2	29.2	27.1	0	0	0
89.2	27.1	0	0	0	0
	78.7	0	0	0	0
		28.4	0	0	0
			28.4	0	0
				30.0	0

Як видно із співвідношення пружних постійних: $C_{11}^* = C_{22}^*$, $C_{44}^* = C_{55}^*$, $C_{13}^* = C_{23}^*$ та приймаючи до уваги виконання співвідношення Коші $C_{11}^* - C_{12}^* = 2C_{66}^*$, можна зробити висновок, що матриця має поперечно-ізотропну симетрію. Величина коефіцієнта акустичної анізотропії 3.9 %.

Параметри анізотропії Томпсона [3] обчислювалися із співвідношень:

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}; \quad \delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}; \quad \gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}.$$

Величини швидкісних параметрів вздовж осі симетрії та в перпендикулярному напрямку знаходили із виразів:

$$\alpha_{\perp} = \sqrt{\frac{C_{33}^*}{\rho}}; \quad \alpha_{\parallel} = \sqrt{\frac{C_{11}^*}{\rho}}; \quad \beta^* = \sqrt{\frac{C_{44}^*}{\rho}}.$$

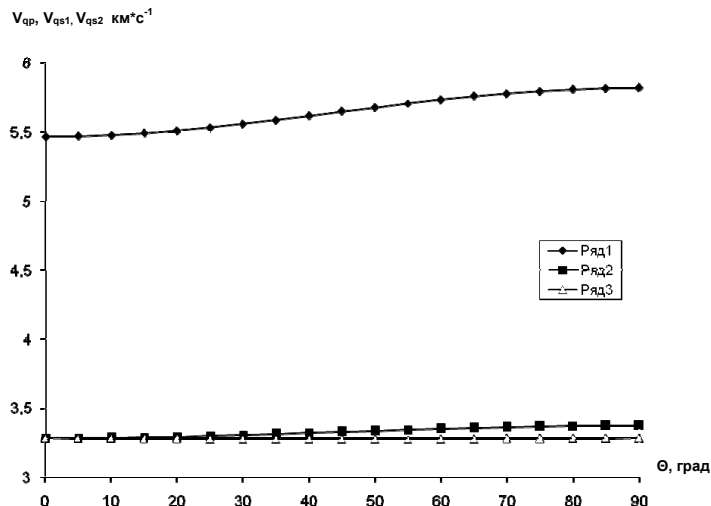


Рис. 2. Індикатриса квазіпоздовжньої V_{qr} (1) та квазіпоперечної "швидкої" V_{qs1} (2) і "повільної" V_{qs2} (3) пружних хвиль моделі тріщинуватий граніт

На рис. 2 наведені індикатрисы фазових швидкостей квазіпоздовжньої та квазіпоперечних "швидкої" та "повільної" пружних хвиль, які характеризують закономірності їх зміни в різних напрямках. Як видно швидкість

квазіпоздовжньої хвилі вздовж осі симетрії в моделі тріщинуватого граніту менша, ніж у перпендикулярному напрямку до цієї осі.

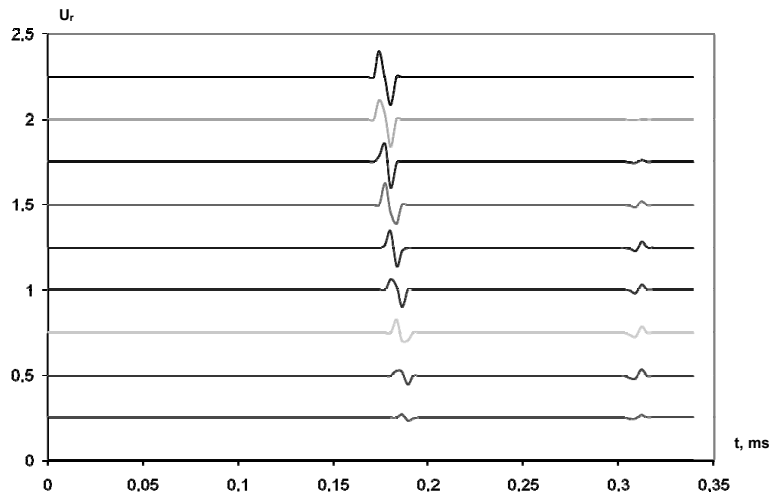


Рис. 3. Сейсмограми горизонтальної компоненти вектора пружних зміщень для різних напрямків розповсюдження хвилі (0°-90°) моделі тріщинуватий граніт. Відстань $r=1000$ м, частота 100 Гц

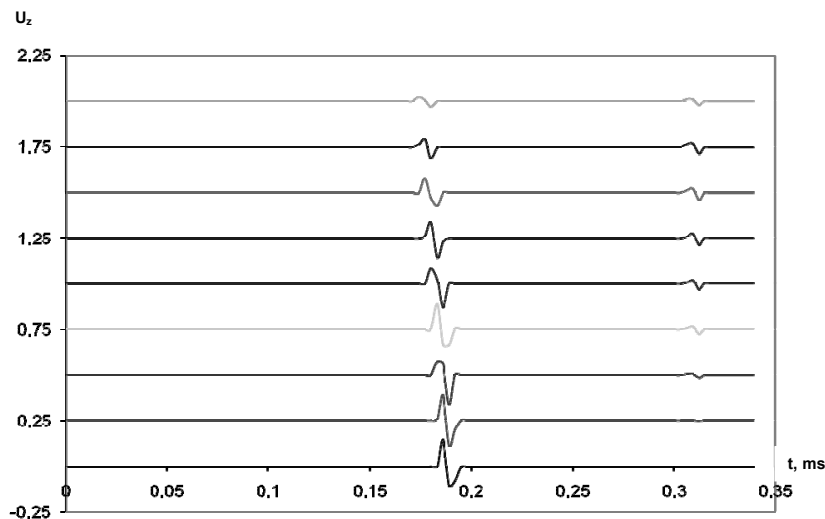


Рис. 4. Сейсмограми вертикальної компоненти вектора пружних зміщень для різних напрямків розповсюдження хвилі (0°-90°) моделі тріщинуватий граніт. Відстань $r=1000$ м, частота 100 Гц

На рис. 3 і рис. 4 наведені результати чисельних розрахунків вертикальної U_z і горизонтальної U_x компонент вектора пружних зміщень хвиль, які збурюються джерелом типу "вибух" на відстань 1000 м. Кожна траса відповідає різним напрямкам розповсюдження хвилі від вертикального $\Theta=0^\circ$ до горизонтального $\Theta=90^\circ$. Як видно із наведених даних, чисто поздовжні хвилі розповсюджуються лише у вертикальному і горизонтальному напрямках.

На рис. 3 і рис. 4 яскраво видно процес формування квазіпоперечних хвиль.

Для кутів $\Theta=30^\circ-70^\circ$ характерна найбільша інтенсивність поперечної SV-хвилі, яка однозначно вказує на наявність анізотропії, яка обумовлена орієнтованою вздовж осі з тріщинуватістю.

Висновки: Розроблений і реалізований алгоритм і програма чисельного моделювання повної хвильової

картини сейсмічної хвилі в анізотропному поперечно-ізоотропному середовищі для точкового джерела типу "вибух". Проведено математичне моделювання ефективних пружних постійних для моделі тріщинуватого граніту з однонаправленою системою тріщин. Одержані синтетичні сейсмограми вертикальної і горизонтальної компонент сейсмічних хвиль, які свідчать про можливість застосування методів сейсморозвідки для картування тріщинуватих зон.

1. Бокон П.Н., Ионов А.М. Точное и асимптотическое решение для точечного источника в трансверсально-изотропной среде // Акустический журнал. – 2001. – Т.47, №3. – С. 304-312. 2. Продайвода Г.Т., Вижува С.А. Математичне моделювання геофізичних параметрів. – К., 1999. 3. Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophysics. – 1986. – V. 51, №10. – P.1954-1966.

Надійшла до редколегії 07.12.09