

С.А. Вижва, Г.Т. Продайвода, П.М. Кузьменко, О.О. Козіонова

АВО-АНАЛІЗ СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ РОЗУЩІЛЬНЕНИХ ЗОН КРИСТАЛІЧНОГО ФУНДАМЕНТУ (РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ)

Розглянуто актуальну проблему оцінки інформативної можливості АВО-аналізу за максимального наближення апріорної моделі до реального середовища. Використання сучасних методів математичного моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей багатокомпонентного тріщинно-порово-кавернозного геологічного середовища дає змогу розширити можливості АВО-аналізу сейсмічних даних під час пошуків розущільнених зон у кристалічному фундаменті. Дані, отримані в результаті математичного моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей гранітів із різною структурою пустотного простору, демонструють можливість застосування АВО-аналізу для пошуків і розвідки розущільнених газо- і нафтонасичених зон фундаменту. Однак значний вплив структури пустотного простору на коефіцієнт відбиття потребує спеціального обґрунтування. За врахування впливу анізотропії на коефіцієнт відбиття відкривається можливість оцінки просторової орієнтації тріщин і параметрів пружної анізотропії.

Ключові слова: АВО-аналіз, сейсмічні дані, розущільнені зони, кристалічний фундамент.

Інтенсивний розвиток як теорії, так і практики АВО-аналізу сейсмічних даних дають підставу розглядати його як перспективний напрям розвитку сучасної сейсморозвідки.

Основою АВО-аналізу є модель шаруватого середовища і рівняння коефіцієнта відбиття $R(\theta)$ сейсмічної хвилі як функції кута падіння (θ) хвилі на відбивальну межу. Розв'язок задачі відбиття—заломлення для пружного ізотропного шаруватого середовища був запропонований Цьопрітцем на початку ХХ ст. [1]. У сейсморозвідці інтерес до розв'язку цієї задачі виник у 1960–1970 роках у зв'язку зі спробами визначення літологічного складу та проблемами прямих пошуків вуглеводнів [3, 12]. Увагу дослідників привернув той факт, що поведінка функції $R(\theta)$ для P -хвилі залежить не лише від контрасту густини і швидкості поширення хвилі на відбивальній межі, а й від співвідношення швидкостей P - і S -хвиль, оскільки у міру збільшення кута падіння θ все більша частка енергії падаючої P -хвилі перерозподіляється на формування обмінних хвиль PS [3, 12].

За традиційного підходу побудову моделі АВО-аналізу зводять до практичного використання лінійних апроксимацій рівняння Цьопрітца відносно контрастів швидкості і густини на відбивальній межі $\Delta V_p/V_p$, $\Delta V_s/V_s$, $\Delta\rho/\rho$, тобто ці апроксимації справедливі лише для слабконтрастного шаруватого середовища: $\Delta V_p/V_p \ll 1$, $\Delta V_s/V_s \ll 1$, $\Delta\rho/\rho \ll 1$ [1, 3, 5].

Кристалічний фундамент розглядають як один з перспективних об'єктів на пошуки вуглеводнів. Однак їх пошуки сейсмічними методами в кристалічному фундаменті пов'язані з істотними труднощами, зумовленими його значною не-

однорідністю за складом і будовою та приуроченістю до розущільнених зон різної генетичної природи [2, 4, 6, 7, 11, 13–15].

У статті розглянуто актуальну проблему оцінки інформативної можливості АВО-аналізу за максимального наближення апріорної моделі до реального середовища. Використання сучасних методів математичного моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей багатокомпонентного тріщинно-порово-кавернозного геологічного середовища дає змогу розширити можливості АВО-аналізу сейсмічних даних під час пошуків розущільнених зон у кристалічному фундаменті.

Математичне моделювання ефективних пружних та акустичних властивостей гранітних порід-колекторів. З метою оцінки можливостей АВО-аналізу проведено математичне моделювання ефективних пружних та акустичних властивостей гранітів із різною структурою пустотного простору. Одержані результати використано під час моделювання інтенсивності відбитих сейсмічних хвиль від газо- і нафтонасичених розущільнених зон у кристалічному фундаменті.

Колектори в гранітних масивах тяжіють як до зон еродованих вивітрилих порід (кора вивітрювання), так і до глибинних зон гідротермальної переробки, які можуть залягати на значній глибині від поверхні фундаменту. Зокрема, каолінізовані та цеолітизовані граніти характеризуються значною розущільненістю, яка проявляється у розвитку пористості, тріщинуватості і кавернозності [2, 4, 6, 7, 13, 14]. За даними електронно-мікроскопічних досліджень, каолінізовані породи характеризуються кавернозно-поровим типом пористості. Поперечний розмір пор 0,01–0,02 мм,

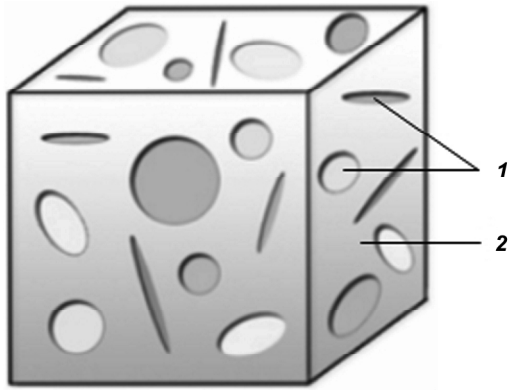


Рис. 1. Модель скелета багатокомпонентного порово-тріщинно-кавернозного кристалічного колектору нафти і газу: 1 – включення пустот різного формату; 2 – матриця

розмір каверн – 0,2–0,4 мм. Цеолітизовані породи можна віднести до колекторів порово-каверно-тріщинного типу. Розмір каверн в них становить 0,2–1,0 мм, розкритість тріщин сягає 0,05 мм.

Гідротермально перетворені гірські породи характеризуються значною міцністю твердого скелета, який складається з реліктових мінералів, зокрема кварцу.

Для вивчення структури пустотного простору гранітів застосовують апроксимацію форми пустоти еліпсоїдом обертання. Величину його формату оцінюють за допомогою співвідношення

$$\alpha = c / a, \quad (1)$$

де c , a – відповідно, півосі еліпсоїда вздовж і перпендикулярно осі обертання.

За даними електромікроскопічних досліджень [8, 10] кристалічних порід, величина формату α змінюється від 10^3 до 10^{-5} . Величина формату мікротріщин коливається в межах 10^{-2} – 10^{-5} . До каверн відносять пустоти, формат яких змінюється від 10^1 до 10^3 .

Для чисельних розрахунків ефективних акустичних властивостей порово-тріщинно-кавернозного гранітного колектору застосовували багатокомпонентну модель, яка містила пустоти різного формату і твердий скелет (матрицю) (рис. 1).

Методом умовних моментних функцій, із застосуванням розрахункової схеми Морі–Танака [10], розраховували ефективні пружні сталі й акустичні властивості моделі гранітного колектору.

Для визначення пружних сталей твердого скелета брали до уваги його мінеральний склад (табл. 1). Для нормальних гранітоїдів він змінюється у таких межах, %: кислий плагіоклаз (Pl) – 15–45; кварц (Q) – 25–40; калієвий польовий шпат (Kpsh) – 25–60; біотит (Bi) – 3–8. При чисельних розрахунках пружних модулів і швидкості поширення сейсмічних хвиль у моделях скелета (матриці) використовували осереднені пружні модулі породоутворювальних мінералів у наближенні Фойгта–Реуса–Хіла та густину (табл. 2).

Згідно з чисельними розрахунками швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль у моделях скелета граніту змінюються у досить вузьких межах: $V_p = 6,02$ – $6,13$ км/с, $V_s = 3,53$ – $3,66$ км/с; густина – $2,581$ – $2,625$ г/см³. Для нормальних гранітів (модель Нг-N) швидкість поширення поздовжньої хвилі становить $6,06$, поперечної – $3,59$ км/с, густина дорівнює $2,605$ г/см³. Інтервальний час у моделях скелета гранітів варіює в межах, мкс/м: ΔT_p – від 163 до 166, ΔT_s – від 273 до 283; для нормальних гранітів – $\Delta T_p = 165$, $\Delta T_s = 279$.

Вплив структури пустотного простору на швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль гранітного колектору досліджували на моделях з різним форматом пустот. За результатами чисель-

Таблиця 1. Кількісний мінеральний склад моделей твердого скелета граніту, %

Модель	KPsh	Pl	Bi	Q
Нг-1	60	15	0	25
Нг-2	25	45	5	25
Нг-3	50	18	2	30
Нг-4	35	35	0	30
Нг-5	32	30	8	30
Нг-6	35	25	5	35
Нг-7	40	18	2	40
Нг-N	40	27	3	30

Таблиця 2. Пружні властивості й густина породоутворювальних мінералів гранітів [17]

Мінерал	Модулі об'ємного стискування (K) і зсуву (G), ГПа		Густина, г/см ³
	K	G	
Калієвий польовий шпат	59,8	30,1	2,546
Плагіоклаз	55,1	29,7	2,610
Біотит	58,5	24,1	2,905
Кварц	38,3	44,6	2,649

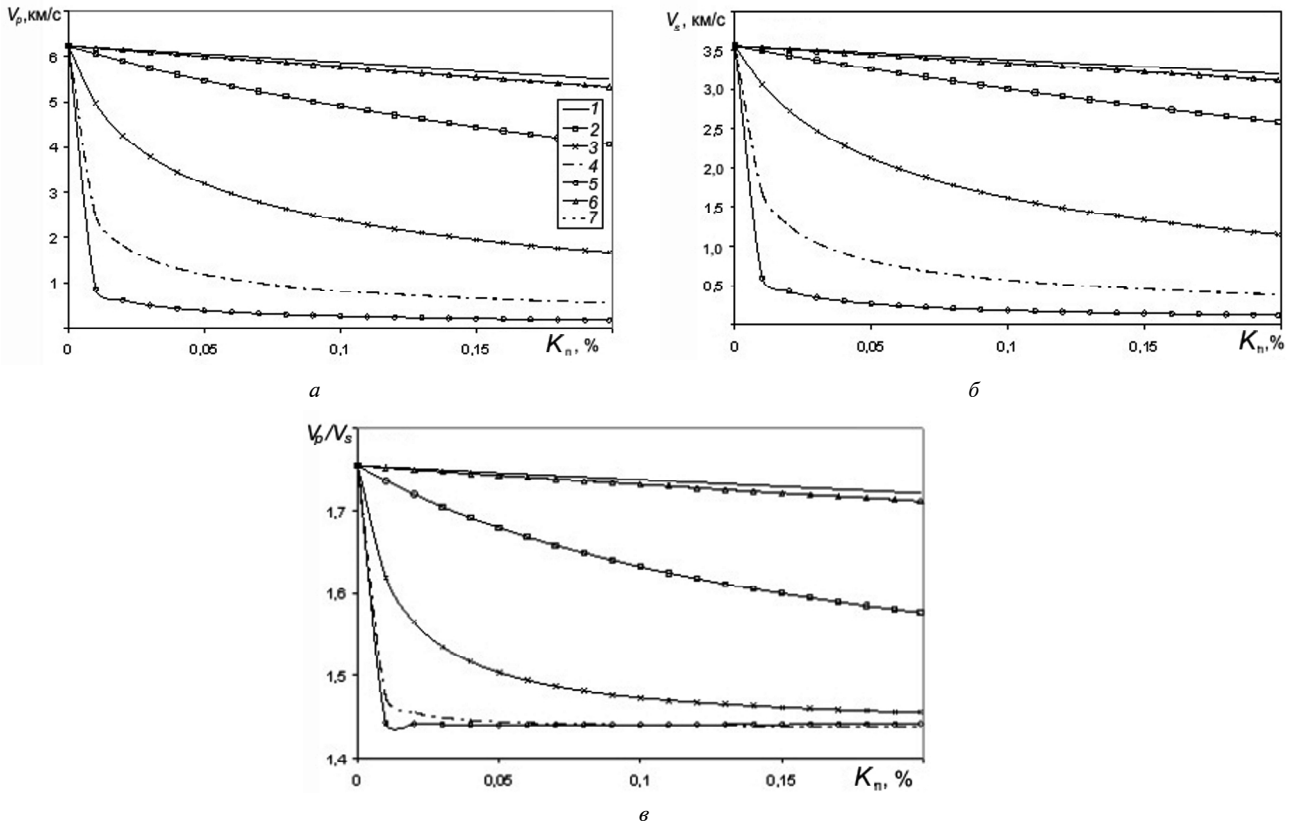


Рис. 2. Залежність швидкості поздовжніх (V_p) (а) і поперечних (V_s) (б) хвиль та відношення V_p/V_s (в) від коефіцієнта пористості (K_n) для моделей гранітного колектору з різним форматом пустот: 1 – $\alpha = 1$; 2 – $\alpha = 0,1$; 3 – $\alpha = 0,01$; 4 – $\alpha = 0,001$; 5 – $\alpha = 0,0001$; 6 – $\alpha = 10$; 7 – $\alpha = 100$

них розрахунків (рис. 2, а, б), швидкості поширення пружних хвиль значною мірою залежать від формату пустот. Для тріщинних гранітних колекторів найбільший вплив спостерігається в моделях з форматом $\alpha = 10^{-3} - 10^{-4}$. Зменшення швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль до аномально низьких значень викликає концентрація тріщин, значно менша за 1 %. Вплив каверн з форматом $\alpha = 10 - 10^3$ на швидкості хвиль набагато менший. Криві залежності цих параметрів лягають трохи нижче кривої для пористих гранітних колекторів з форматом $\alpha = 1$.

Чутливим індикатором типу колектору є відношення V_p/V_s , величина якого значно менша за 1,7

для колекторів-гранітів тріщинного типу (рис. 2, в). Порові і кавернозні гранітні колектори за величиною цього параметра розрізняються набагато менше.

За даними електронно-мікроскопічних досліджень, у гранітах спостерігаються неперервні розподіли пустот різного формату, які, в свою чергу, спричиняють суттєво складнішу залежність швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль від коефіцієнта пористості. У зв'язку з цим для подальших досліджень була запропонована модель порово-тріщинно-кавернозного колектору (рис. 3). На діаграмі розподілу форматів спостерігаються три максимуми, які відповідають тріщинним, по-

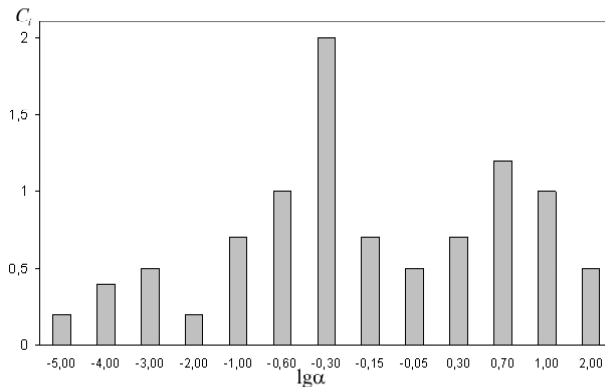


Рис. 3. Діаграма розподілу концентрацій (C_i) форматів пустот для порово-тріщинно-кавернозного колектору: $\sum_{i=1}^N C_i = K_n + K_t + K_{кв}$, де K_n – коефіцієнт міжзернової пористості; K_t – коефіцієнт тріщинної пористості; $K_{кв}$ – коефіцієнт кавернозної пористості

ровим і кавернозним колекторам. Модель порово-тріщинно-кавернозного гранітного колектору являє собою матрицю, яка прорізана пустотами різного формату (див. рис. 1).

Для чисельних розрахунків ефективних пружних і акустичних властивостей порово-тріщинно-кавернозного гранітного колектору прийнято такі параметри:

- 1) пружні сталі та густина матриці: $K = 51,11$ ГПа, $G = 33,52$ ГПа, $\rho = 2,604$ г/см³;
- 2) пружні сталі та густина нафти, що заповнює пустотний простір: $K = 1,94$ ГПа, $G = 0$, $\rho = 0,88$ г/см³;
- 3) пружні сталі та густина газу, що заповнює пустотний простір: $K = 0,00015$ ГПа, $G = 0$, $\rho = 0$.

В результаті чисельних розрахунків ефективних пружних і акустичних властивостей порово-тріщинно-кавернозного гранітного колектору методом умовних моментів, із застосуванням схеми Морі–Танака, одержані пружні модулі й швидкості:

- для гранітного колектору, насиченого газом: $K = 4,37$ ГПа, $G = 5,29$ ГПа, $\rho = 2,29$ г/см³, $V_p = 2,23$ км/с, $V_s = 1,52$ км/с, $V_p/V_s = 1,47$, $K_n = 12,04$ %;
- для гранітного колектору, насиченого нафтою: $K = 33,49$ ГПа, $G = 7,35$ ГПа, $\rho = 2,396$ г/см³, $V_p = 4,25$ км/с, $V_s = 1,75$ км/с, $V_p/V_s = 2,43$, $K_n = 12,04$ %.

Математичне моделювання коефіцієнтів відбиття поздовжніх хвиль від розуцільнених газо- і нафтонасичених зон у гранітах. Прийнята для математичного моделювання шарувата модель включає верхній шар – розуцільнене газо- або нафтонасичене середовище, та нижній шар – в усіх випадках монолітні ізотропні граніти. Таким чином, розглянемо випадки: 1) ізотропна орієнтація тріщин; 2) анізотропна односпрямована орієнтація тріщин.

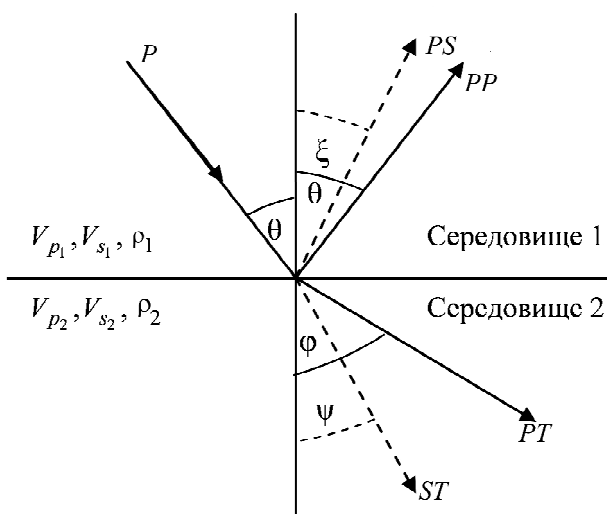


Рис. 4. Відбиття і заломлення плоских хвиль за падіння поздовжньої хвилі на відбивальну межу

1. *Ізотропний випадок.* З метою математичного моделювання довільної орієнтації газо- і нафтонасичених тріщин гранітного колектору використовували формулу Цюпрітца для коефіцієнта відбиття поздовжньої хвилі $R_{pp}(\theta)$ [1] (рис. 4):

$$R_{pp} = \left[\left(b \frac{\cos \theta}{V_{p_1}} - c \frac{\cos \phi}{V_{p_2}} \right) - \left(a + d \frac{\cos \theta \cos \psi}{V_{p_1} V_{s_2}} \right) H_p^2 \right] / D, \quad (2)$$

де

$$a = \rho_2 (1 - 2V_{s_2}^2 p^2) - \rho_1 (1 - 2V_{s_1}^2 p^2);$$

$$b = \rho_2 (1 - 2V_{s_2}^2 p^2) + 2\rho_1 V_{s_1}^2 p^2;$$

$$c = \rho_1 (1 - 2V_{s_1}^2 p^2) + 2\rho_2 V_{s_2}^2 p^2;$$

$$d = 2(\rho_2 V_{s_2}^2 - \rho_1 V_{s_1}^2);$$

$$D = EF + GHp^2;$$

$$E = b \frac{\cos \theta}{V_{p_1}} + c \frac{\cos \phi}{V_{p_2}}; \quad F = b \frac{\cos \xi}{V_{s_1}} + c \frac{\cos \psi}{V_{s_2}};$$

$$G = a - d \frac{\cos \theta \cos \psi}{V_{p_1} V_{s_2}}; \quad H = a - d \frac{\cos \phi \cos \xi}{V_{p_2} V_{s_1}};$$

V_{p_1} , V_{s_1} , ρ_1 – швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль та густина у перекривній товщі (розуцільнена зона насичена газом або нафтою); V_{p_2} , V_{s_2} , ρ_2 – швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль та густина у підстилаючій товщі (монолітні граніти); θ – кут падіння і відбиття відбитої P -хвилі; ϕ – кут заломлення P -хвилі; ξ – кут відбиття S -хвилі; ψ – кут заломлення S -хвилі; p – променевий параметр, величину якого визначають згідно із законом Снелліуса [1]:

$$p = \frac{\sin \theta}{V_{p_1}} = \frac{\sin \phi}{V_{p_2}} = \frac{\sin \xi}{V_{s_1}} = \frac{\sin \psi}{V_{s_2}}. \quad (3)$$

Розглянемо випадок впливу на коефіцієнт $R_{pp}(\theta)$ ізотропного розподілу пустот різного формату газо- і нафтонасичених. Результати моделювання представлені на рис. 5. Як видно з наведених даних, на величину коефіцієнта $R_{pp}(\theta)$ значний вплив має формат тріщин α .

Відомо, що за виконання умови $V_{p_2} > V_{p_1}$ у рівнянні (2) поздовжня хвиля не поширюватиметься у підстилаючому горизонті при куті падіння θ більшому, ніж $\theta_{\text{кр}} = \arcsin(V_{p_1}/V_{p_2})$. Ця особливість відображається на кривих $R_{pp}(\theta)$ у вигляді екстремумів (зокрема, перші максимуми на кривих 3–5 рис. 5, а). Поява другого максимуму на кривих задовольняє умові $\theta = \arcsin(V_{p_1}/V_{s_2})$. Якщо формат тріщин зменшується, 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 околі кутів падіння 7–50°.

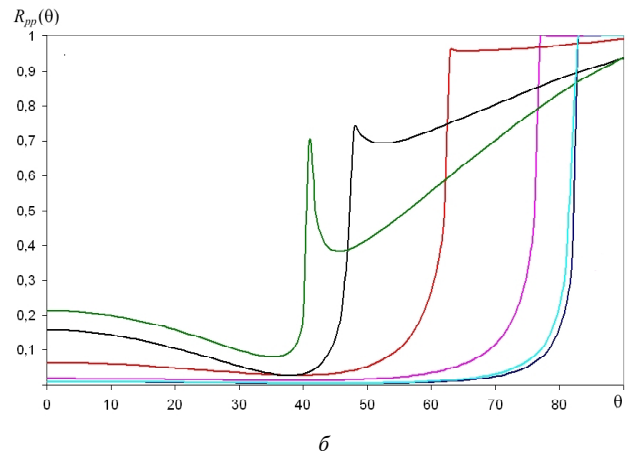
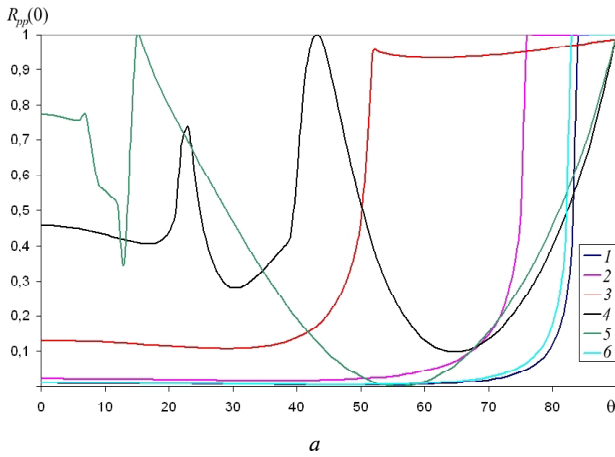


Рис. 5. Вплив структури пустотного простору на коефіцієнт відбиття поздовжньої хвилі розушільненої зони з пустотами різного формату, насиченими газом (а) і нафтою (б): 1 – $\alpha = 0,9$; 2 – $\alpha = 0,1$; 3 – $\alpha = 0,01$; 4 – $\alpha = 0,001$; 5 – $\alpha = 0,0001$; 6 – $\alpha = 10$

В разі насичення гранітного колектору нафтою всі ці особливості зміщуються в область кутів падіння понад 40° . У цьому випадку апроксимацію кривих $R_{pp}(\theta)$ можна вважати задовільною (рис. 5, б). Розглянемо це детальніше, користуючись тричленною апроксимацією Шюе [5, 16]:

$$R_{pp}(\theta) \approx A + G \sin^2 \theta + C \frac{\sin^4 \theta}{1 - \sin^2 \theta}, \quad (4)$$

де

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_p}{\bar{V}_p} \right); \quad C = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{\bar{V}_p};$$

$$G = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{\bar{V}_p} - 4 \frac{\Delta \bar{V}_s^2}{\bar{V}_p^2} \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_s}{\bar{V}_s} \right);$$

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1; \quad \Delta V_p = V_{p_2} - V_{p_1}; \quad \Delta V_s = V_{s_2} - V_{s_1};$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2); \quad \bar{V}_p = \frac{1}{2}(V_{p_1} + V_{p_2}); \quad \bar{V}_s = \frac{1}{2}(V_{s_1} + V_{s_2});$$

A – AVO-інтерсепт – значення коефіцієнта відбиття за нормального падіння (R_0), з точністю до постійного множника R_0/A ; G – градієнт залежності $R_{pp}(\theta)$ при $\theta = 0$, який називають AVO-градієнтом; C – AVO-кривизна.

В AVO-аналізі для практичного застосування найпопулярнішою є двочленна апроксимація Шюе [5]:

$$R_{pp}(\theta) \approx A + G \sin^2 \theta. \quad (5)$$

На рис. 6 видно, що для двочленної апроксимації найкраще наближення одержано у випадку газо- і нафтонасичених міжзернових пустот і каверн. Для тріщинних гранітних колекторів достатньо надійна апроксимація спостерігається лише у разі насичення тріщин нафтою. AVO-атрибути A , G , C виявилися дуже чутливими до зміни формату пустот (табл. 3). Різниця між газо- та нафтонасиченими гранітними колекторами дуже велика для тріщинуватих різновидів з форматами $\alpha = 0,01$; $0,001$; $0,0001$, для міжзернових пор ($\alpha = 0,1$; $0,9$) і каверн ($\alpha = 10$) ця різниця дуже мала.

2. *Анізотропний випадок.* Якщо тріщини мають певну просторову орієнтацію, то на коефіцієнт відбиття дуже впливає анізотропія. Обговоримо найцікавіші, з точки зору практики, випадки системи тріщин, які належать до поперечно-ізотропної симетрії.

Основні типи поперечно-ізотропної симетрії гранітних колекторів розглянемо згідно із напрям-

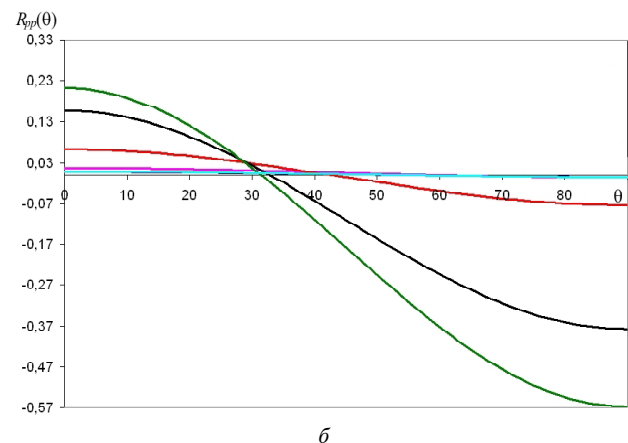
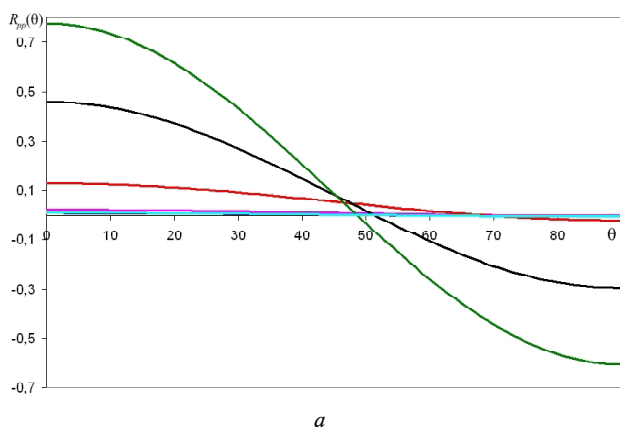


Рис. 6. Вплив структури пустотного простору на двочленне наближення Шюе $R_{pp}(\theta)$ для розушільненої зони з пустотами різного формату, насиченими газом (а) і нафтою (б). Умовні позначення див. на рис. 5

Таблиця 3. AVO-атрибути газо- і нафтонасичених гранітних колекторів із різною структурою порового простору

Формат пустот α	A	G	C
10	<u>0,0102</u>	<u>-0,0148</u>	<u>0,0041</u>
	0,009	-0,0142	0,0047
0,9	<u>0,0092</u>	<u>-0,0134</u>	<u>0,0031</u>
	0,0081	-0,0131	0,0038
0,1	<u>0,0216</u>	<u>-0,0240</u>	<u>0,0154</u>
	0,0176	-0,0239	0,0134
0,01	<u>0,1299</u>	<u>-0,1502</u>	<u>0,1237</u>
	0,0623	-0,1358	0,0581
0,001	<u>0,4592</u>	<u>-0,7537</u>	<u>0,4530</u>
	0,1571	-0,5341	0,1529
0,0001	<u>0,7772</u>	<u>-1,3823</u>	<u>0,7710</u>
	0,2124	-0,7800	0,2082

Примітка. Тут і в табл. 4 над рискою – газонасичені, під рискою – нафтонасичені гранітні колектори.

ком просторової орієнтації головної осі симетрії (вісь ∞ -порядку) в просторі. Якщо головна вісь орієнтована вертикально, то таку модель тріщинуватого колектору називатимемо вертикальним поперечно-ізотропним середовищем (ВТІ), а за її горизонтальній орієнтації – горизонтальним поперечно-ізотропним середовищем (НТІ) [3, 16, 17]. Для математичного моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей гранітних колекторів методом умовних моментних функцій були вибрані такі вихідні параметри: формат односторонньо орієнтованих уздовж осі x_1 або осі x_2 пустот з форматом $\alpha = 0,009$ і концентрацією 0,54 %. Пружні сталі ізотропної матриці моделі ГПа: $C_{11} = 97,79$; $C_{44} = 33,52$; $C_{12} = 28,75$.

Результати чисельних розрахунків ефективних пружних сталей для газо- і нафтонасичених гранітних колекторів з різними системами тріщин наведені в табл. 4. Коефіцієнт акустичної анізотропії для газонасичених колекторів виявився значно більшим [8–10]: $A_{\mu} = 16,6\%$ для ВТІ, насиченої газом, і $A_{\mu} = 6,19\%$ для НТІ, насиченої нафтою. З метою чисельних розрахунків коефіцієнта відбиття хвиль поздовжньої поляризації для моделей із вертикальною системою тріщин була використана така апроксимація [17, 18]:

$$R_{pp}^{VTI}(\theta) = \frac{1}{2} \frac{\Delta z}{\bar{z}} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta V_{p_0}}{\bar{V}_{p_0}} - \left(\frac{2\bar{V}_{s_0}}{\bar{V}_{p_0}} \right)^2 \frac{\Delta G}{\bar{G}} + \Delta\delta \right\} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta V_{p_0}}{\bar{V}_{p_0}} + \Delta\epsilon \right\} \sin^2 \theta \cdot \text{tg}^2 \theta,$$

де

$$z = \rho V_{p_0}, \quad G = \rho V_{s_0}^2, \quad V_{p_0} = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}, \quad V_{s_0} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}},$$

$$\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1, \quad \Delta\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1,$$

$$\delta^{(v)} = \frac{(C_{13}^{(v)} + C_{44}^{(v)})^2 - (C_{33}^{(v)} - C_{44}^{(v)})^2}{2C_{33}^{(v)}(C_{33}^{(v)} - C_{44}^{(v)})}, \quad \epsilon^{(v)} = \frac{C_{11}^{(v)} - C_{33}^{(v)}}{2C_{33}^{(v)}},$$

$$v = 1, 2.$$

У випадку горизонтально орієнтованої системи тріщин (ПХ1) для чисельних розрахунків коефіцієнта відбиття була використана формула [17, 18, 32]

$$R_{pp}^{HTI}(\theta, \eta) = \frac{1}{2} \frac{\Delta z}{\bar{z}} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta V_{p_0}}{\bar{V}_{p_0}} - \left(\frac{2\bar{V}_{s_0}}{\bar{V}_{p_0}} \right)^2 \frac{\Delta G}{\bar{G}} + \left[\Delta\delta + 2 \left(\frac{2\bar{V}_{s_0}}{\bar{V}_{p_0}} \right)^2 \Delta\gamma \right] \cos^2 \eta \right\} \times$$

$$\times \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta V_{p_0}}{\bar{V}_{p_0}} + \Delta\epsilon^{(v)} \cos^4 \eta + \Delta\delta^{(v)} \sin^2 \eta \cos^2 \eta \right\} \times$$

$$\times \sin^2 \theta \cdot \text{tg}^2 \theta,$$

де

$$\Delta\delta^{(v)} = \delta_2^{(v)} - \delta_1^{(v)}, \quad \Delta\epsilon^{(v)} = \epsilon_2^{(v)} - \epsilon_1^{(v)}, \quad \Delta\gamma^{(v)} = \gamma_2^{(v)} - \gamma_1^{(v)},$$

$$\delta_1^{(v)} = \frac{(C_{13}^{(v)} + C_{55}^{(v)})^2 - (C_{33}^{(v)} - C_{55}^{(v)})^2}{2C_{33}^{(v)}(C_{33}^{(v)} - C_{55}^{(v)})},$$

Таблиця 4. Результати математичного моделювання ефективних пружних сталей гранітних колекторів з вертикальною і горизонтальною системою газо- та нафтонасичених тріщин

Газонасичений/нафтонасичений колектор	Пружні сталі C_{mn} , ГПа						ρ , г/см ³
	C_{11}	C_{33}	C_{44}	C_{66}	C_{12}	C_{13}	
Вертикальна система тріщин (ПХ ₃)	<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
Горизонтальна система тріщин (ПХ ₁)	<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

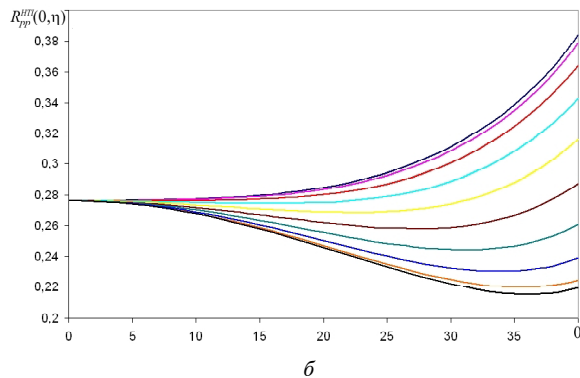
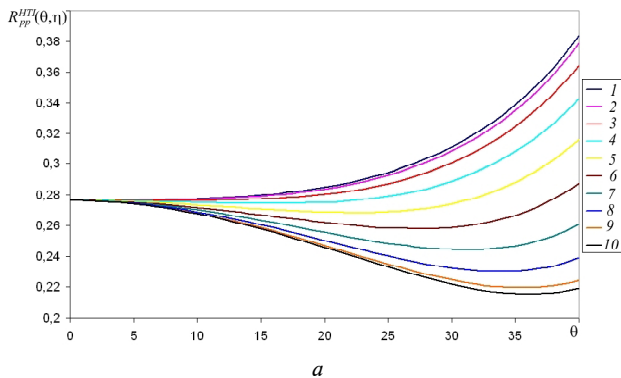


Рис. 7. Залежність коефіцієнта відбиття $R_{pp}^{HPI}(\theta, \eta)$ газо- (а) і нафтонасиченого (б) гранітного колектору з горизонтально орієнтованою тріщинуватістю (ПХ₁) від кута падіння (θ) за різних азимутів: 1 – $\eta = 0^\circ$; 2 – $\eta = 10^\circ$; 3 – $\eta = 20^\circ$; 4 – $\eta = 30^\circ$; 5 – $\eta = 40^\circ$; 6 – $\eta = 50^\circ$; 7 – $\eta = 60^\circ$; 8 – $\eta = 70^\circ$; 9 – $\eta = 80^\circ$; 10 – $\eta = 90^\circ$

$$\varepsilon_1^{(v)} = \frac{C_{11}^{(v)} - C_{33}^{(v)}}{2C_{33}^{(v)}}, \quad \gamma^{(v)} = \frac{C_{44}^{(v)} - C_{60}^{(v)}}{2C_{66}^{(v)}},$$

$$V_{p0} = \sqrt{C_{33}/\rho}, \quad V_{s0} = \sqrt{C_{55}/\rho}.$$

На рис. 7 представлені азимутальні залежності коефіцієнта відбиття для газо- і нафтонасичених гранітних колекторів для горизонтально орієнтованих тріщин (ПХ₁). Спостерігаються зміни градієнтів кривих, лише за нормального падіння криві збігаються. Контрасти параметрів анізотропії $\Delta\delta^{(v)}$ та $\Delta\varepsilon^{(v)}$ впливають на AVO-градієнт.

У випадку вертикально орієнтованих тріщин (рис. 8) розрізнення газо- і нафтонасичених гранітних колекторів може бути здійснено достатньо впевнено. Проведення 3 D сейсмозв'язки 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 для пошуків і розвідки розушльнених газо- і нафтонасичених зон у кристалічному фундаменті. Проте використання апроксимацій залежності коефіцієнта відбиття від кута падіння потребує спеціального обґрунтування. Це пояснюється

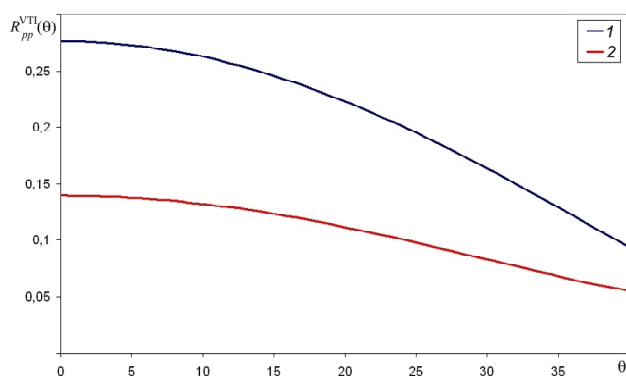


Рис. 8. Залежність коефіцієнта відбиття $R_{pp}^{VTI}(\theta)$ газо- (1) та нафтонасиченого (2) гранітного колектору із вертикальною орієнтацією тріщин (ПХ₃) від кута падіння (θ)

значним впливом на коефіцієнт відбиття структури пустотного простору. Врахування впливу анізотропії на коефіцієнт відбиття дає можливість оцінки просторової орієнтації тріщин і параметрів пружної анізотропії. Застосування багатокомпонентної апіорної моделі кристалічного колектору і сучасних методів математичного моделювання ефективних пружних і акустичних параметрів відкриває нові можливості для визначення газо- і флюїдонасичення та структури пустотного простору в результаті розв'язання задачі інверсії.

1. Аки К. Количественная сейсмология / К. Аки., П. Ричардс. Т. 1. – М.: Мир, 1983. – 519 с.
2. Багдасаров М.В. Роль гидротермальных процессов при формировании коллекторов нефти и газа / М.В. Багдасаров // Геология нефти и газа. – 1992. – № 9. – С. 42–46.
3. Воскресенский Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. – М.: Изд-во РГУ нефти и газа, 2001. – 68 с.
4. Дмитриевский А.Н. Влияние гидротермальной деятельности на формирование коллекторов нефти и газа / А.Н. Дмитриевский, Ф.А. Киреев, Р.А. Бочко, Т.А. Федорова // Изв. РАН. Сер. Геология. – 1992. – № 5. – С. 119–128.
5. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. – Тверь: ГЕРС, 2006. – 479 с.
6. Лукин А.Е. О перспективах газоносности Прикерченского шельфа // Геол. журн. – 2008. – № 2. – С. 7–20.
7. Попков В.И. Модель резервуара нефтяной залежи в гранитном массиве / В.И. Попков, А.А. Рабинович, Н.И. Туров // Геология нефти и газа. – 1986. – № 8. – С. 27–30.
8. Продайвода Г.Т. Теоретичні основи сейсмоакустики нетрадиційних резервуарів нафти і газу // Наук. зап. АН ВШ України. – 1999. – Вип. 2. – С. 165–177.
9. Продайвода Г.Т. Исследование упругих постоянных гранитоидов и анизотропии распространения объемных упругих волн в них / Г.Т. Продайвода, К.С. Александров, С.А. Выжва // Геофиз. журн. – 2001. – Т. 23, № 2. – С. 31–56.
10. Продайвода Г.Т. Математичне моделювання геофізич-

- них параметрів / Г.Т. Продайвода, С.А. Вижва. – К., 1999. – 112 с.
11. *Продайвода Г.Т.* AVO-аналіз та інверсія сейсмічних даних як спосіб підвищення ефективності морської сейсморозвідки під час пошуків нафти і газу / Г.Т. Продайвода, П.М. Кузьменко // *Геоінформатика*. – 2010. – № 1. – С. 39–49.
 12. *Пузырев Н.Н.* Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн / Н.Н. Пузырев, А.В. Тригубов, Л.Ю. Бродов и др. – М.: Недра, 1985. – 277 с.
 13. *Чабаненко И.И.* Нефтегазоперспективные объекты Украины. Нефтегазоносность фундамента осадочных бассейнов / И.И. Чабаненко, В.А. Краюшкин, В.П. Клочко и др. – Киев, 2002. – 294 с.
 14. *Шахновский И.М.* Формирование залежей нефти и газа в нетрадиционных резервуарах // *Геология нефти и газа*. – 1997. – № 9. – С. 38–41.
 15. *Шустер В.Л.* Нефтегазоносность кристаллического фундамента // Там же. – 1997. – № 8. – С. 17–19.
 16. *Shuey R.T.* A simplification of the Zoeppritz equations // *Geophysics*. – 1985. – Vol. 50, № 4. – P. 609–614.
 17. *Rüger A.P.* P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry // *Ibid.* – 1997. – Vol. 62, № 3. – P. 713–722.
 18. *Rüger A.P.* Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media // *Ibid.* – 1998. – Vol. 63, № 3. – P. 935–947.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Надійшла до редакції 26.06.2012 р.

С.А. Вижва, Г.Т. Продайвода, П.М. Кузьменко, О.А. Козинова

AVO-АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ РАЗУПЛОТНЕННЫХ ЗОН КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА (РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Рассматривается актуальная проблема оценки информационных возможностей AVO-анализа путем максимального приближения априорной модели к реальной среде. Использование современных методов математического моделирования эффективных упругих и акустических свойств многокомпонентной трещинно-порово-кавернозной геологической среды позволяет расширить возможности AVO-анализа сейсмических данных при поисках разуплотненных зон в кристаллическом фундаменте. 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. Однако значительное влияние структуры порового пространства на коэффициент отражения требует специального обоснования. При учете влияния анизотропии на коэффициент отражения открывается возможность оценки пространственной ориентации трещин и параметров упругой анизотропии.

Ключевые слова: AVO-анализ, сейсмические данные, разуплотненные зоны, кристаллический фундамент.

S.A. Vyzhva, G.T. Prodaivoda, P.M. Kuzmenko, O.O. Kozionova

AVO-ANALYSIS OF SEISMIC DATA OF CRYSTALLINE BASEMENT DECONSOLIDATION ZONE (RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING)

The article reviews an actual problem of informative possibility of AVO-analysis based on synthetic model with close approximation to the real geological media. Application state-of-the-art methods of mathematical modeling of effective elastic and acoustic properties of multi-cracked porous-cavernous geological media expand the possibility of AVO-analysis to explore deconsolidated zones in crystalline basement. 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. But a significant impact of crack-porous structure, cavernous space on the reflection coefficient requires special foundation. An opportunity assessment of spatial orientation of cracks and elastic anisotropy parameters is possible when taking into account the influence of anisotropy on the reflection coefficient.

Keywords: AVO-analysis, seismic data, deconsolidated zones, crystalline basement.