

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕКТОНОФАЦІЙ МЕТАМОРФІЧНИХ ПОРІД ЕПІЗОНИ КРИВБАСУ

© Г.Т. Продайвода, С.А. Вижва, Д.А. Безродний, І.М. Безродна, 2009

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Influence of fragile deformations on the acoustic and elastic parameters of anisotropy is considered on the models of "biotitic quartzite", which are characterized by different systems of orientation of mikrocracks and minerals, and on the model of the combined systems of "ferrous quartzite". It is set that, with the growth of the level of deformation transformations in conditions of epizone, parameters of anisotropy change, in particular, the parameters of integral and differential coefficients of acoustic and clastic anisotropy grow, but in a different measure. This can serve as a reliable indicator while determining the mark of tectonic facies.

Вступ. Протягом останніх років все більше зростає інтерес до вивчення сейсмічної анізотропії земних надр. Ці дослідження становлять інтерес для вирішення завдань структурної геології і тектонофізики. Математичне моделювання на основі даних петроакустичних досліджень відкриває нові додаткові можливості для тектонофаціального аналізу складнодеформованих порід.

Дослідження природи метаморфічних порід Криворіжжя ґрунтуються на парагенетичній основі, що враховує *PT*-умови та реологічні властивості (характер деформації за тривалої дії напружень) середовищ, а також відповідні цим властивостям механізми дислокаційних перетворень порід [1]. При цьому використовується уявлення про структурно-реологічні умови – катазону, мезозону та епізону. Подібні умови певною мірою співвідносяться з відомими петрологічними зонами Грубенмана [2]. Проте від останніх відрізняються тим, що для їх розрізнення насамперед враховують реологічні фактори. *Епізона* є холодним середовищем, термальні умови якого нижчі за кінематичний поріг метаморфічних реакцій. Ця зона є дуже контрастною у в'язкісному відношенні: в її сферу впливу потрапляють як слабо й помірно літифіковані осадові породи (*первинна епізона*), так і охолоджені кристалічні породи, що в момент дислокаційних перетворень розміщувалися біля поверхні (*вторинна епізона*).

За даними тектонофаціального аналізу [3, 4] встановлено, що в Кривбасі крім добре вивченої крихкої розривної тектоніки широко розвинена і в'язка тектоніка, яка тісно пов'язана із зональним метаморфізмом. Порооди басейну зазнавали неодноразових тектонічних деформацій, що тою чи іншою мірою відбивалось у структурах і текстах цих порід [5–7].

Результати ультразвукових досліджень гірських порід (К.С. Александров, Б.П. Беліков, М.П. Воларович, Є.І. Баяк, Ф.Ф. Горбацевич,

В.С. Мілеєв, Г.Т. Продайвода, Т.Ф. Ригова, А.О. Шабанова) свідчать, що упорядкованість структурних елементів текстур гірських порід спричиняє азимутальну анізотропію швидкостей поширення різних типів пружних хвиль.

Наявність пружної анізотропії засвідчує існування в гірських породах, на різних структурних рівнях, упорядкованості різноманітної фізичної природи. Типи упорядкованості визначають за механізмом деформації і тектонічним режимом формування гірських порід.

Для з'ясування впливу тектонічних деформацій на анізотропію акустичних і пружних властивостей метаморфічних порід епізони Кривбасу проведено математичне моделювання ефективних пружних сталей з використанням багатокомпонентної моделі, максимально наближеної до будови реальних текстур порід, що зазнали неодноразових незворотних деформацій, а також техногенного впливу під час буріння свердловини і релаксації напружень з розвантаженням керна.

Для чисельних розрахунків ефективних пружних і акустичних властивостей моделі було застосовано метод умовних моментних функцій із використанням розрахункової схеми Морі–Танака [8–11].

Багатокомпонентна модель деформованої текстури гірської породи є матричною моделлю (твердим скелетом) із орієнтованими включеннями у вигляді сфероїдів різного формату: $\alpha = \frac{c}{a}$ (тут c , a – коротка і довга осі сфероїда). Кристаліграфічні осі сфероїдальних зерен породоутворювальних мінералів були орієнтовані вздовж осей сфероїда. Мікротріщини моделювали сфероїдами формату $\alpha = 10^{-1} \div 10^{-4}$. Це забезпечило можливість моделювання практично всіх типів текстур метаморфічних порід Кривбасу.

Теорія методу. Для визначення ефективних пружних сталей C_{mn}^* застосовано метод умовних моментних функцій. Для розв'язку поставленої

задачі необхідно знайти залежність між середніми деформаціями у включенні, орієнтованому в n -му напрямку $\varepsilon^{(i)}$, і макроскопічними деформаціями матриці $\varepsilon^{(m)}$:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{(in)} &= \langle \varepsilon \rangle + C_m d_i Z_i \varepsilon^{(m)}, \quad f_i = C^{(i)} - C^{(0)}, \\ d_i &= C^{(i)} - C^{(m)}, \quad Z_i = (I - G^{(i)} f_i)^{-1} G^{(i)}, \end{aligned} \quad (1)$$

де C_m – об'ємна концентрація матриці; $C^{(i)}$ – пружні сталі i -го включення; $C^{(m)}$ – пружні сталі матриці; $C^{(0)}$ – пружні сталі тіла порівняння.

Здійснивши операцію осереднення можливих орієнтацій включень за усіма Ω , можна знайти залежність між середніми деформаціями включень $\varepsilon^{(i)}$ і скелета $\varepsilon^{(m)}$ та макроскопічними деформаціями $\bar{\varepsilon}$:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{(i)} &= A_i \bar{\varepsilon}; \quad \varepsilon^{(m)} = A_m \bar{\varepsilon}; \\ A_i &= A_m (I + \bar{Z}^{(i)} d_i); \\ A_m &= (I + c_i \bar{Z}^{(i)} d_i)^{-1}; \\ \bar{Z}_i &= \langle Z_i \rangle_{\Omega}, \end{aligned} \quad (2)$$

де кутовими дужками з індексом Ω позначена операція статистичного осереднення за кількістю можливих орієнтацій включень. Відмінна риса запропонованого методу полягає в осередненні алгебричних компонентів тензора \bar{Z}_i за допомогою функції розподілу орієнтації включень:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{ijpq}^{(i)} &= \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} a_{im} a_{jn} a_{ps} a_{qt} Z_{mnst}^{(i)} f^{(i)}(\varphi_1, \Theta, \varphi_2) d\varphi_1 \sin \Theta d\Theta d\varphi_2, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\varphi_1, \Theta, \varphi_2$ – ейлерові кути; $f^{(i)}(\varphi_1, \Theta, \varphi_2)$ – функція розподілу орієнтації i -го включення, що розкладається в ряд за узагальненими сферичними функціями.

Взявши до уваги рівняння (2) і (3), можна знайти вираз для визначення ефективних пружних сталей C^* текстури гірської породи з довільною функцією розподілу орієнтації включень:

$$C^* = \sum_{r=1}^{N+1} c_r C_r A_r, \quad (4)$$

де N – кількість включень ($r = 1, \dots, N$).

Для обчислення невідомих моментів розкладання функції розподілу $W_{lmn}^{(i)}$ i -го включення використано метод інверсії азимутальної залежності ефективних фазових швидкостей квазіпоздовжних і квазіпоперечних хвиль текстурованої гірської породи.

Для оптимізації цільової функції $\Phi(x)$ застосували сучасні методи глобальної оптимізації цільової функції:

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^M (v_i^{(l)} - v_i^{(r)})^2, \quad (5)$$

де $v_i^{(l)}, v_i^{(r)}$ – експериментальні фазові швидкості поширення квазіпоздовжних (квазіпоперечних)

хвиль та обчислені за допомогою експериментальних значень ефективних пружних сталей гірської породи, отриманих методом умовних моментних функцій, на r -му кроці ітерації; x – вектор невідомих коефіцієнтів розвинення функцій розподілу орієнтації мінералів і мікротріщин.

Для розрахунку полюсних діаграм розподілу орієнтацій кристалографічних осей мінералів і мікротріщин було використано рівняння

$$\begin{aligned} q(\varphi, \Theta) &= \sum_{l=0}^4 \sum_{m=-l}^l \Omega_{lm} P_l^m(\cos \Theta) e^{-im\varphi}, \\ \Omega_{lm} &= 2\pi \left(\frac{2}{2l+1}\right)^{1/2} \sum_{n=-l}^l W_{lmn} P_l^n(\cos \eta) e^{in\Phi}, \end{aligned} \quad (6)$$

де W_{lmn} – коефіцієнти розвинення функції розподілу орієнтації мінералів і мікротріщин; $P_l^m(\cos \Theta)$, $P_l^n(\cos \eta)$ – нормалізовані приєднані поліноми Лежандра; φ, Θ – сферична система координат у базисі гірської породи; η, Φ – сферична система координат у кристалофізичному базисі.

Результати чисельних розрахунків. Вплив різних систем орієнтації тріщин на ефективні акустичні й пружні сталі та параметри анізотропії об'ємних пружних хвиль метаморфічних гірських порід Криворіжжя в умовах епізони розглянуто на прикладі трьох моделей кварциту біотитового і моделі “Залістий кварцит”.

Розглянуто математичні моделі тектонофацій епізони (крихкі деформації) із різними системами орієнтації мікротріщин у породі:

- одної системи (модель I);
- двох ортогональних (модель II);
- трьох ортогональних (модель III);
- лінійної орієнтації і двох систем ортогональних тріщин (модель IV).

Модель I. Кварцит біотитовий з однією системою тріщин. Мінеральний склад моделі, %: кварц – 88; біотит – 12. Концентрацію односпрямованих мікротріщин, що були орієнтовані вздовж осі x_3 , змінювали від 2 % для тектонофації I епізони до 1 % для тектонофації V і 0,1 % для тектонофації X. При цьому формат сфероїдальних мікротріщин α приймали таким, що дорівнював 0,3 для тектонофації I і змінювався послідовно до 0,0005 для найвищої тектонофації X епізони.

Сфероїдальні зерна породоутворювальних мінералів кварцу і біотиту спочатку для тектонофацій I–IV (як у випадку катазони і мезозони) були орієнтовані хаотично з рівномірним їх розподілом уздовж координатних осей x_1, x_2, x_3 . Для вищих тектонофацій V–X моделювання ефективних акустичних і пружних сталей моделі V в умовах епізони було здійснено за збільшенням односпрямованої орієнтації зерен кварцу і біотиту вздовж осі x_3 від 40 % для тектонофації V до 90 % для тектонофації X.

Модель II. Кварцит біотитовий з двома системами ортогональних тріщин. Мінеральний склад

той самий, що і для моделі I. Тріщини орієнтовані вздовж осей x_1 і x_2 . Концентрацію мікротріщин змінювали від 2 % для тектонофації I епізони до 1,5 % для тектонофації V і 0,3 % для тектонофації X. Формат сфероїдальних мікротріщин приймали $\alpha = 0,3$ для тектонофації I і зменшували до $\alpha = 0,0005$ для найвищої тектонофації X епізони. Інші параметри моделі аналогічні параметрам моделі V.

Модель III. Кварцит біотитовий з трьома системами ортогональних тріщин. Мінеральний склад моделі незмінний, як і в попередніх двох моделях. Мікротріщини орієнтовані вздовж осей x_1 , x_2 і x_3 . Концентрацію мікротріщин змінювали від 3 % для тектонофації I епізони до 1,5 % для тектонофації V і 0,5 % для тектонофації X. Формат сфероїдальних мікротріщин приймали $\alpha = 0,3$ для тектонофації I і зменшували до $\alpha = 0,001$ для найвищої тектонофації X епізони. Інші параметри моделі аналогічні параметрам моделі V.

Модель IV. Залізистий кварцит в умовах крихких деформацій. Характеризує текстуру залізистого кварциту з двома системами ортогональних мікротріщин. Концентрацію ортогональних мікротріщин ζ змінювали від 4 % для тектонофації I епізони до 2,5 % для тектонофації V і 1,5 % для тектонофації X. При цьому формат сфероїдальних мікротріщин приймали $\alpha = 0,5$ для тектонофації I і змінювали послідовно до $\alpha = 0,005$ для найвищої тектонофації X епізони.

Сфероїдальні зерна породоутворювальних мінералів амфіболу і магнетиту спочатку для тектонофацій I–IV (як у випадку катазони і мезозони) були орієнтовані хаотично з рівномірним їх розподілом уздовж координатних осей x_1 , x_2 , x_3 . Для вищих тектонофацій V–X моделювання ефективних акустичних і пружних сталей моделі “залізистий кварцит” в умовах епізони було здійснено за умови збільшення односпрямованої орієнтації зерен мінералів уздовж осі x_3 від 50 % для тектонофації V до 95 % для тектонофації X.

Пружні сталі породоутворювальних мінералів, використаних для моделювання акустичної і пружної анізотропії тектонофацій, взято із праці [12].

Результати моделювання впливу крихких деформацій (умови епізони) на ефективні акустичні і пружні сталі та параметри анізотропії метаморфічних порід Криворіжжя розглянуто на прикладі наведених моделей.

За результатами математичного моделювання ефективних акустичних і пружних сталей моделі I у різних тектонофаціях епізони встановлено:

- акустична і пружна симетрія текстури моделі I – планальна ромбічна ($\mu_{11}^* > \mu_{22}^* > \mu_{33}^*$; $C_{11}^* > C_{22}^* > C_{33}^*$; $C_{44}^* = C_{55}^* < C_{66}^*$) для всіх без винятку тектонофацій епізони (див. таблицю);
- інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_μ мало змінюється для тектонофацій V–VIII

Ефективні пружні сталі для моделі I “Кварцит біотитовий з однією системою тріщин”

Акустичні константи і параметри акустичного еліпсоїда	Тектонофація					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
C_{11}	97,61	98,95	99,70	100,46	101,76	104,53
C_{22}	95,81	95,91	97,27	96,11	97,86	98,33
C_{33}	92,23	88,69	91,79	81,37	88,94	85,43
C_{44}	40,47	36,58	38,82	31,39	34,71	26,59
C_{55}	40,47	36,58	38,82	31,39	34,71	26,59
C_{66}	43,52	44,11	44,40	44,89	45,30	46,52
C_{12}	6,91	5,60	6,78	4,55	5,84	4,66
C_{13}	11,04	10,68	11,16	9,74	11,01	11,00
C_{23}	11,04	10,68	11,16	9,74	11,01	11,00
μ_{11}	67,10	67,20	65,83	66,50	64,60	64,90
μ_{22}	66,40	66,30	64,71	65,00	63,00	62,60
μ_{33}	64,00	62,20	59,30	57,90	52,70	50,60
A_μ	2,03	3,30	4,50	5,92	8,75	10,48
S_μ	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04
L_μ	1,04	1,06	1,09	1,12	1,20	1,24

(від 2 до 5,9 %) і трохи інтенсивніше зростає для вищих тектонофацій, досягаючи 10,5 % для тектонофації X епізони;

- швидкість поширення квазіпоздовжньої хвилі на стереопроєкціях вказівних поверхонь змінюється майже невідчутно від 6,0 км/с для тектонофації V до 6,10 км/с для тектонофації X. На відміну від умов катазони і мезозони [13], цей параметр пружної анізотропії змінюється неістотно. Якщо в умовах пластичних і пружнопластичних деформацій спостерігалася локалізація найменших значень швидкостей поширення квазіпоздовжніх хвиль у напрямку поширення пружної хвилі, в епізоні до цієї ділянки приурочений максимум швидкостей;
- максимальна різниця між “швидкою” і “повільною” поперечними модами квазіпоперечних хвиль збільшується від 0,21 км/с для тектонофації V до майже 1,1 км/с для тектонофації X. Ефекти розщеплення хвиль фактично збільшуються вп'ятеро. Для всіх стереопроєкцій можна виділити ділянки, де різниця швидкостей поширення “швидкої” і “повільної” квазіпоперечних хвиль дорівнює нулю і розщеплення хвиль відсутнє;
- максимальне значення диференціального коефіцієнта пружної анізотропії зростає від 2,8 % для тектонофації V до 15 % для тектонофації X епізони. Для всіх тектонофацій спостерігається узгодженість між значеннями інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії і середніми значеннями диференціального коефіцієнта пружної анізотропії. Для тектонофацій V–X існує особливий напрямок, який збігається з напрямком поширення хвильової нормалі, де коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії близький до нуля, а отже, закономірності поширення пружних хвиль у цьому напрямку не відрізняються від подібних закономірностей в ізотропному середовищі.

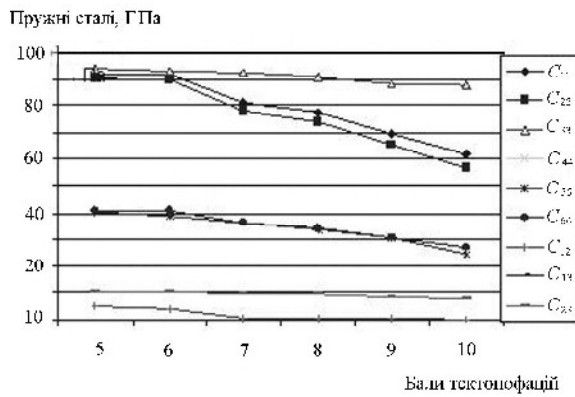


Рис. 1. Ефективні пружні сталі для моделі II "Кварцит біотитовий з двома системами ортогональних тріщин"

Для моделі II "Кварцит біотитовий з двома системами ортогональних тріщин" характерні планальна ромбічна акустична і пружна симетрія текстури ($\mu_{11}^* > \mu_{22}^* < \mu_{33}^*$) і такі співвідношення між пружними сталими: $C_{11}^* > C_{22}^* < C_{33}^*$; $C_{44}^* = C_{55}^* < C_{66}^*$ для всіх тектонофацій (рис. 1).

Інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_{μ} для тектонофацій V–VIII змінюється від 0,7 до 4,8 % і значно зростає для вищих тектонофацій, досягаючи 10,45 % для тектонофації X епізони. Зміни цього параметра акустичної анізотропії подібні до змін його для моделі I.

Проте, на відміну від моделі I, максимальна швидкість поширення квазіпоздовжньої хвилі зменшується від 5,9 км/с для тектонофації V до 5,5 км/с для тектонофації X. Порівняно з моделями катазони і мезозони [13] цей параметр пружної анізотропії змінюється не так відчутно. Спостерігається зменшення екстремумів – від 5 у тектонофації V до 1 для тектонофації X, який збігається з напрямком поширення пружної хвилі, як і для моделей кварциту біотитового з однією і двома системами ортогональних тріщин.

Різниця між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями збільшується від 0,12 км/с для тектонофації V до 0,35 км/с для тектонофації X, але ці зміни значно менші, ніж для моделі I, як і ефект розщеплення хвиль. Збільшується кількість екстремумів (9 – для тектонофації X), які розташовуються вздовж координатних осей x_1 і x_2 . Можна виділити для тектонофацій V–X не менше трьох напрямків, де різниця швидкостей поширення "швидкої" і "повільної" квазіпоперечних хвиль дорівнює нулю і розщеплення хвиль відсутнє.

Диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії зростає від 2,2 % для тектонофації V до 17,5 % для тектонофації X епізони. Для вищих тектонофацій VIII–X спостерігається добра узгодженість між значеннями інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії і середніми значеннями диференціального коефіцієнта пружної анізотропії. Кількість екстремумів зменшується

від 9 у тектонофації V до 7 у тектонофації VIII і 5 у тектонофації X. Для тектонофацій V–X існує щонайменше один напрямок, що збігається з напрямком поширення хвильової нормалі, де коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії дорівнює нулю.

За результатами математичного моделювання акустичної і пружної анізотропії в різних тектонофаціях епізони для моделі III встановлено, що акустична і пружна симетрія текстури – планальна ромбічна ($\mu_{11}^* > \mu_{22}^* < \mu_{33}^*$; $C_{11}^* > C_{22}^* < C_{33}^*$; $C_{44}^* = C_{55}^* < C_{66}^*$) для тектонофацій V–VII, для тектонофацій VIII–X $\mu_{11}^* > \mu_{22}^* < \mu_{33}^*$, співвідношення між пружними сталими $C_{11}^* > C_{22}^* < C_{33}^*$; $C_{44}^* = C_{55}^* > C_{66}^*$.

Інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_{μ} мало змінюється для тектонофацій V–VIII (від 0,6 до 3,1 %) і стрімко зростає для вищих тектонофацій, досягаючи 12,8 % для тектонофації X епізони. Слід зазначити, що навіть в умовах існування трьох систем ортогональних тріщин цей параметр акустичної анізотропії змінюється подібно до його змінення в моделях I і II.

Максимальна швидкість квазіпоздовжньої хвилі зменшується від 5,85 км/с для тектонофації V до 4,05 км/с для тектонофації X, що значно відчутніше, ніж для моделей I і II, хоча порівняно з моделями катазони і мезозони цей параметр пружної анізотропії змінюється неістотно. Кількість екстремумів зменшується з 8 для тектонофації V до 1 для тектонофації X, який збігається з напрямком поширення пружної хвилі.

Різниця між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями моделі III збільшується мінімально від 0,13 км/с для тектонофації V до 0,31 км/с для тектонофації X, що значно менше, ніж для моделі I, і трохи менше, ніж для моделі II. Ефект розщеплення хвиль для цієї моделі незначний. В центральній частині площини x_1x_2 виділяється досить широка ділянка, де різниця швидкостей поширення "швидкої" і "повільної" квазіпоперечних хвиль дорівнює нулю і розщеплення хвиль відсутнє.

Диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії зростає від 2,1 % для тектонофації V (рис. 2, а) до 13,5 % для тектонофації X епізони. Лише для тектонофацій VIII–X спостерігається добра узгодженість між значеннями інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії і середніми значеннями диференціального коефіцієнта пружної анізотропії (рис. 2). Кількість екстремумів зменшується від 7 у тектонофації VIII до 3 у тектонофації X. Для тектонофацій V–X моделі III існує лише один напрямок, що збігається з напрямком поширення хвильової нормалі, де коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії дорівнює нулю.

Для моделі IV "Залізистий кварцит" у різних тектонофаціях епізони характерна аксіальна ромбі-

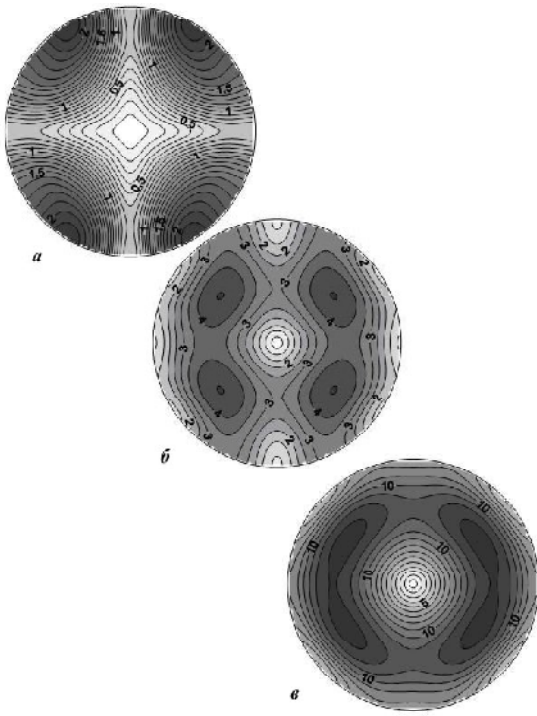


Рис. 2. Стереопроєкції ізоліній вказівних поверхонь коефіцієнта диференціальної анізотропії моделі III “Кварцит біотитовий з трьома системами ортогональних тріщин” для тектонофацій V (а), VIII (б), X (в)

чна симетрія текстури ($\mu_{11}^* < \mu_{22}^* < \mu_{33}^*$; $C_{11}^* < C_{22}^* < C_{33}^*$; $C_{44}^* > C_{55}^* > C_{66}^*$).

Інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_{μ} мало змінюється для середньобальних тектонофацій V–VIII, становить близько 6 % і істотно зростає для вищих тектонофацій, досягаючи 14,1 % для тектонофації X.

Екстремальні значення швидкості поширення квазіпоздовжньої хвилі на стереопроєкціях вказівних поверхонь збільшуються від 5,9 км/с для тектонофації V до 6,55 км/с для найвищої тектонофації X. На відміну від найвищих тектонофацій VIII–X катазони і мезозони спостерігалася локалізація найменших значень швидкостей поширення квазіпоздовжніх хвиль в центральній частині [13], в епізоні (умови крихких деформацій) до цієї ділянки приурочений максимум швидкостей;

Порівняно із умовами катазони і мезозони, максимальна різниця між “швидкою” і “повільною” поперечними модами квазіпоперечних хвиль зменшується від 0,45 км/с у тектонофації V до 0,35 км/с у тектонофації VIII і дорівнює лише 0,24 км/с у тектонофації X (рис. 3). Ефекти розщеплення хвиль послаблюються. Із зростанням рівня дислокаційних перетворень характер поширення квазіпоперечних хвиль істотно змінюється, стереопроєкції ускладнюються додатковими екстремумами і для тектонофації X епізони можна виділити 6 екстремумів, де різниця швидкостей поширення “швидкої” та “повільної” квазіпоперечних хвиль дорівнює нулю і розщеплення хвиль відсутнє.

Диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії зростає від 8,5 % для тектонофацій I–V до 15 % для тектонофації X епізони. Для всіх тектонофацій спостерігається задовільна узгодженість між значеннями інтегрального і середнього диференціального коефіцієнтів анізотропії. Для тектонофацій V–X існують напрямки, де коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії становить менше 1 %. У цих напрямках закономірності поширення пружних хвиль не відрізняються від таких закономірностей в ізотропному середовищі.

Кут відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі незначний навіть для тектонофації VIII, і його величина сягає 1300 для тектонофації X. Інтенсивність і характер зміни цього параметра пружної анізотропії в умовах епізони істотно відрізняються від таких в умовах катазони і мезозони.

Висновки. Розроблено математичні моделі тектонофацій метаморфічних порід КНГС і її полігона, що відповідають різним типам деформацій. Вони пов’язані з реальними реологічними умовами катазони, мезозони і епізони.

За результатами моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей для моделей різних тектонофацій встановлено:

- інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії для всіх моделей зростає зі зростанням рівня деформаційних перетворень, проте його значення істотно менші, ніж для відповідних тектонофацій катазони і мезозони, і не перевищують 13,5 % для найвищого бала тектонофації X;
- швидкість поширення квазіпоздовжньої хвилі для моделей I і IV неістотно зростає зі

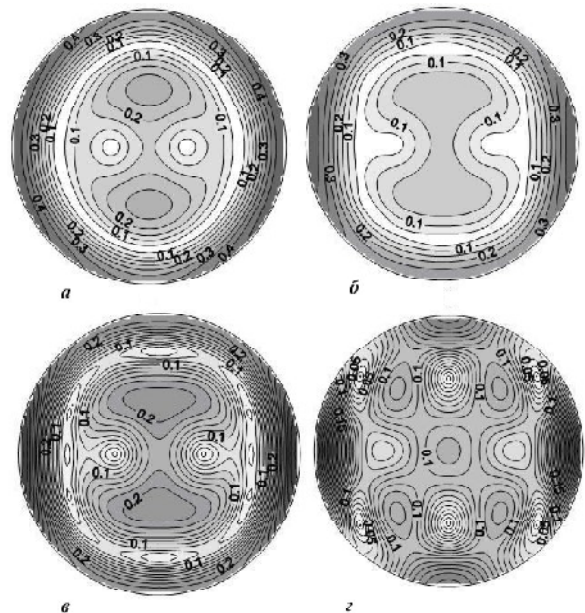


Рис. 3. Стереопроєкції ізоліній вказівних поверхонь різниці “швидкої” та “повільної” швидкостей поширення квазіпоперечних хвиль моделі IV “Залізистий кварцит в умовах крихких деформацій” під час моделювання тектонофацій епізони I (а), V (б), VIII (в), X (г)

збільшенням бала тектонофацій, а для моделей II і III – зменшується;

- для всіх моделей явище розщеплення хвиль на багато менше за відповідні показники в умовах пластичних і пружнопластичних деформацій; різниця між “швидкою” і “повільною” поперечними хвилями зменшується з ростом бальності тектонофацій; при цьому на стереопроекціях останнього параметра збільшується кількість нульових екстремумів, що збігаються з напрямками, де явище розщеплення хвиль відсутнє.

Для всіх розглянутих моделей тектонофацій встановлено, що зі зростанням рівня деформаційних перетворень в умовах епізони інтегральний і диференціальний коефіцієнти акустичної анізотропії збільшуються, причому різною мірою, що може слугувати надійним параметром у визначенні бала тектонофацій.

Установлено, що в усіх випадках моделювання тектонофацій епізони пружна симетрія текстури розглянутих моделей накладає жорсткі обмеження на симетрію всіх без винятку параметрів анізотропії об'ємних пружних хвиль і на симетрію вказівної поверхні диференціального коефіцієнта пружної анізотропії.

1. *Паталаха Е.И.* Тектонофаціальний аналіз складчатих сооружений фанерозоя (обоснование, методика, приложение). – М.: Недра, 1985. – 168 с.
2. *Грубенман У.* Метаморфизм горных пород. Общая часть [пер. с нем. С.П.Соловцова, под ред. А.П. Герасимова]. – Л.; М.: Георазведиздат, 1933. – 376 с.
3. *Лукиенко О.И.* Тектонофаціальна структура Кривбасу // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2000. – Вип. 17. – С. 8–13.

4. *Паталаха Е.И., Лукиенко А.И., Гончар В.В.* Тектонические потоки как основа понимания геологических структур. – Киев: НАН Украины, 1995. – 159 с.
5. *Безродний Д.А.* Математичне моделювання тектонофацій мезозони на основі акустичного аналізу метаморфічних порід Кривбасу // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2008. – № 44. – С. 13–16.
6. *Безродний Д.А., Безродна І.М.* Математичне моделювання впливу кристалографічної орієнтації мінералів і мікротріщин на параметри пружної і акустичної анізотропії // Там само. – 2008. – № 45. – С. 49–52.
7. *Калев Г.И., Глевасский Е.Б., Димитров П.С.* Палеотектоника и строение земной коры докембрийской палеорудной провинции Украины. – Киев: Наук. думка, 1984.
8. *Продайвода Г.Т., Хорошун Л.П., Назаренко Л.В., Выжва С.А.* Математическое моделирование азимутальной анизотропии термоупругих свойств океанической верхней мантии // Физика Земли. – 1987. – № 5. – С. 48–60.
9. *Продайвода Г.Т., Хорошун Л.П., Лещенко П.В.* Теория эффективных физических свойств анизотропных горных пород // Докл. АН УССР. – 1987. – С. 23–27.
10. *Продайвода Г.Т., Выжва С.А.* Математичне моделювання геофізичних параметрів. – Киев: ВЦ “Київ. ун-т”, 1999. – 112 с.
11. *G.T. Prodaivoda, K.S. Alexandrov, S.A. Vyzhva, L.V. Nazarenko.* Calculation of Effective Anisotropic Elastic Constants for Wave Propagation Through cracked Rocks // Russ. Geol. And Geophys. – 2000. – 41, № 3. – P. 430–443.
12. *Продайвода Г.Т.* Акустика текстур гірських порід // Навч. посіб. – Киев: ВГЛ “Обрії”, 2004. – 142 с.
13. *Безродний Д.А.* Пружна анізотропія метаморфічних порід Кривбасу і її використання для вирішення задач тектонофаціального аналізу: Дис. ... канд. геол. наук за спеціальністю 04.00.22 – Геофізика. – К.: Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка, 2008.

Надійшла до редакції 11.03.2009 р.

Г.Т. Продайвода, С.А. Выжва, Д.А. Безродний, І.М. Безродна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕКТОНОФАЦІЙ МЕТАМОРФІЧНИХ ПОРОД ЕПІЗОНІ КРИВБАСУ

Вплив крихких деформацій на акустичні й пружні параметри анізотропії розглянуто на моделях біотитового кварциту, які характеризуються різними системами орієнтації мікротріщин і мінералів, і на моделі комбінованих систем “Залістий кварцит”. Установлено, що зі зростанням рівня деформаційних перетворень в умовах епізони параметри анізотропії змінюються, зокрема, параметри інтегрального і диференціального коефіцієнтів акустичної та пружної анізотропії зростають, причому різною мірою. Це може слугувати надійним індикатором для визначення бала тектонофацій.

Г.Т. Продайвода, С.А. Выжва, Д.А. Безродний, І.Н. Безродная

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕКТОНОФАЦИЙ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ЭПИЗОНЫ КРИВБАСА

Рассмотрено влияние хрупких деформаций на акустические и упругие параметры анизотропии на моделях биотитового кварцита, которые характеризуются разными системами ориентации микротрещин и минералов, и на модели комбинированных систем ориентации “Железистый кварцит”. Установлено, что с возрастанием уровня деформационных преобразований в условиях эпизоны параметры анизотропии изменяются, в частности, параметры интегрального и дифференциального коэффициентов акустической и упругой анизотропии увеличиваются, причем по-разному. Это может служить надежным индикатором при определении бала тектонофаций.