

УДК 550.834+550.34.016+550.34.013.4

Д. Безродний, канд. геол. наук

ПРИНЦИПИ ВИЗНАЧЕННЯ РІЗНИХ БАЛІВ ТЕКТОНОФАЦІЙ ЗА ПЕТРОАКУСТИЧНИМИ ДАНИМИ НА ПРИКЛАДІ МЕТАМОРФІЧНИХ ПОРІД КРИВОРІЖЖЯ ("СУПУТНИК-2")

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Розроблено методику петроакустичного аналізу тектонофацій, що дає можливість їх якісної та кількісної оцінки. Показано, що рівень деформаційних перетворень можливо оцінювати за величинами акустичної і пружної анізотропії.

Methodology of petroacoustic analysis of tectonic facies that enables the qualitative and quantitative assessment developed. Fact that the level of deformation changes may be measured by the values of the acoustic and elastic anisotropy is shown.

Вступ. Протягом останніх років все більше зростає інтерес до вивчення сейсмічної анізотропії земних надр. Ці дослідження представляють інтерес для вирішення багатьох проблем фізики Землі, регіональної геології і геофізики, зокрема, структурної геології і тектонофізики.

Стан проблеми Дослідження природи деформованих метаморфічних порід Криворіжжя базуються на парагенетичній основі, що враховує РТ-умови та реологічні властивості (характер деформації при тривалій дії напружень) середовищ, а також відповідні цим властивостям механізми дислокаційних перетворень порід [4]. При цьому використовується уявлення про структурно-реологічні обстановки – кататазону, мезозону та первинну й вторинну епізону. Подібні обстановки певною мірою співвідносяться з відомими петрологічними зонами Грубенманна [2]. Але від останніх відрізняються тим, що при їх виділенні, в першу чергу, враховуються реологічні фактори.

Важливою складовою тектонофаціального аналізу є метод тектонофацій, призначений для визначення відзначених умов та ступенів дислокаційних перетворень порід та середовищ у зонах зсувної течії за спеціально прийнятою десятибальною шкалою. Така шкала базується на сумі якісних та кількісних ознак дислокаційних перетворень порід, з урахуванням реологічних властиво-

стей середовищ, на усіх (доступних для структурного аналізу) масштабних рівнях. В основу такої шкали покладено розрахунки компонент деформації геологічних тіл по кінематичних осях а (напрямок максимального видовження), b та c (напрямок максимального стиснення) на базі моделі еліпсоїду обертання [4], що характеризує простий зсув, а для високопластичних середовищ, крім того, – на базі еліпсоїда видовження-скорочення. У рамках такої шкали кожному балу перших восьми тектонофацій (ТФ I – VIII) відповідають десятиградусні інтервали (0-10°, 11-20°...71-80°) кута зсуву за моделлю еліпсоїда обертання, а двом останнім (ТФ IX – X) – відповідно п'ятиградусні інтервали (80-85°, 86-90°).

За результатами тектонофаціального аналізу, що були виконані О.І. Лукіємком, Є.І. Паталахою та В.В. Гончаром [3, 6] встановлено, що в Кривбасі крім добре вивченої крихкої розривної тектоніки широко розвинена і в'язка розривна тектоніка, яка тісно пов'язана з зональним метаморфізмом, що утворений амфіболітовою, епідот-амфіболітовою та зеленосланцевою фаціями, і яка відіграє найбільш суттєву роль у формуванні тектонічної структури об'єкту досліджень.

Тектонічні деформації гірських порід проявляються в орієнтації кристалографічних осей мінералів, у видо-вженні або сплюснутті породоутвірних мінералів та

формуванні макро- і мікротріщин, які залежать від інтенсивності деформацій і термодинамічних умов (температури, напруженого стану).

Структура і текстура гірських порід проходять в процесі формування і перетворення ряд стадій деформації: пластична деформація – перекристалізація – розриви і в'язкі розриви – крихке руйнування (в процесі розвантаження).

Між структурою, складом і ступенем деформації існує закономірна відповідність. Так сильно деформовані породи формуються в умовах більш низьких тисків і температур, ніж менш деформовані породи [1, 5, 7, 8]. Процеси катаклазу характеризуються текстурними змінами порід і мінералів (зокрема кварцу): розгнейсуванням, переорієнтацією кристалів мінералів і зміною їхніх розмірів та форми.

Розроблена методика акустичного текстурного аналізу дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль в гірських породах, визначати пружну симетрію та текстуру порід [9]. Ця інформація особливо важлива при інтерпретації геофізичної інформації, отриманої при дослідженнях порід на значних глибинах і в складних геологічних умовах, зокрема, для тектонофаціальних досліджень метаморфічних порід.

При аналізі параметрів акустичного еліпсоїду текстур метаморфічних порід передбачалося, що його тензор має геометричний образ, який представляє собою характеристичну поверхню другого порядку – трьохосний еліпсоїд. Якщо скористатися узагальненим поняттям цієї поверхні, яка прийнята при аналізі деформації – еліпсоїдом деформації Флінна [9, 10], то можна побудувати поверхню, яка зв'язана з компонентами акустичного тензора, приведеними до головної системи координат, рівняння якої має такий вигляд:

$$\frac{x_1^2}{\langle \mu_1 \rangle^2} + \frac{x_2^2}{\langle \mu_2 \rangle^2} + \frac{x_3^2}{\langle \mu_3 \rangle^2} = 1.$$

Ця поверхня є акустичним еліпсоїдом і має тісний взаємозв'язок із формою і орієнтацією еліпсоїда деформації, який характеризує скінчену однорідну деформацію. Хід деформації геометрично виражає зміни форми еліпсоїду деформації. Внаслідок прогресивного розвитку цього процесу кожний еліпсоїд деформації при зміні від кулі до його кінцевої форми повинен пройти через неперервну серію інших еліпсоїдальних форм. Графічно його представляють діаграмами деформації Флінна [9, 10].

Акустичний еліпсоїд характеризує ступінь упорядкованості структурних елементів текстури гірської породи, а інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії – наскільки текстура гірської породи відхиляється від найближчої до неї неупорядкованої до текстури.

Зміна форми і орієнтація структурних елементів гірської породи обумовлені девіаторною складовою тензора деформації. Інтенсивність деформації зсуву, яка і спричиняє орієнтацію структурних елементів, визначається величиною, яка з точністю до постійних, дорівнює другому інваріанту девіаторної частини тензора деформації:

$$I_\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – власні значення деформації [9].

Беремо до уваги, що зі збільшенням концентрації упорядкованих структурних елементів при збільшенні інтенсивності деформації зсуву відповідно збільшується і величина інтегрального коефіцієнту акустичної і пружної анізотропії. Цілком природно, це дає підстави стверджувати, що величина інтегрального коефіцієнту аку-

стичної анізотропії A_μ повинна бути пропорційна параметру інтенсивності деформацій I_ε , а саме:

$$A_\mu = \theta \cdot I_\varepsilon, \quad (2)$$

де θ – деякий масштабний множник, який залежить від фізичної природи упорядкованих структурних елементів текстури гірської породи.

В свою чергу, величина інтенсивності деформацій з точністю до постійного множника, дорівнює куту зсуву ω_ε між двома ортогональними напрямками, які лежать в октаедричній площадці, тобто:

$$\omega_\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3}} I_\varepsilon, \quad (3)$$

де ω_ε – кут, що визначає положення ортогональних напрямків в октаедричній площадці, між якими відбувається зсув. Відповідно, приймаючи до уваги (2), величина кута зсуву буде пропорційною величині інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії:

$$\omega_\varepsilon = \beta I_\mu, \quad (4)$$

де β – деякий масштабний множник, який залежить від фізичної природи упорядкованих структурних елементів текстури гірської породи.

Для оцінки величини множника β були використані значення кута зсуву ω_ε , який у природних дислокаційних структурах фактично напрямку корелюється зі значеннями кутів падіння шарів у вертикальних флексурах та на крилах вертикальних складок.

Визначення тектонофацій порід катазони ("Супутник-2").

Породи свердловини "Супутник-2" представлені в тектонофаціальному відношенні найбільш високобальними тектонофаціями VIII-X, а в деяких випадках навіть IX-X катазони, на незначних інтервалах тектонофаціями VI [9]. Виняток складають невеликі інтервали в приустовій та призабійній частинах свердловини.

У табл. 1 наведені дані про інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_μ , параметри акустичної анізотропії та симетрію акустичного тензору.

Величина коефіцієнта відносної середньоквадратичної акустичної анізотропії (A_μ) визначається як міра відхилення акустичних констант анізотропної текстури від найближчої до неї ізотропної текстури.

Інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії визначався за формулою:

$$A_\mu = \sqrt{\frac{\frac{1}{3} [(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + (\mu_{11} - \mu_{33})^2 + (\mu_{22} - \mu_{33})^2]}{(\mu_{ii}^2)_c}} \cdot 100\%,$$

де $(\mu_{ii}^2) = \mu_{11}^2 + \mu_{22}^2 + \mu_{33}^2$; а $\mu_{11}^2, \mu_{22}^2, \mu_{33}^2$ – власні значення акустичного тензора.

Класифікацію текстур на вищу, середню і нижню категорії було здійснено за симетрією акустичного тензору з урахуванням довірчих границь знайдених власних значень:

- сферична симетрія ($\infty/\infty mmm$), якщо виконується рівність $\langle \mu_{11} \rangle = \langle \mu_{22} \rangle = \langle \mu_{33} \rangle$;
- поперечно-ізотропна симетрія (∞ / mmm), якщо виконується умова $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{22} \rangle = \langle \mu_{33} \rangle$; або $\langle \mu_{11} \rangle = \langle \mu_{22} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle$; або $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle = \langle \mu_{22} \rangle$;
- ромбічна симетрія (mmm), якщо виконується умова $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{22} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle$.

Таблиця 1

Характеристика тектонофацій катазони метаморфічних порід свердловини "Супутник-2"
за даними акустичного текстурного аналізу

№ з/п	Номери зразків	Глибина, м	Тип породи	Тектонофації (за Лукієнком-Павловим)	Коефіцієнт акустичної анізотропії, A_{μ} , %	Симетрія акустичного тензора	L_{μ}	S_{μ}	Акустична деформаційна фація
1	7-90	490	Сланець біотитовий	VI-VII	7,8	Планальна mmm	1,05	1,15	VII
2	8-90	513	Сланець біотит-амфіболовий	VI-VII	2,8	Поперечно-ізотропна	1,06	1,00	V
3	9-90	650	Сланець хлорит-магнетит-кварцовий	VI-VII	7,1	Аксіальна mmm	1,10	1,08	VII
4	10-90	674	Гнейс	IX-X	23,4	Планальна mmm	1,06	1,72	X
5	11-90	705	Гнейс	IX	14,6	Планальна mmm	1,07	1,27	IX
6	12-90	788	Сланець біотитовий	VIII-IX	24,9	Планальна mmm	1,13	1,71	X
7	13-90	809	Гнейс	VII	9,5	Планальна mmm	1,11	1,13	VII
8	14-90	823	Залізистий кварцит	V-VI	6,0	Планальна mmm	1,04	1,11	VI
9	15-90	904	Сланець біотитовий	VII-VIII	16,1	Планальна mmm	1,03	1,43	IX
10	17-90	915	Гнейс	VII	6,5	Планальна mm	1,03	1,14	VII
11	18-90	1115	Кварцит мусковітовий	VII-VIII	9,0	Планальна mmm	1,11	1,13	VII
12	19-90	1246	Сланець біотитовий	IX	18,0	Планальна mmm	1,03	1,40	IX
13	22-90	1510	Гнейс	VIII	13,4	Планальна mmm	1,10	1,27	VIII
14	223505	1617	Сланець гранат-біотитовий	IX	20,2	Планальна mmm	1,19	1,42	X
15	223506	1644	Сланець біотитовий	IX	14,2	Планальна mmm	1,12	1,28	IX
16	23-90	1910	Кварцит слюдяний	VII-VIII	10,4	Планальна mmm	1,02	1,25	VIII
17	24-90	1984	Сланець гранат-біотитовий	VII-VIII	5,0	Планальна mmm	1,05	1,08	VI
19	1775226	2582	Кварцит залізистий	VII	6,0	Планальна mmm	1,04	1,11	VI

За результатами аналізу параметрів акустичного еліпсоїду: акустичної лінійності L_{μ} і акустичної сланцюватості

$$S_{\mu} (L_{\mu} = \frac{\mu_q}{\mu_m}; S_{\mu} = \frac{\mu_m}{\mu_p}), \text{ де } \mu_q, \mu_m, \mu_p - \text{найбільше, проміжне}$$

і найменше значення акустичного тензора) здійснюється класифікація текстур на планальний і аксіальний типи симетрії. Якщо значення L_{μ} і S_{μ} потрапляють на координатні осі, то це свідчить про наявність текстур аксіальної і планальної поперечно-ізотропної симетрії.

За результатами аналізу тектонофаціальних даних і параметрів акустичної анізотропії зразків метаморфічних порід свердловини "Супутник-2" встановлено:

- за величиною інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії 34 % порід високоанізотропні ($A_{\mu} > 10\%$), 52 % – середньоанізотропні ($5\% < A_{\mu} < 10\%$) та 5 % – низькоанізотропні ($A_{\mu} < 5\%$);

- всі без винятку зразки вищих тектонофацій VIII-X характеризуються високими значеннями інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії A_{μ} , а найбільш високобальним тектонофаціям IX-X катазони відповідають значення A_{μ} більше за 14 %;

- 92 % зразкам порід тектонофацій VI-VII відповідають середні значення інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії і лише для одного зразка характерне низьке значення цього параметру (№ 18-90), який характеризується поперечно-ізотропною симетрією акустичного тензора. Чіткого розмежування VI-VII рівня текто-

нофацій катазони за коефіцієнтом інтегральної акустичної анізотропії зробити не вдалося;

- зразкам найвищих тектонофацій VIII-X притаманна планальна ромбічна симетрія текстури акустичного тензора, причому параметр акустичної сланцюватості S_{μ} набагато перевищує параметр акустичної лінійності L_{μ} ;

- аксіальну ромбічну або акустичну лінійну текстуру мають 4 зразки (18 %), в яких структурні неоднорідності порід витягнуті переважно субвертикально, а, отже, порода перебувала в умовах бокового тиснення. Проте значення параметрів акустичної лінійності цих зразків ненабагато перевищують значення параметрів акустичної сланцюватості, що свідчить про складність деформаційних перетворень метаморфічних порід. Теж саме стосується і всіх зразків з середніми значеннями інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії, для яких перевага одного з параметрів акустичної анізотропії над іншими незначна.

Значення множника β для досліджених зразків з свердловини "Супутник-2" змінюються в значно більших інтервалах для відповідних тектонофацій мезозони і катазони. Проте тенденція зменшення цього показника з зростанням балу тектонічних перетворень залишається. При розрахунках β для Криворізької надглибокої свердловини встановлено:

- для тектонофації VI β змінюється від 10,8 до 21,2 з середнім значенням 16,5;

- для тектонофації VII β змінюється від 6,8 до 11,2 з найбільш поширеними значеннями 7,6-8,8;

- для тектонофації VIII інтервал зміни β складає 5,0-9,9 з найбільш поширеними значеннями 5,0-7,0;

- для найвищих тектонофацій мезозони IX–X β змінюються в вузькому інтервалі значень від 4,1 до 6,5.

Відповідні розрахунки для свердловини "Супутник-2" показали:

- для тектонофації VI єдине значення множника β становить 19,64;

- для тектонофації VII β змінюється від 6,7 до 13,75 з найбільш поширеними значеннями 7,2-8,8;

- для тектонофації VII β змінюється від 4,7 до 6,7;

- значення множника β для найвищих тектонофацій IX–X катазони змінюється від 3,5 до 6,2.

Висновки. За результатами комплексного аналізу параметрів акустичного еліпсоїду, інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії, параметрів пружної анізотропії і функції розподілу орієнтації мінералів і мікротріщин зразків метаморфічних порід свердловини "Супутник-2" доведена ефективність застосування акустичного методу текстурного аналізу гірських порід для розв'язання задач тектонофаціального аналізу та динамічних структурних задач.

Встановлено, що для метаморфічних порід, що відносяться до реологічних обстановок катазони, спостері-

гається прямий зв'язок між величиною інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії і ступенем деформаційних перетворень (відповідним балам тектонофацій). Вищим балам тектонофацій характерні найвищі значення інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії (до 25,4 %), а середнім балам тектонофацій V-VII – переважно середні і іноді низькі значення цього параметру. На основі аналізу зв'язків між балам тектонофацій і величиною інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії створена для умов катазони і мезозони шкала акустичних деформаційних фацій, яка цілком узгоджується з результатами тектонофаціальних досліджень.

1. Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск, 2000. 2. Грубенман У., Ниггли П. Метаморфизм горных пород. Общая часть // Л.-М., 1933. 3. Лукиенко О.І. Тектонофаціальна структура Кривбасу // Вісник Київ. Ун-ту. Геологія. – 2000. – № 17. – С. 8-13. 4. Паталаха Е.І. Тектонофаціальний аналіз складчатих сооружений фанерозоя (обоснование, методика, приложение). – М., 1985. 5. Паталаха Е.І. Тектонофації мезозони. – Алма-Ата, 1987. 6. Паталаха, Е.І., Лукиенко А.І., Гончар В.В. Тектонические потоки как основа понимания геологических структур. – К., 1995. 7. Паталаха Е.І., Лукиенко А.І., Дербенев В.А. Тектонофації мезозони (атлас микроструктур). – Алма-Ата, 1987. 8. Продайвода Г.Т. Акустика текстур гірських порід: Навч. посіб. – К., 2004. 9. Продайвода Г.Т., Вижева С.А., Безродний Д.А., Безродна І.М. Акустичний текстурний аналіз метаморфічних порід Криворіжжя: Монографія. – К., 2011. 10. Dell'angelo L.N., Tullis I. Fabric development in experimentalles sheared gyaartzites // Tectonophysics. – 1989. – V. 169. – P. 1-21.

Надійшла до редколегії 15.09.12