

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.834+550.34.016+550.34.013.4

Г. Продайвода, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
Д. Безродний, канд. геол. наук,
І. Безродна, канд. геол. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕКТОНІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ПАРАМЕТРИ ПРУЖНОЇ І АКУСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ КРИВОРІЗЬКОЇ НАДГЛИБОКОЇ СВЕРДЛОВИНИ ЗА ДАНИМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-мін. наук, проф. О.І. Лукієнком)

Вплив пластичних, пружно-пластичних і крихких деформацій на акустичні й пружні параметри анізотропії розглянуто на моделях "залізистого кварциту", які характеризуються різними системами орієнтації мікротріщин і мінералів. Встановлено, що зі зростанням рівня деформаційних перетворень величини параметрів анізотропії змінюються, зокрема, параметри інтегрального і диференціального коефіцієнтів акустичної анізотропії зростають, причому в різній мірі, що може служити надійним індикатором при визначенні балу тектонофації

Influence of plastic, elastic-plastic and brittle deformations on the acoustic and elastic parameters of anisotropy is considered on the models of "ferrous quartzite", which are characterized with different systems of orientation of microcracks and minerals. It is set that with growth of level of deformation transformations parameters of anisotropy change: the parameters of integral and differential coefficients of acoustic anisotropy grow thus in a different measure which can serve as a reliable indicator at determination of mark of tectonic facieses

Дослідження акустичної і пружної анізотропії представляють інтерес для вирішення багатьох геологічних задач, зокрема, тектонічних деформаційних процесів. Математичне моделювання на основі даних петроакус-

тичних досліджень відкриває нові додаткові можливості для аналізу складно-деформованих порід.

Стан проблеми Анізотропія акустичних і пружних властивостей метаморфічних порід КНГС, а зокрема, залізис-

тих кварцитів обумовлена різноманітними факторами [1–3, 7], а саме:

- кристалографічною орієнтацією та формою зерен породоутворюючих мінералів;
- формою, концентрацією та орієнтацією мікротріщин;
- тонкою шаруватістю;
- напруженим станом або реологічними умовами, в яких відбувалося формування і перетворення гірських порід.

Породи криворізької зони за довгий час свого існування зазнавали впливу неодноразових тектонічних деформацій, які в тій або іншій формі знаходять своє відображення у структурах і текстурах гірських порід [1–3, 4–8].

При математичному моделюванні пружних параметрів залізистих кварцитів основна **задача** полягала в реальній математичній оцінці вкладу кожного з цих факторів на ефективні акустичні і пружні властивості з подальшим застосуванням отриманих даних при відображенні їх для різних тектонофаціальних зон і балів тектонофацій.

З метою з'ясування впливу тектонічних деформацій на анізотропію акустичних і пружних властивостей залізистих кварцитів Кривбасу було проведено математичне моделювання ефективних пружних постійних гірських порід із використанням багатокомпонентної моделі, яка була максимально наближена до будови реальних текстур метаморфічних порід, що зазнали неодноразових незворотних деформацій, техногенного впливу при бурінні свердловини і релаксації напруг при розвантаженні керна.

Багатокомпонентна модель деформованої текстури залізистого кварциту представляє собою матричну модель (твердий скелет) із орієнтованими включеннями у вигляді сфероїдів різного формату $\alpha = c/a$ (тут c , a – коротка та довга осі сфероїду). Кристалографічні осі сфероїдальних зерен породотвірних мінералів були орієнтовані вздовж осей сфероїду. Мікротріщини моделювалися сфероїдами формату $\alpha = 10^{-1} \div 10^{-4}$.

Для вирішення поставленої задачі застосовувався метод умовних моментних функцій із використанням розрахункової схеми Морі–Танака [1, 10, 11]. Він дає можливість проведення чисельних розрахунків цих параметрів для багатокомпонентних моделей, які максимально наближені до будови реальних текстур метаморфічних порід.

Текстурні особливості залізистих кварцитів відображають термодинамічні умови та реологічні механізми дислокаційних структур Кривбасу, які формувалися, згідно з даними тектонофаціального аналізу, у такій послідовності:

- в'язкі розломи катазони–мезозони;
- в'язкі кліважні розломи вторинної мезозони;
- субв'язкі розломи вторинної епізони;
- крихков'язкі розломи і прирозломні складки та флексури вторинної епізони;
- крихкі розломи [5–9].

Залізисті кварцити Криворіжжя зазнавали пластичних, пружно-пластичних і крихких деформацій [5–9]. Пластичні деформації суттєво змінювали їх внутрішню структуру і текстуру, а іноді і мінеральний склад. Подібні типи деформацій зв'язані з пластичним перетворенням порід і супроводжуються формуванням складок ламінарного типу, сланцюватістю, перекристалізацією і кристалографічною орієнтацією мінералів. Пружно-пластичні деформації характеризуються широким розвитком кліважу і кліважної сланцюватості [8]. Крихкі деформації супроводжувалися розвитком тріщинуватості в гірських породах (з різною орієнтацією тріщин) і катаклазом крихких мінералів. Всі ці деформації знайшли своє відображення у структурах і текстурах метаморфічних порід КНГС та, зокрема, і в залізистих квар-

цитах. Природно, що деформації кожного типу мають суттєво відрізнятися за параметрами акустичної і пружної анізотропії [1, 2, 8].

Результати 3 метою оцінки цих параметрів було розроблено математичні моделі залізистих кварцитів різних тектонофацій, які враховують вплив пластичних, пружно-пластичних, крихких і комбінованих деформацій.

При моделюванні за основу були прийняті результати тектонофаціального вивчення структури Кривбасу [2, 3, 11], мікро- і макроскопічні дослідження зразків гірських порід КНГС, 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 [5–9].

В першу чергу було враховано наступні ознаки тектонофацій:

- кут між великими площинами ($ав$) плоских зерен породоутворюючих мінералів та віссю a (лінійністю);
- відношення $a:c$ зерен породоутворюючих мінералів та мікро- і мезовключень;
- відношення "розплющення-видовження" ($a:c$) мікро- і мезотіл при кліважуванні;
- розміри блочків, уламків, тектонокластів.

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

Модель I. Комбінована модель накладених деформацій, що одночасно враховує вплив на акустичні й пружні постійні та параметри анізотропії об'ємних пружних хвиль, кристалографічної орієнтації мінералів і мікротріщин та їхню орієнтацію за формою (сланцюватість). Мінеральний склад моделі залізистого кварциту: кварц – 57 %, магнетит – 24 %, амфібол – 18 %. Пружні постійні породотвірних мінералів, що були використані при моделюванні акустичної і пружної анізотропії тектонофацій, наведені в [2].

Для тектонофацій I–IV включення породотвірних мінералів і мікротріщин орієнтувалися хаотично вздовж осей x_1 , x_2 , x_3 , формат включень змінювався від $\alpha = 0,9$ для тектонофації I до $\alpha = 0,5$ – для тектонофації IV. Моделювання тектонофацій V–X катазони, що були виділені в Кривбасі [8, 9], здійснювалося з урахуванням того факту, що гірські породи зазнали відчутного бокового стиснення. Цей факт сприяє переважній орієнтації включень породоутворюючих мінералів і мікротріщин паралельно осі x_3 та різкій зміні формату включень, що проявляється у видовженні зерен мінералів паралельно осі x_3 . Формат включень породоутворюючих мінералів при цьому змінювався від $\alpha = 0,3$ для тектонофації V до $\alpha = 0,05$ для тектонофації VIII і сягав $\alpha = 0,01$ для тектонофації X.

Концентрація орієнтованих включень по осі x_3 змінювалася від 40 % для тектонофації V до 90 % для найвищої тектонофації X. Істотно змінювався формат і концентрація мікротріщин. Так формат мікротріщин α коливався від $\alpha = 0,05$ для тектонофації V до $\alpha = 0,0005$ для тектонофації X катазони. Враховуючи той факт, що за багаточисельними тектонофаціальними дослідженнями [3–9] в тектонофації V катазони починають зникати мікротріщини, а в тектонофації VIII вони практично відсутні, концентрація мікротріщин ζ за результатами тектонофаціальних, петрографічних і електронно-мікроскопічних досліджень змінювалася від $\zeta = 2$ % для тектонофації V до $\zeta = 0,1$ % для тектонофації X.

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 тектонофацій I–III катазони та

($\mu_{11}^* < \mu_{22}^* > \mu_{33}^*$; $C_{11}^* < C_{22}^* > C_{33}^*$; $C_{44}^* > C_{55}^* < C_{66}^*$) для тектонофацій V–X (табл. 1, рис. 1). Інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_μ , спершу зменшується від 6,6 % для тектонофації I до 6,5 % для тектонофації III, а потім різко зростає від 7,3 % для тектонофації V до майже 32,3 % для тектонофації X катазони.

Параметри пружної анізотропії для різних тектонофацій катазони моделі I представлені на рис. 1 а, б. На ньому зображено стереопроєкції ізоліній вказівних поверхонь диференціального коефіцієнту пружної анізотропії відповідно I і X тектонофацій катазони.

Швидкість квазіповздовжньої хвилі зменшується для моделі I від максимальних 6,85 км/с для найнижчої тектонофації I до 5,5 км/с для тектонофації V і набуває свого найменшого значення у тектонофації X, де вона складає лише 3,4 км/с. Для найвищих тектонофацій VIII–X катазони фазова швидкість квазіповздовжньої хвилі моделі I не залежить від азимутального кута. Кількість екстремумів зменшується від 5 для тектонофації V до одного центрального мінімуму.

Аналіз стереопроєкцій ізоліній вказівних поверхонь різниці "швидкої" і "повільної" швидкостей квазіпоперечних хвиль показав, що з зростанням рівня тектонофацій катазони для моделі I спостерігається суттєве збільшення вказаного параметру пружної анізотропії. Так для тектонофації V величина цієї різниці складає 0,16 км/с, а для тектонофації X вона становить близько 1,3 км/с, тобто різко зростає ефект розщеплення хвиль. При цьому кількість екстремумів зменшується від 14 для тектонофації V до трьох вузько локалізованих мінімумів для тектонофації X.

Коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії збільшується від 3,8 % для тектонофації V до 34 % для тектонофації X. Зростання цього параметру пов'язане з одночасним зменшенням кількості екстремумів від 10 у тектонофації V до 5 у тектонофації X (рис.1, а, б). Нульові екстремуми цього параметру, що присутні у тек-

тонофаціях VIII–X показують, що в цих напрямках закономірності розповсюдження пружних хвиль фактично не відрізняються від ізотропного середовища.

Пружно-пластичні моделі тектонофацій. Модель II.

Процеси кліважування (умови мезозони) моделювалися як односистемне в'язке сколювання в супроводі локалізованої повздовж площин сколювання перекристалізації порід.

Модель II враховує вплив кристалографічної орієнтації породотвірних мінералів, їхню орієнтацію за формою та вплив односистемного в'язкого сколювання на акустичні і пружні параметри анізотропії [2]. При цьому мікротріщини майже закриті, що характеризує механічне послаблення. Мінеральний склад моделі II аналогічний для моделі I.

Кліваж імітувався слабо розкритими тріщинами сфероїдального формату від $\alpha = 0,7$ для тектонофації I мезозони до $\alpha = 0,005$ для тектонофації X. Мікротріщини були орієнтовані довгою віссю вздовж осі x_3 . При цьому сфероїдальні зерна породотвірних мінералів були орієнтовані хаотично з рівномірним розподілом вздовж осей x_1 , x_2 і x_3 для тектонофацій I–IV. Для тектонофацій V–X, як і випадку катазони (модель I), моделювання ефективних акустичних і пружних постійних залізного кварциту КНГС було проведено з урахуванням факту збільшення однонаправленої орієнтації зерен породотвірних мінералів вздовж осі x_3 від 40 % для тектонофації V до 90 % для тектонофації X. Формат одноорієнтованих зерен мінералів для обраних моделей змінювався від $\alpha = 0,7$ для нижчих тектонофацій до $\alpha = 0,03$ для тектонофацій IX–X. Концентрація мікротріщин ζ за результатами тектонофаціальних, петрографічних і електронно-мікроскопічних досліджень змінювалася від 4 % для тектонофації I мезозони до 2 % для VIII тектонофації і складала 1 % для найвищої тектонофації X мезозони.

Таблиця 1

Результати математичного моделювання тектонофацій катазони, мезозони і епізони для моделей "залізистий кварцит" №№ 1, 2 і 3

Пружні і акустичні параметри	Пружні постійні, ГПа (для моделей різних тектонофацій)								
	Тектонофація 1			Тектонофація 5			Тектонофація 10		
	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 1	Модель 2	Модель 3
C_{11}	122,61	117,75	125,04	106,35	111,09	121,52	115,78	128,81	77,61
C_{22}	126,73	124,91	129,27	110,5	117,56	124,37	124,06	132,46	75,97
C_{33}	147,33	146,99	150,48	99,63	134,96	147,32	35,85	69,09	122,66
C_{44}	62,16	61,79	63,7	43,95	57,7	61,86	21,54	38,3	41,21
C_{55}	57,84	56,06	59,33	40,95	52,21	57,4	20,7	36,34	38,59
C_{66}	49,07	47,37	50,12	42,1	45,32	48,82	45,54	50,34	34,72
C_{12}	27,84	26,73	28,18	15,44	21,54	23,9	21,56	26,72	0,56
C_{13}	35,42	34,13	35,89	15,95	28,25	33,18	1,72	6,03	19,97
C_{23}	34,77	33,25	35,24	14,85	27,13	32,41	2,46	1,26	19,17
μ_{11}	71,99	70,9	72,35	69,5	66,32	69,41	54,51	63,31	45,63
μ_{22}	74,64	75,03	75	62,16	70,12	71,69	57,24	64,95	45,93
μ_{33}	83,85	84,9	84,39	58,36	77,83	81,25	23,39	42,22	61,21
A_μ	6,6	7,61	6,67	2,6	6,69	6,03	32,27	17,92	14,15
S_μ	1,12	1,06	1,04	1,03	1,06	1,03	2,83	1,5	1,01
L_μ	1,03	1,13	1,12	1,04	1,11	1,13	1,05	1,03	1,33
Густина, г/см ³	3,14	3,12	3,24	3,19	3,15	3,28	3,42	3,4	3,31

Основні результати математичного моделювання тектонофацій мезозони для моделі II наведено у таблиці 1 та на рис. 1 д, е. Акустична й пружна симетрія текстур цієї моделі ромбічна аксіальна ($\mu_{11}^* < \mu_{22}^* < \mu_{33}^*$; $C_{11}^* < C_{22}^* < C_{33}^*$; $C_{44}^* > C_{55}^* > C_{66}^*$) для тектонофацій I–VII, та ромбічна планальна

($\mu_{11}^* < \mu_{22}^* > \mu_{33}^*$; $C_{11}^* < C_{22}^* > C_{33}^*$; $C_{44}^* > C_{55}^* < C_{66}^*$) для тектонофацій VIII–X. Коефіцієнт акустичної анізотропії A_μ спершу спадає для тектонофацій I–V від 7,6 % до 6,7 %, а для високобальних тектонофацій VI–X неухильно зростає і досягає величини майже 18 %. Значення цього параметру майже удвічі менше відповід-

ного значення для моделі I в умовах катазони (32,6 % – тектонофація X катазони).

Параметри пружної анізотропії для моделі II відповідно для тектонофацій I, V і X мезозони представлені у вигляді стереопроєкцій ізоліній вказівних поверхонь диференціального коефіцієнту пружної анізотропії на рис. 1, в-г.

Швидкість квазіповздовжньої хвилі зменшується від максимального значення 6,55 км/с для тектонофації V до 4,6 км/с для тектонофації X мезозони. Зі збільшенням рівня тектонофацій області максимальних екстремальних значень швидкості квазіповздовжньої хвилі розташовуються в полярних областях, а зона мінімуму концентрується в центральній частині площини $x_1 x_2$. Для тектонофації X фазова швидкість квазіповздовжньої хвилі не залежить від азимутального кута.

Різниця між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями змінюється не так істотно, як для відповідних тектонофацій катазони цієї моделі, і складає

0,35 км/с для тектонофації V та 0,62 км/с для найвищої тектонофації X. Явище розщеплення хвиль вдвічі менше, ніж для відповідних тектонофацій катазони. Для вищих тектонофацій існують напрямки, де розщеплення хвиль відсутнє.

Коефіцієнт диференціальної пружної анізотропії складає для моделі залістого кварциту близько 6,5 % для V тектонофації і набуває свого максимуму 15,5 % для тектонофації X мезозони (рис.1, в, г). Кількість екстремумів для цього параметру пружної анізотропії зменшується до одного вираженого мінімуму для вищих тектонофацій IX–X. Подібна ситуація повторюється і стереопроєкціях вказівної поверхні кута відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі. Значення кута відхилення збільшується з ростом рівня тектонофацій і спостерігається локалізація мінімального екстремуму в центральній частині площини $X_1 X_2$.

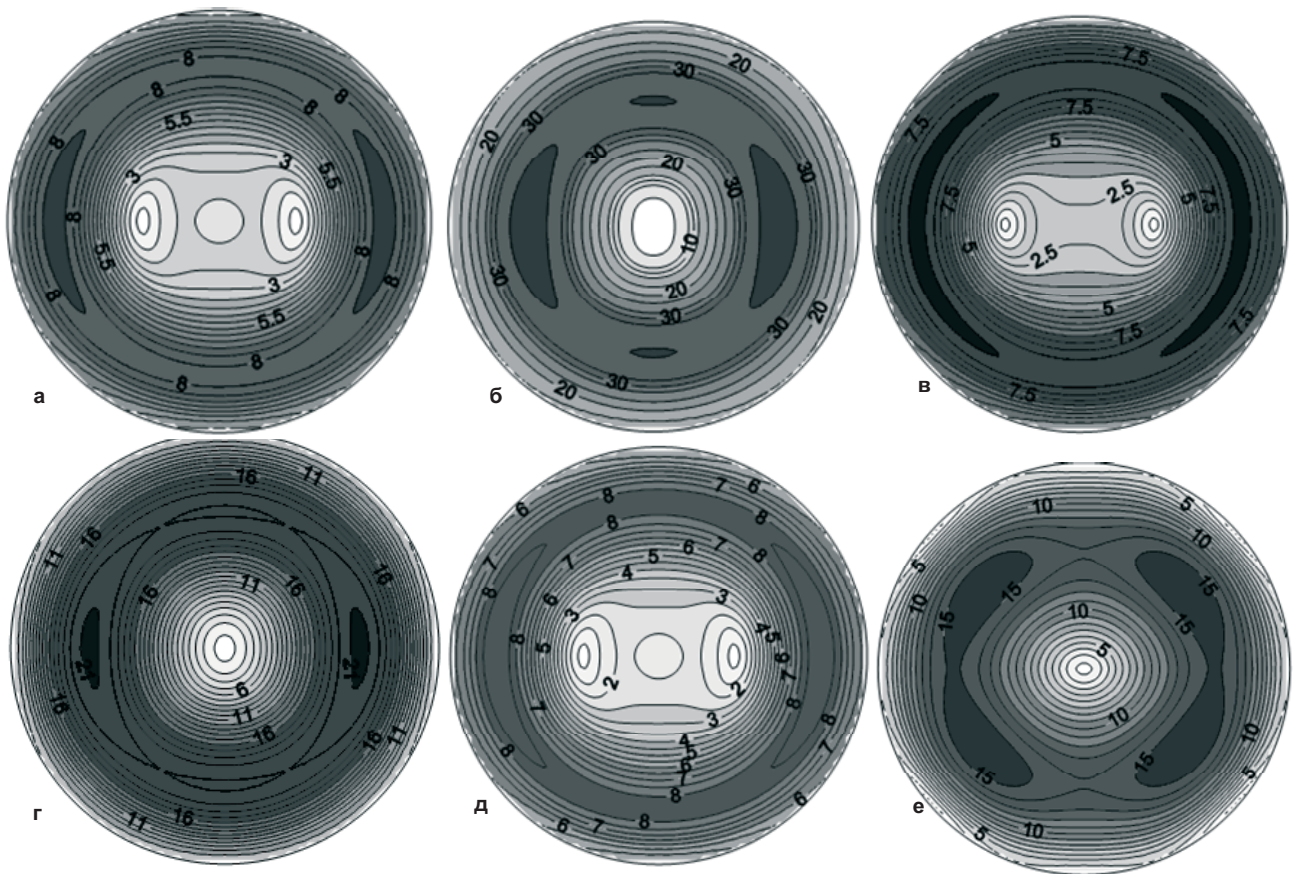


Рис. 1. Стереопроєкції ізоліній вказівних поверхонь диференціального коефіцієнту пружної анізотропії моделі "залістий кварцит" I. Умовні позначки:

а, в, г – тектонофація I, б, г, е – тектонофація X, а, б – модель II, в, г – модель II, д, е – модель III

Крихкі моделі тектонофацій. Модель III.

Умови епізони (крихкі деформації) розглянуто на прикладі метаморфічних порід [2–3], що сформувалися в умовах низькотемпературного метаморфізму з ортогональними системами тріщин. Вплив різних систем орієнтації тріщин на ефективні акустичні й пружні постійні метаморфічних гірських порід Криворіжжя та параметри анізотропії об'ємних пружних хвиль розглянуто на прикладі моделі III.

Характеризує текстуру залістого кварциту з двома системами ортогональних мікротріщин [2–3]. Концентрація ортогональних мікротріщин змінювалася від 4 % для тектонофації I епізони до 2,5 % для тектонофації V і

складала 1,5 % для тектонофації X. При цьому формат сфероїдальних мікротріщин приймався рівним $\alpha = 0,5$ для тектонофації I та змінювався послідовно до $\alpha = 0,005$ для найвищої X тектонофації епізони.

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

За результатами математичного моделювання ефективних акустичних й пружних постійних моделі III в різних тектонофаціях епізони можна зробити такі висновки:

- акустична й пружна симетрія текстури моделі аксіальна ромбічна ($\mu_{11}^* < \mu_{22}^* < \mu_{33}^*$; $C_{11}^* < C_{22}^* < C_{33}^*$; $C_{44}^* > C_{55}^* > C_{66}^*$). Для тектонофацій IX, X акустичну симетрію текстури можна вважати аксіальною (табл. 1);

- величина інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії A_μ мало змінюється для середньобальних тектонофацій V–VIII і знаходяться в межах 6 % і істотно зростає для вищих тектонофацій, досягаючи 14,1 % для тектонофації X;

- швидкість квазіповздовжньої хвилі на стереопроєкціях вказівних поверхонь збільшується від 5,9 км/с для тектонофації V до 6,55 км/с для найвищої X тектонофації. На відміну від найвищих тектонофацій VIII–X катазони і мезозони, де для моделі I спостерігається локалізація найменших значень швидкостей квазіповздовжніх хвиль в центральній частині, в епізоні (умови крихких деформацій) до цієї області приурочений максимум швидкостей;

- на відміну від умов катазони і мезозони величина різниці між "швидкою" і "повільною" поперечними модами квазіпоперечних хвиль зменшується від 0,45 км/с в тектонофації V до 0,35 км/с в тектонофації VIII і складає лише 0,24 км/с в тектонофації X. Ефекти розщеплення хвиль послаблюються. Із зростанням рівня дислокаційних перетворень характер розповсюдження квазіпоперечних хвиль істотно змінюється, стереопроєкції ускладнюються додатковими екстремумами і для тектонофації X епізони можна виділити 6 екстремумів, де різниця швидкостей "швидкої" і "повільної" квазіпоперечних хвиль дорівнює нулеві і розщеплення хвиль відсутнє;

- величина диференціального коефіцієнту пружної анізотропії зростає від 8,5 % для тектонофацій I–V (рис. 1, д, є) 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 величина коефіцієнту диференціальної пружної анізотропії становить менше 1 %. В цих напрямках закономірності розповсюдження пружних хвиль не відрізняються від ізотропного середовища;

- кут відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі змінюється в незначних межах навіть для тектонофації VIII і досягає свого максимуму в 13° в тектонофації X. Інтенсивність і характер зміни цього параметру пружної анізотропії в умовах епізони істотно відрізняється від умов катазони і мезозони.

Встановлено, що в усіх випадках моделювання тектонофацій катазони, мезозони і епізони пружна симетрія моделей "залізитий кварцит" накладає жорсткі обмеження на симетрію всіх без виключення параметрів анізотропії об'ємних пружних хвиль та на симетрію вказівної поверхні диференціального коефіцієнту пружної анізотропії.

Висновки Розроблено математичні моделі тектонофацій на прикладі реальних порід КНГС, що відповідають різним типам деформацій: пластичним, пружно-

пластичним і крихким. Вони пов'язані з реальними геологічними обстановками катазони, мезозони і епізони.

За результатами проведеного математичного моделювання ефективних акустичних і пружних параметрів тектонофацій катазони, мезозони і верхньої епізони для моделей залізитих кварцитів, характерних для Криворіжжя, встановлено, що значення інтегрального коефіцієнту пружної анізотропії A_μ неухильно зростає з ростом рівня дислокаційних перетворень не залежно від PT -умов, і найвищих своїх значень досягає у найвищих тектонофаціях IX–X. Для умов катазони різниця між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями сягає величини 2,1 км/с, в той час як для умов мезозони ця величина майже вдвічі менша. Ефекти розщеплення хвиль в умовах катазони і мезозони значні, в епізоні величина цього параметру не перевищує 0,25 км/с. Для всіх моделей тектонофацій показано, що навіть для тектонофацій IX–X існують окремі напрямки, де закономірності розповсюдження пружних хвиль фактично нічим не відрізняються від ізотропного середовища.

За методикою акустичного текстурного аналізу тектонофацій дислокаційних структур, яка дає можливість кількісного і якісного аналізу тектонофацій, встановлено, що між рівнем дислокаційних перетворень і акустичним рівнем тектонофацій існують стійкі зв'язки. Показано, що кількісний рівень тектонофацій можна оцінити за величиною інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії A_μ і диференціальним коефіцієнтом пружної анізотропії. Якісну інтерпретацію тектонофацій можна здійснювати за результатами аналізу параметрів пружної анізотропії – швидкістю квазіповздовжньої хвилі, різницею між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями, і кутом відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі.

1. Безродний Д.А. Пружна анізотропія метаморфічних порід Кривбасу і її використання для вирішення задач тектонофаціального аналізу / Д.А.Безродний // Дис. на здобуття наукового ступеня канд. геолог. наук – 2008.
2. Безродний Д.А. Математичне моделювання впливу кристалографічної орієнтації мінералів і мікротріщин на параметри пружної і акустичної анізотропії / Д.А.Безродний, І.М.Безродна. – 2008. – № 45.
3. Лебедев Т.С. РТ-исследования физических свойств пород верхней части разреза Криворожской сверхглубокой скважины. Упругие характеристики / Т.С. Лебедев, В.А. Корчин, П.А. Буртний. – 1992. – 14. – № 5.
4. Александров К.С. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород / К.С. Александров, Г.Т. Продайвода – РАН, 2000.
5. Каляев Г.И. Палеотектоника и строение земной коры докембрийской палеорудной провинции Украины / Г.И. Каляев, Е.Б. Глевасский, П.С. Димитров. – К., 1984.
6. Курлов Н.С. Криворожская сверхглубокая скважина: значение для петрогенеза и петрологии / Н.С. Курлов, Р.Я. Белевцев, В.В. Решетняк, Ю.П. Мечников. – 1997. – № 5.
7. Лукієнко О.І. Тектонофаціальна структура Кривбасу / О.І.Лукієнко. – 2000. – Вип. 17.
8. Дерябин Н.И. Еще раз о формировании пород Криворожской структуры / Н.И. Дерябин. – 2008. – № 1.
9. Розробка інтерпретаційної основи сейсмоакустичного інваріантно-поляризаційного методу (на прикладі Криворізької і Лисівської надглибоких свердловин) / [Продайвода Г.Т., Безродний Д.А., Павлов Г.Г. та інш.]: Звіт про НДР – К., 2002.
10. Продайвода Г.Т. Математичне моделювання геофізичних параметрів / Г.Т. Продайвода, С.А. Вишва. – К., 1999.
11. Паталаха Е.И. Тектонофації мезозони (атлас мікроструктур) / Е.И. Паталаха, А.И. Лукиенко, В.А. Дербенев. – Алма-Ата, 1987.