

УДК 550.834+550.34.016+550.34.013.4

Д. Безродний, канд. геол. наук
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КРИСТАЛОГРАФІЧНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ МІНЕРАЛІВ
НА ПАРАМЕТРИ ПРУЖНОЇ І АКУСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ
БІОТИТОВИХ СЛАНЦІВ КРИВОРІЖЖЯ***(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Г.Т. Продайводою)**Вивчено вплив тектонічних деформацій на анізотропію акустичних і пружних параметрів біотитових сланців Кривбасу. Проведено їх математичне моделювання з використанням багатокомпонентної моделі геологічного середовища.*

Стан проблеми. Метаморфічні породи Криворіжжя зазнавали пластичних, пружно-пластичних і крихких деформацій [1-3]. Пластичні деформації суттєво змінювали їхню внутрішню структуру і текстуру, а іноді і мінеральний склад. Подібні типи деформацій пов'язані з пластичним перетворенням порід і супроводжуються формуванням складок ламінарного типу, сланцюватістю, переорієнтацією і кристалографічною орієнтацією мінералів. Пружно-пластичні деформації характеризуються широким розвитком кліважу і кліважної сланцюватості [1-3]. Крихкі деформації супроводжувалися розвитком тріщинуватості в гірських породах (з різною орієнтацією тріщин) і катаклизмом крихких мінералів. Усі ці деформації знайшли своє відображення у структурах і текстах метаморфічних порід КНГС і її полігону. Природно, що деформації кожного типу мають суттєво відрізнятися за параметрами акустичної і пружної анізотропії [1-3].

З метою оцінки цих параметрів метаморфічних порід Кривбасу було розроблено математичні моделі тектонофацій, які враховують вплив деформацій різної природи.

При моделюванні за основу були прийняті результати тектонофаціального вивчення структури метаморфічних порід Кривбасу [1-6], мікро- і макроскопічні дослідження зразків гірських порід КНГС і її полігону, результати обробки електронно-мікроскопічних зображень

шліфів та відповідні шкали тектонофацій, що розроблені для катазони за мезо- і мікроознаками, мезозони за характером кліважування порід та верхньої епізони за характером та інтенсивністю тріщинуватості [1-6]. Визначення рівня перетворень динамічного, динамотермального метаморфізму (за десятибальною шкалою) та визначення динамічної анізотропії зразків Криворізької надглибокої свердловини за текстурними ознаками здійснювалося за оригінальною методикою, яка базується на використанні моделі еліпсоїду обертання. За цією моделлю кожному балу тектонофації відповідає вісім десятиградусних інтервалів та два п'ятиградусних інтервали кута зсуву. Розрахунки компонент деформації по основних кінематичних осях такого еліпсоїда для кожного (із числа відзначених десяти) інтервалу відзначеного кута наведені у табл. 1.

У першу чергу було враховано такі ознаки тектонофацій:

- кут між великими площинами (ає) плоских зерен породотворюючих мінералів та віссю а (лінійністю);
- відношення а:с зерен породотвірних мінералів та мікро- і мезовключень;
- товщину мікролітонів;
- відношення "розплющення-видовження" (а:с) мікро- і мезотіл при кліважуванні;
- розміри блочків, уламків, тектонокластів.

Таблиця 1**Частина шкали тектонофацій, яка розрахована на прикладі моделі еліпсоїда обертання (за Є.І. Паталахою, 1985)**

Показники деформації	Бали тектонофацій									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
за кутом зсуву, γ	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-85	85-90
за компонентою розтягання, ϵ_a	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-120	120-200	200-480	480-1060	>1060
за компонентою стиснення, ϵ_c	0-9	9-17	17-29	29-38	38-45	45-55	55-67	67-83	83-91	91-100
за відношенням а:с	1-1,2	1,2-1,4	1,4-2,0	2,0-2,6	2,6-3,2	3,2-4,8	4,8-9,0	9,0-33,3	33,3-142,9	>142,9

Кристалізаційне розсланцювання (умови катазони) у в'язких розломах супроводжується орієнтуванням плоских і видовжених зерен породотвірних мінералів та пластичною формозміною цих зерен і агрегатів та роз-

витком анізотропних текстур – сланцюватих у метаосадових та метавулканічних породах і гнейсуватих у гранітоїдах. Розглянуто два типи моделей тектонофацій, що відповідають пластичним деформаціям.

Модель І. "Сланець біотитовий". Розглядає переважний вплив кристалографічної орієнтації породотвірних мінералів на параметри акустичної і пружної анізотропії. Мінеральний склад: біотит – 40 %, плагіоклаз – 33 %, кварц – 26 %. Модель армувалася мікротріщинами, що, як і основні породотвірні мінерали для нижчих балів тектонофацій I-IV, були рівномірно орієнтовані паралельно осям x_1, x_2, x_3 .

Формат мікротріщин α був прийнятий $\alpha=0,01$, формат зерен кварцу і плагіоклазу прийнятий як $\alpha=0,3$, а біотиту – $\alpha=0,1$, що відповідає середньому формату зерен зазначених мінералів [2-3].

Поступово концентрація орієнтованих зерен породотвірних мінералів і мікротріщин вздовж осей x_1, x_2 зі збільшенням балу тектонофацій від V до X зменшувалася з одночасним збільшенням її по осі x_3 . Концентрація орієнтованих зерен породотвірних мінералів і мікротріщин вздовж осей x_1, x_2 зі збільшенням балу тектонофацій від V до X зменшується з одночасним збільшенням її по осі x_3 , досягаючи 95 % для тектонофації X [5].

Модель II. "Сланець біотитовий". Характеризує зміну параметрів акустичної і пружної анізотропії від сланцеватості – орієнтації породотвірних мінералів за формою. Мінеральний склад той самий, що для моделі I.

Формат зерен породотвірних мінералів кварцу і плагіоклазу α змінювався від $\alpha=0,3$ для тектонофації V до $\alpha=0,03$ для тектонофації X, та від $\alpha=0,1$ для тектонофації V до $\alpha=0,01$ для тектонофації X – для біотиту. Формат мікротріщин α змінювався від $\alpha=0,05$ для тектонофації V до $\alpha=0,0005$ для тектонофації X. Враховуючи той факт, що за численними тектонофаціальними дослідженнями [1-6] в тектонофації V катазони починають зникати мікротріщини, а в тектонофації VIII вони практично відсутні, концентрація мікротріщин змінювалася від $\zeta=1$ % для тектонофації V до $\zeta=0,1$ % для тектонофації X.

В основі **методу акустичного аналізу** текстур гірських порід лежить азимутальна залежність їхніх ефективних пружних властивостей від орієнтації мінералів і мікротріщин.

Метод акустичного аналізу текстур гірських порід не має обмежень і базується на багатокомпонентній моделі текстури гірської породи, що включає орієнтацію мінералів і мікротріщин. Для визначення ефективних пружних постійних C_{mn}^* застосовується метод умовних моментних

функцій [6-8]. У цьому методі для визначення C_{mn}^* необхідно знайти залежність між середніми деформаціями у включенні, орієнтованому в n -ному напрямку $\varepsilon^{(in)}$ і макроскопічними деформаціями матриці $\varepsilon^{(m)}$:

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

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

Осереднюючи по безлічі Ω можливих орієнтацій включень, виражаємо середні деформації включень $\varepsilon^{(i)}$ і скелету $\varepsilon^{(m)}$ через макроскопічні деформації $\bar{\varepsilon}$ представленого об'єму:

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

де кутовими дужками з індексом Ω позначена операція статистичного осереднення за кількістю можливих орієнтацій включень. Відмінна риса запропонованого методу полягає в осередненні алгебраїчних компонен-

тів тензора $\bar{Z}_i$ за допомогою довільної функції розподілу орієнтації включень:

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

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 [2, 3, 7, 8].

Враховуючи рівняння (2) і (3), можна знайти вираз для ефективних пружних постійних C^* текстури гірської породи з довільною орієнтацією 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 використовувався метод інверсії азимутальної залежності ефективних фазових швидкостей квазіповздовжних і квазіпоперечних хвиль текстурованої гірської породи.

Для розв'язання поставленої задачі застосовувалися сучасні методи глобальної оптимізації цільової функції:

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

де $v_i^{(l)}, v_i^{(r)}$ – фазові швидкості квазіповздовжних і квазіпоперечних хвиль відповідно, що обчислені з експериментальних значень ефективних пружних постійних гірської породи, отриманих методом умовних моментних функцій зі знайдених на r -тому кроці ітерації моментів розкладання функцій розподілу орієнтації включень; $\vec{x}$ – вектор невідомих моментів розкладання функцій розподілу орієнтації мінералів і мікротріщин.

Полюсні діаграми розподілу орієнтацій кристалографічних осей мінералів і мікротріщин розраховувалися за системою рівнянь [8]:

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

де $P_l^m(\cos \Theta), P_l^n(\cos \eta)$ – нормалізовані приєднані поліноми Лежандра; φ, Θ – сферична система координат у базисі гірської породи; η, Φ – сферична система координат у кристалофізичному базисі.

Результати.

Модель І. "Сланець біотитовий".

Акустична і пружна симетрія текстури моделі I за результатами математичного моделювання планальна ромбічна ($\mu_{11}^* < \mu_{22}^* > \mu_{33}^*$; $C_{11}^* < C_{22}^* > C_{33}^*$; $C_{44}^* < C_{55}^* < C_{66}^*$).

Величина інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії змінюється від 13 % для тектонофації I і досягає 42 % при майже 100 % однонаправленій їхній орієнтації вздовж осі x_3 , що відповідає тектонофації X катазони. Зі зростанням однонаправленої кристалографічної орієнтації зерен кварцу і біотиту різко збільшуються ефективні пружні постійні породи C_{11}^*, C_{22}^* , меншою мірою – C_{66}^* , величина C_{33}^* планомірно зменшується, а значення C_{44}^*, C_{55}^* майже не залежать від впливу кристалографічної орієнтації мінералів (рис. 1).

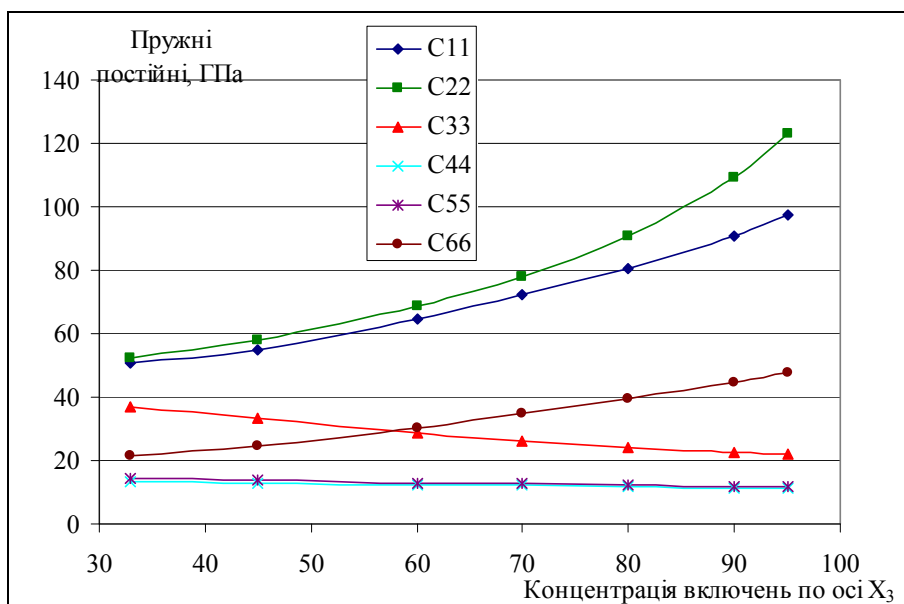


Рис. 1. Вплив орієнтації включень на пружні постійні моделі I "сланець біотитовий"

Досліджено вказівні поверхні пружних параметрів (різниці "швидкої" і "повільної" поперечних хвиль та диференціального коефіцієнта пружної анізотропії) для тектонофацій I, VII і X.

Зміна параметрів пружної анізотропії досить значна. Величина різниці між "швидкою" і "повільною" поперечними модами змінюється від 1,3 км/с для рівномірного розподілу орієнтованих включень (тектонофація I) до 2,2 км/с для тектонофації X, що свідчить про інтенсивні процеси розщеплення хвиль, а коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії від 28 % до 48 % відповідно (рис. 3а, д). Значення інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії A_μ добре узгоджуються з середніми значеннями диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d .

Для моделі I "сланець біотитовий" спостерігається істотне зменшення кількості екстремумів і їхнє розташування на площині X_1X_2 зі зростанням однонаправленої кристалографічної орієнтації зерен біотиту, кварцу і мікротріщин.

Для різниці $\Delta V_s = V_{s1} - V_{s2}$ кількість екстремумів зменшується з 12 до 7, що локалізуються у вузькій приосовій області мінімальних значень. Що ж стосується коефіцієнту диференціальної пружної анізотропії A_d , то для нього кількість екстремумів зменшується з 11 до 3 з тією самою локалізацією областей максимальних значень.

Для моделі I "сланець біотитовий" визначено, що пружна симетрія їх текстури накладає жорсткі обмеження на симетрію вказівних поверхонь усіх без виключення параметрів анізотропії та на симетрію вказівної поверхні диференціального коефіцієнта пружної анізотропії. Для ромбічної симетрії текстури моделі "сланець біотитовий" встановлено, що існують окремі напрямки, вздовж яких величина диференціального коефіцієнта пружної анізотропії дорівнює нулеві. Отже, закономірності розповсюдження пружних хвиль вздовж цих напрямків нічим не відрізняються від ізотропного середовища.

Модель II. "Сланець біотитовий". На прикладі цієї моделі досліджено вплив сланцюватості на ефективні акустичні і пружні параметри.

Акустична і пружна симетрія текстури моделі II за результатами математичного моделювання планальна ромбічна ($\mu_{11}^* < \mu_{22}^* > \mu_{33}^*$; $C_{11}^* < C_{22}^* > C_{33}^*$; $C_{44}^* < C_{55}^* < C_{66}^*$).

Величина інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії на відміну від моделі I змінюється фактично невідчутно від 23,5 % для тектонофації V до 27,6 % для тектонофації X катазони. Всі ефективні пружні постійні моделі II істотно зменшуються, особливо це стосується недиагональних компонент матриці C_{12}^* , C_{13}^* , C_{23}^* , які набувають своїх екстремальних значень у тектонофації X (рис. 2).

Проведено аналіз параметрів анізотропії, які представлені на стереопроєкціях ізоліній вказівних поверхонь пружних параметрів (різниці "швидкої" і "повільної" поперечних хвиль та диференціального коефіцієнта пружної анізотропії) для тектонофацій V, VIII і X.

Зміна параметрів пружної анізотропії не така значна, як для моделі I (рис. 3). Максимальна величина різниці між "швидкою" і "повільною" поперечними модами змінюється від 1,7 км/с для тектонофації V до майже 2,1 км/с для тектонофації X, що свідчить про інтенсивні процеси розщеплення хвиль. Поруч з тим, можна виділити не менше 6-ти екстремумів на вказівних поверхнях цього параметру пружної анізотропії, де явище розщеплення хвиль відсутнє.

Коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії зростає від 32 % для тектонофації V до 42 % для тектонофації X (рис. 3б, г, е), що істотно менше, ніж для моделі I.

На відміну від моделі I, спостерігається збільшення кількості екстремальних точок на вказівних поверхнях параметрів пружної анізотропії. У випадку різниці між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями кількість екстремумів зростає з 8 для тектонофації V до 13 для тектонофації X, а для диференціального коефіцієнта пружної анізотропії з 5 до 9 відповідно (рис. 3).

Один з п'яти мінімальних екстремумів диференціального коефіцієнту пружної анізотропії співпадає з напрямком поширення пружної хвилі, інші розташовані під кутом 20-25° до площини X_1X_2 .

Як і для моделі I, для моделі II встановлено, що пружна симетрія текстури накладає жорсткі обмеження на симетрію вказівних поверхонь усіх параметрів анізотропії та на симетрію вказівної поверхні диференціального коефіцієнта пружної анізотропії. Для моделі II виявлено 5 окремих напрямків, вздовж яких величина диференціального коефіцієнта пружної анізотропії дорівнює нулеві. Це свідчить про те, що закономірності розповсюдження об'ємних пружних хвиль у цих напрямках нічим не відрізняються від ізотропного середовища.

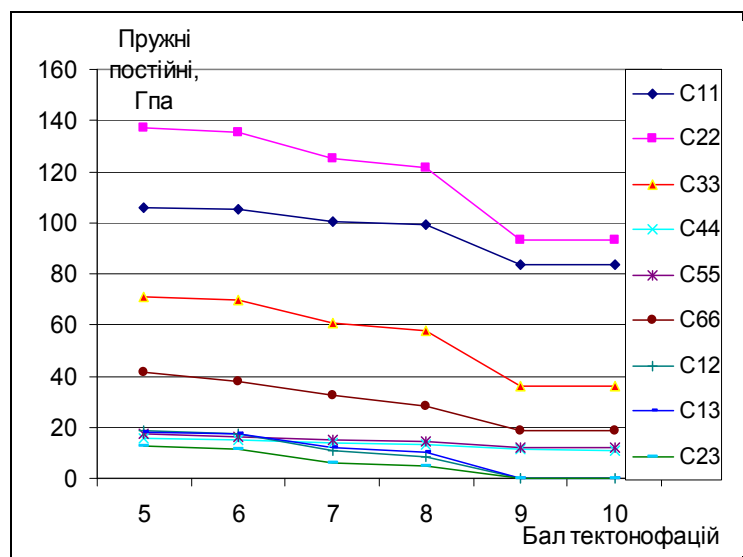


Рис. 2. Вплив форми мінералів на пружні постійні моделі II "сланець біотитовий" для різних балів тектонофацій

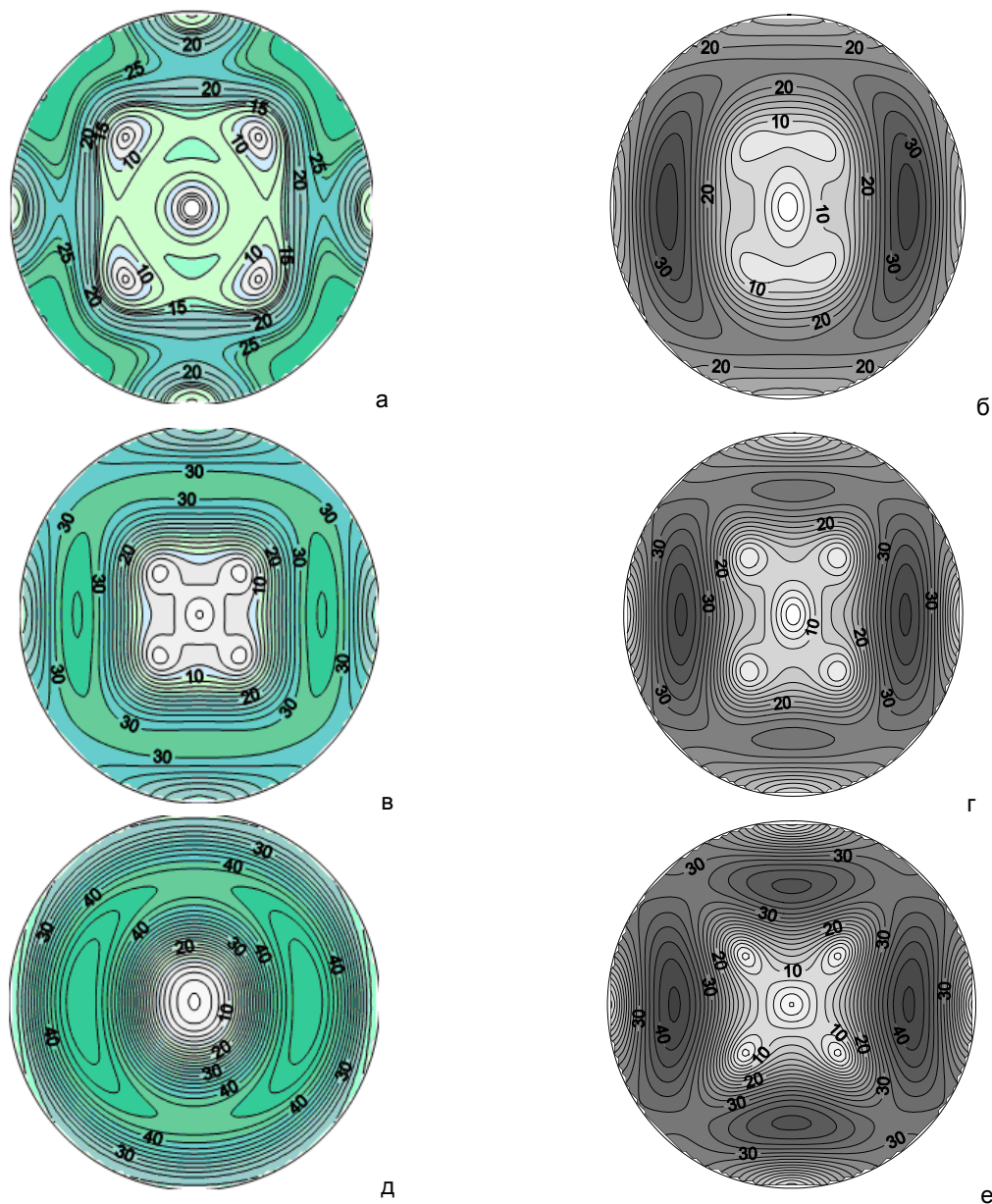


Рис. 3. Стереопроєкції ізоліній вказівних поверхонь коефіцієнта диференціальної пружної анізотропії для моделей "сланець біотитовий" I (а, в, д) і II (б, г, е) для тектонофацій V (а, б), VIII (в, г) та X (д, е)

Висновки Таким чином, проведено математичне моделювання ефективних акустичних і пружних параметрів тектонофацій катазони для моделей біотитових сланців, характерних для Криворіжжя, та оцінено вплив кристалографічної орієнтації мінералів на акустичні і пружні параметри зразків з врахуванням акустичної анізотропії, що продемонструвало можливості розробленого методу для аналізу тектонічних деформацій на основі проведених петроакустичних досліджень.

Список використаних джерел

1. Лукієнко О. І. Тектонофаціальна структура Кривбасу / О. І. Лукієнко // Вісник Київ. Ун-ту, Геологія. – 2000. – Вип. 17. – С. 8-13.
2. Продайвода Г. Т. Акустичний текстурний аналіз метаморфічних порід Криворіжжя : монографія / Г. Т. Продайвода, С. А. Вижива, Д.

А. Безродний, І. М. Безродна. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет". – 2011. – 378 с.

3. Продайвода Г. Т. Акустика текстур гірських порід: Навч. посіб. / Г. Т. Продайвода. – К. : ВГЛ "Обрії", 2004. – 142 с.

4. Паталаха Е. И. Тектонофации мезозоны (атлас микроструктур) / Е. И. Паталаха, А. И. Лукиенко, В. А. Дербенев. – Алма-Ата : Изд-во "Наука" КазССР, 1987. – 184 с.

5. Паталаха Е. И. Тектонические потоки как основа понимания геологических структур / Е. И. Паталаха, А. И. Лукиенко, В. В. Гончар. – К. : НАНУ, 1995. – 159 с.

6. Bunge H.I. Three-Dimensional Texture Analysis of three Quartzites / H. I. Bunge, H. R. Wenk // Tectonophysics. – 1977. – V. 40. – P. 257-285.

7. Продайвода Г. Т. Метод расчета эффективных упругих постоянных в анизотропных микротрещиноватых горных породах / Г. Т. Продайвода, К. С. Александров, С. А. Выжива, Л. В. Назаренко // Геол. и геофиз. – 2000. – 41, № 3. – С. 436-449. 8. Александров К. С. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород / К. С. Александров, Г. Т. Продайвода. – Новосибирск, Изд. СО РАН, 2000. – 354 с.

Надійшла до редколегії 11.03.13

Д. Безродный, канд. геол. наук

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ МИНЕРАЛОВ НА ПАРАМЕТРЫ УПРУГОЙ И АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ БИОТИТОВЫХ СЛАНЦЕВ КРИВОРОЖЬЯ

Изучено влияние тектонических деформаций на анизотропию акустических и упругих параметров биотитовых сланцев Кривбаса. Проведено их математическое моделирование с использованием многокомпонентной модели геологической среды

D. Bezrodny, Cand. Sci. (Geol.)

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

INFLUENCE CRYSTALLOGRAPHIC ORIENTATION OF MINERALS ON THE ELASTIC PARAMETERS AND ACOUSTIC ANISOTROPY OF BIOTITE SCHISTS KRYVORIZHZHYA

Influence of tectonic deformations on acoustic and elastic anisotropy parameters of Krivbass biotite schists is studied. Mathematical modeling using a multicomponent model of the geological environment is conducted.