

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ ПОВЗДОВЖНІХ ХВИЛЬ ВІД РОЗУЩІЛЬНЕНИХ НАСИЧЕНИХ ЗОН В ГРАНІТАХ

В роботі розглядається актуальна проблема оцінки інформативної можливості AVO-аналізу шляхом максимального наближення апіорної моделі до реального середовища. Дані, отримані в результаті математичного моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей гранітів із різною структурою пустотного простору, демонструють можливість застосування AVO-аналізу при пошуках і розвідці розущільнених газо- та нафтонасичених зон фундаменту.

**Ключові слова:** гранітні колектори, математичне моделювання, коефіцієнт відбиття.

### Вступ

В сучасній сейсморозвідці широко використовується AVO-аналіз сейсмічних даних, основою якого є модель шаруватого середовища і рівняння коефіцієнту відбиття  $R(\theta)$  сейсмічної хвилі як функції кута падіння ( $\theta$ ) хвилі на відбиваючу границю. Для пружного ізотропного шаруватого середовища розв'язок задачі відбиття-заломлення був запропонований Цьопрітцем на початку минулого сторіччя і отримав свій розвиток у 60-70 рр. минулого століття у зв'язку зі спробами визначення літологічного складу та проблемами прямих пошуків вуглеводнів [Аки К., Ричардс П., 1983]. Увагу дослідників привернув той факт, що поведінка функції  $R(\theta)$  для Р-хвилі залежить не лише від контрасту густини і швидкості хвилі на відбиваючій границі, але і від співвідношення Р- і S-хвиль, оскільки по мірі збільшення кута падіння  $\theta$  все більша доля енергії падаючої Р-хвилі перерозподіляється на формування обмінних хвиль PS [Воскресенский Ю.Н., 2001; Пузырев Н.Н., Тригубов А.В. и др., 1985].

При традиційному підході побудова моделі AVO-аналізу зводиться до практичного використання лінійних апроксимацій рівняння Цьопрітца відносно контрастів швидкості і густини на відбиваючій границі  $\Delta V_p/V_p$ ,  $\Delta V_s/V_s$ ,  $\Delta \rho/\rho$ . Це означає, що ці апроксимації справедливі лише для слабо-контрастного шаруватого середовища:  $\Delta V_p/V_p \ll 1$ ,  $\Delta V_s/V_s \ll 1$ ,  $\Delta \rho/\rho \ll 1$  [Аки К., Ричардс П., 1983; Воскресенский Ю.Н., 2001; Козлов Е.А., 2006].

В роботі розглядається актуальна проблема оцінки інформативної можливості AVO-аналізу шляхом максимального наближення апіорної моделі до реального середовища. Використання сучасних методів математичного моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей багатоконтрастного тріщинно-порово-кавернозного геологічного середовища дозволяють розширити можливості AVO-аналізу сейсмічних даних при пошуках розущільнених зон в кристалічному фундаменті.

Прийнята для математичного моделювання шарувата модель включає верхній шар – розущільнене газо- або нафтонасичене середовище, та нижній шар – у всіх випадках монолітні ізотропні граніти. Таким чином будемо розглядати два випадки: 1) ізотропна орієнтація тріщин; 2) анізотропна однонаправлена орієнтація тріщин.

### Ізотропний випадок

Для математичного моделювання випадку довільної орієнтації газо- та нафтонасичених тріщин гранітного колектора використовувалась формула Цьопрітца для коефіцієнта відбиття повздовжньої хвилі  $R_{pp}(\theta)$  [Аки К., Ричардс П., 1983].

Розглядається випадок впливу на коефіцієнт  $R_{pp}(\theta)$  ізотропного розподілу газо- і нафто-насичених пустот різного формату. За даними моделювання на величину коефіцієнта  $R_{pp}(\theta)$  значний вплив має формат тріщин  $\alpha$ .

Відомо, що при виконанні умови  $V_{p2} > V_{p1}$ , у рівнянні Цьопрітца повздовжня хвиля не буде розповсюджуватися у підстилаючому горизонті при куті падіння  $\theta$  більшому, ніж  $\theta_{\text{кр}} = \arcsin(V_{p1}/V_{p2})$ . Ця особливість відображається на кривих  $R_{pp}(\theta)$  у вигляді екстремумів. Поява другого максимуму на кривих задовольняє умові  $\theta > \arcsin(V_{p1}/V_{s2})$ . При зменшенні формату тріщин екстремальні точки зміщуються в область малих кутів, а екстремуми виявляються дуже яскраво вираженими і локалізованими. Це означає, що в гранітних колекторах лінеаризація  $R_{pp}(\theta)$  може бути дуже грубою навіть в околиці кутів падіння 7-50°.

При насиченні гранітного колектора нафтою всі ці особливості зміщуються в область кутів падіння більше 40°. В цьому випадку апроксимацію кривих  $R_{pp}(\theta)$  можна вважати задовільною (рис. 1). Це можна розглянути детальніше, користуючись тричленною апроксимацією Шуе [Козлов Е.А., 2006; Shuey R.T., 1985]. В AVO-аналізі при практичному застосуванні найбільш популярною є двочленна апроксимація Шуе [Козлов Е.А., 2006]:

$$R_{pp}(\theta) \approx A + G \sin^2 \theta,$$

$A$  – AVO-інтерсепт - значення коефіцієнта відбиття при нормальному падінні ( $R_0$ ), з точністю до постійного множника  $R_0/A$ ;

$G$  – градієнт залежності  $R_{pp}(\theta)$  при  $\theta=0$ , який називають AVO-градієнтом.

Для двочленною апроксимації найкраще наближення одержано у випадку газо- і нафтонасичених міжзернових пустот і каверн (рис.2). Для тріщинних гранітних колекторів достатньо надійна апроксимація спостерігається лише у випадку насичення тріщин нафтою. AVO-атрибути  $A$ ,  $G$ ,  $C$  виявилися дуже чутливими до зміни формату пустот. Різниця між газо- та нафтонасиченими

гранітними колекторами дуже велика для тріщинуватих різновидів з форматами  $\alpha = 0,01; 0,001; 0,0001$ . Для між зернових пор ( $\alpha = 0,1; 0,9$ ) і каверн ( $\alpha = 10$ ) ця різниця дуже мала.

**Анізотропний випадок**

Якщо тріщини мають певну просторову орієнтацію, то на коефіцієнт відбиття сильно впливає анізотропія. Розглянемо найбільш цікаві, з точки зору практики, випадки системи тріщин, які відносяться до поперечно-ізотропної симетрії.

Основні типи поперечно-ізотропної симетрії гранітних колекторів будемо розглядати згідно із напрямком просторової орієнтації головної осі симетрії (вісь  $\infty$ -порядку) в просторі. Якщо головна вісь орієнтована вертикально, то таку модель тріщинуватого колектора будемо називати вертикальним поперечно-ізотропним середовищем (VTI), а при її горизонтальній орієнтації – горизонтальним поперечно-ізотропним середовищем (HTI) [Воскресенский Ю.Н., 2001; Shuey R.T., 1985]. Для математичного моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей гранітних колекторів методом умовних моментних функцій були вибрані наступні вихідні параметри: формат однонаправлено орієнтованих вздовж осі  $x_1$  або осі  $x_2$  пустот з форматом  $\alpha=0.009$  і концентрацією 0,54%. Пружні постійні ізотропної матриці моделі були прийняті наступні:  $C_{11}=97,79$  ГПа,  $C_{44}=33,52$  ГПа,  $C_{12}=28,75$  ГПа.

Результати чисельних розрахунків ефективних пружних постійних для газо- і нафтонасичених гранітних колекторів з різними системами тріщин представлені в табл. 1. Величина коефіцієнта акустичної анізотропії для газонасичених колекторів виявилась значно більшою [Продайвода Г.Т., Александров К.С. и др., 2001]:  $A_u=16,6\%$  для VTI насиченої газом і  $A_u=6,19\%$  для HTI насиченої нафтою.

На рис. 3, 4 представлені азимутальні залежності коефіцієнта відбиття для газо- і нафтонасичених гранітних колекторів для горизонтально орієнтованих тріщин (ПХ<sub>1</sub>). Спостерігаються зміни градієнтів кривих, лише у випадку нормального падіння криві співпадають. Контрасти параметрів анізотропії  $\Delta\delta^{(v)}$  та  $\Delta\varepsilon^{(v)}$  впливають на AVO-градієнт.

У випадку вертикально орієнтованих тріщин розрізнення газо- та нафтонасичених гранітних колекторів може бути здійснено достатньо впевнено. Проведення 3-D сейсморозвідки відкриває широкі можливості для визначення параметрів анізотропії  $\Delta\delta^{(v)}$ ,  $\Delta\varepsilon^{(v)}$ ,  $\gamma^{(v)}$  і просторової орієнтації тріщин.

**Висновки**

Результати математичного моделювання свідчать про можливість застосування AVO-аналізу при пошуках і розвідці розуцільнених газо- та нафтонасичених зон в кристалічному фундаменті. Проте, використання апроксимацій залежності коефіцієнта відбиття від кута падіння вимагає спеціального обґрунтування. Це пояснюється значним впливом на коефіцієнт відбиття структури пустотного простору. При врахуванні впливу анізотропії на коефіцієнт відбиття відкривається можливість оцінки просторової орієнтації тріщин і параметрів пружної анізотропії. Застосування багатокомпонентної апріорної моделі кристалічного колектора і сучасних методів математичного моделювання ефективних пружних і акустичних параметрів відкриває нові можливості для визначення газо- і флюїдонасичення та структури пустотного простору шляхом розв'язку задачі інверсії.

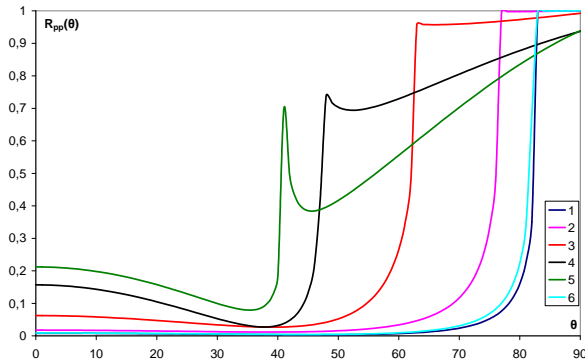
**Література**

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология – Москва: Мир, 1983. – Т. 1. – 519 с.  
 Воскресенский Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов – Москва: изд. РГУ нефти и газа, 2001. – 68 с.  
 Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии –Тверь: Издательство ГЕРС, 2006. – 479с.  
 Продайвода Г.Т., Александров К.С., Выжва С.А. Исследование упругих постоянных гранитоидов и анизотропии распространения объемных упругих волн в них // Геофиз. журнал. – 2001. – т. 23, № 2. – С. 31-56.  
 Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю. и др. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн – М.: Недра. – 1985. – 277 с.  
 Shuey R.T. A simplification of the Zoeppritz equations // Geophysics, 1985. – v. 50. – № 4. – p. 609-614.

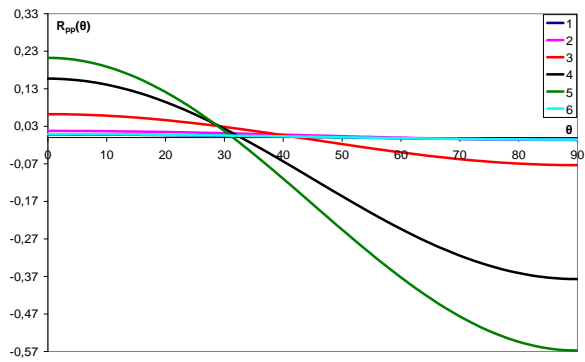
Таблиця 1

**Результати математичного моделювання ефективних пружних постійних гранітних колекторів з вертикальною і горизонтальною системою газо- та нафтонасичених тріщин**

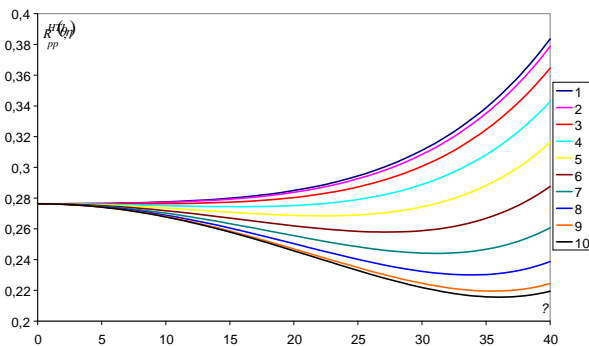
Тип колектора	Пружні постійні $C_{mn}$ , Гпа						Густина $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
	$C_{11}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{66}$	$C_{12}$	$C_{13}$	
Газонасичений/нафтонасичений колектор із вертикальною системою тріщин (ПХ <sub>3</sub> )	<u>61,69</u>	<u>35,00</u>	<u>17,61</u>	<u>23,63</u>	<u>14,65</u>	<u>9,16</u>	<u>2,293</u>
	68,38	59,37	19,07	24,13	20,13	18,18	2,398
Газонасичений/нафтонасичений колектор із горизонтальною системою тріщин (ПХ <sub>1</sub> )	<u>35,00</u>	<u>61,91</u>	<u>23,63</u>	<u>17,61</u>	<u>9,16</u>	<u>9,16</u>	<u>2,293</u>
	59,37	68,38	24,13	29,07	18,18	18,18	2,398



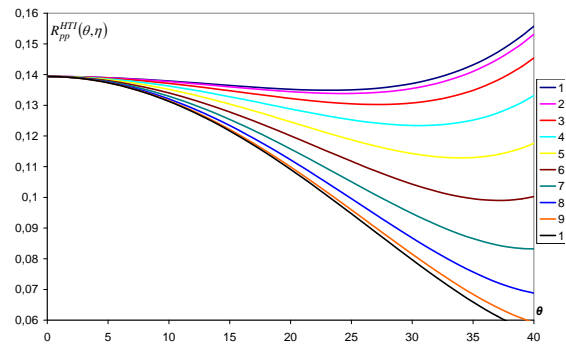
**Рис. 1.** Вплив структури пустотного простору на коефіцієнт відбиття повздовжньої хвилі для розуцільненої зони з пустотами різного формату, насиченими нафтою. 1 –  $\alpha=0,9$ ; 2 –  $\alpha=0,1$ ; 3 –  $\alpha=0,01$ ; 4 –  $\alpha=0,001$ ; 5 –  $\alpha=0,0001$ ; 6 –  $\alpha=10$ .



**Рис. 2.** Вплив структури пустотного простору на двочленне наближення ШУє  $R_{pp}(\theta)$  для розуцільненої зони з пустотами різного формату, насиченими нафтою. Умовні позначення аналогічні рис.1.



**Рис. 3.** Залежність коефіцієнта відбиття  $R_{pp}^{HTI}(\theta, \eta)$  газонасиченого гранітного колектора з горизонтально орієнтованою тріщинуватістю (ПХ<sub>1</sub>) від кута падіння ( $\theta$ ) при різних азимутах ( $\eta$ ): 1 –  $\eta=0^\circ$ ; 2 –  $\eta=10^\circ$ ; 3 –  $\eta=20^\circ$ ; 4 –  $\eta=30^\circ$ ; 5 –  $\eta=40^\circ$ ; 6 –  $\eta=50^\circ$ ; 7 –  $\eta=60^\circ$ ; 8 –  $\eta=70^\circ$ ; 9 –  $\eta=80^\circ$ ; 10 –  $\eta=90^\circ$ .



**Рис. 4.** Залежність коефіцієнта відбиття  $R_{pp}^{HTI}(\theta, \eta)$  нафтонасиченого гранітного колектора з горизонтально орієнтованою тріщинуватістю (ПХ<sub>1</sub>) від кута падіння ( $\theta$ ) при різних азимутах ( $\eta$ ). Умовні позначення аналогічні рис.3.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ОТ РАЗУПЛОТНЕННЫХ НАСЫЩЕННЫХ ЗОН В ГРАНИТАХ

С.А. Выжва, Г.Т. Продайвода, О.А. Козинова

В работе рассматривается актуальная проблема оценки информационных возможностей AVO-анализа путем максимального приближения априорной модели к реальной среде. Данные, полученные в результате математического моделирования эффективных упругих и акустических свойств гранитов с разной структурой порового пространства, демонстрируют возможность использования AVO-анализа при поисках и разведке разуплотненных газо- и нефтенасыщенных зон фундамента.

**Ключевые слова:** гранитные коллектора, математическое моделирование, коэффициент отражения.

## MATHEMATICAL MODELLING OF LONGITUDINAL WAVE REFLECTION COEFFICIENT FROM DECOMPRESSED SATURATED ZONES IN GRANITE

S.A. Vyzhva, G.T. Prodaivoda, O.T. Kozionova

The article reviews an actual problem of informative possibility of AVO-analysis based on synthetic model with close approximation to the real geological media. The data obtained by mathematical modeling of effective elastic and acoustic properties of granite with different structure of fractures demonstrate the possibility of AVO-analysis for exploration deconsolidated gas saturated and oil-saturated zones of basement.

**Key words:** granitic collectors, mathematical modeling, reflection coefficient.