

УДК 550.834+550.34.016+550.34.013.4

Д. Безродний, канд. геол. наук

ПРУЖНА І АКУСТИЧНА АНІЗОТРОПІЯ МЕТАМОРФІЗОВАНИХ СЛАНЦІВ КРИВОРІЗЬКОЇ НАДГЛИБОКОЇ СВЕРДЛОВИНИ

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

Досліджено швидкості пружних хвиль метаморфічних сланців Криворізької надглибокої свердловини (971-5337 м). Обчислено детерміновані складові акустичного тензору і тензору пружних зміщень, визначена їх симетрія. Побудовано стереопроекції вказаних поверхонь параметрів анізотропії. Проведено аналіз параметрів пружної анізотропії.

The velocities of volumetric elastic waves of metamorphic slates of Kryvyi Rig superdeep borehole (971-5337 m) have been investigated. Determined components of the acoustic tensor and the tensor of elastic displacement have been calculate, their symmetry have been determined. The stereoprojections of the index surfaces of the anisotropy's parameters have been constructed. Analysis of parameters of elastic anisotropy was conducted.

Вступ. У наш час підвищений інтерес у геологів і геофізиків, які вивчають процеси структуроутворення, викликають дослідження параметрів пружної анізотропії гірських порід, які є джерелом багатої інформації про склад, структуру та напружений стан земних надр. Наявність анізотропії пружних хвиль свідчить про існування у геологічних середовищах впорядкованості різної фізичної природи, яка відповідає цілком певним структурним геологічним рівням. Типи впорядкованості визначаються механізмом деформації геологічного середовища. Таким чином, за результатами інтерпретації даних азимутальної пружної анізотропії різних типів хвиль, можна отримати відповідь про характер геодинамічних процесів, які відбувалися і відбуваються у надрах Землі, розв'язувати задачі прогнозування геологічного розрізу. При розв'язку таких задач особливу роль відіграють ультразвукові дослідження керну глибоких і надглибоких свердловин.

Стан проблеми Для вивчення анізотропії швидкостей пружних хвиль у більшості випадків застосовують метод ортогональних напрямків (Ф. Берч), в якому експериментальні вимірювання швидкостей повздожних та поперечних хвиль здійснюють у трьох ортогонально орієнтованих циліндричних зразках, що виготовлені з одного блоку породи і їхня орієнтація узгоджена із елементами текстури гірської породи. Метод дозволяє виявити наявність анізотропії і зробити наближену оцінку коефіцієнту анізотропії пружних хвиль. До суттєвих недоліків методу слід віднести неможливість визначення просторового розподілу швидкостей пружних хвиль і їхніх екстремальних значень та повного набору пружних постій-

них. Крім того, метод не в повній мірі враховує акустичну неоднорідність будови текстур гірських порід.

Для подолання цих недоліків З. Прос і В. Бабушка у 1967 р запропонували метод сфери. Визначення анізотропії швидкостей повздожних хвиль в цьому методі здійснюється на зразках, що мають форму кулі. Метод забезпечує визначення детального просторового розподілу швидкостей квазіповздожних хвиль як в нормальних умовах, так і в умовах гідростатичного тиску та кількісну оцінку коефіцієнта анізотропії квазіповздожних хвиль. До недоліків методу слід віднести трудомісткість виготовлення зразків у формі кулі і неможливість дослідження швидкостей поперечних хвиль, що не забезпечує розрахунку пружних модулів та повного набору компонент матриці пружних постійних гірських порід.

В акустополаризаційному методі (Ф.Ф. Горбацевич та ін.) дослідження пружної анізотропії мінералів і гірських порід базується на вивченні явища розщеплення хвиль поперечної поляризації. Реєстрація амплітуди чисто поперечних лінійно-поляризованих ультразвукових коливань здійснюється в зразках гірських порід шляхом повороту зразку відносно векторів поляризації випромінюючого і приймального перетворювачів на кут 360° . Метод дозволяє визначати наявність анізотропії, число і просторову орієнтацію елементів пружної симетрії середовищ, виявляти ефект лінійної акустичної анізотропії поглинання. До суттєвого недоліку методу слід віднести складність розрізнення при дослідженнях ефектів лінійної анізотропії поглинання та пружної анізотропії, а у випадку низькосиметричних середовищ сумісний аналіз цих ефектів дуже складний.

Метод особливих напрямків (К.С. Александров, Т.В. Рижова, Б.П. Беліков, А.О. Шабанова, Н. Крістенсен, Р. Рамананатандро) представляє собою модифікацію методики дослідження пружних властивостей монокристалів. В цьому методі швидкості розповсюдження пружних хвиль вимірюються в особливих напрямках, що суворо узгоджені із елементами симетрії структури мінералів і текстури гірських порід. Метод забезпечує якісні результати при вивченні гірських порід, елементи симетрії текстур яких відомі. Безперечною перевагою методу є можливість отримання повного набору пружних постійних для текстур гірських порід із відомою просторовою орієнтацією елементів симетрії. Якщо симетрія текстури гірської породи і просторова орієнтація її елементів невідомі, то метод особливих напрямків застосовувати неможливо.

Інваріантно-поляризаційний метод (Г.Т. Продайвода, С.А. Вишва, Д.А. Безродний) забезпечує можливість визначення повного набору пружних постійних і симетрії текстури гірських порід шляхом вимірювання фазових швидкостей різної поляризації в 9-ти напрямках куборомбододекаедра. Причому при відсутності апріорної інформації про симетрію текстури гірської породи немає необхідності узгодження напрямків вимірювання швидкостей із просторовим положенням елементів симетрії. Визначення повного набору матриці регулярної складової ефективного тензора пружних постійних текстур гірських порід забезпечує повний розв'язок задачі визначення параметрів анізотропії пружних хвиль, включаючи побудову стереопроекцій ізоліній індикатрис фазових швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль. Безперечною перевагою інваріантно-поляризаційного методу є можливість кількісної оцінки регулярної і флюктуаційної складових ефективною фазовою швидкості пружної хвилі, що забезпечує розрізнення ефектів анізотропії неоднорідностей та можливість визначення акустичної і пружної симетрії текстури гірських порід при відсутності апріорної інформації і довільній орієнтації лабораторної системи координат.

Стаття присвячена експериментальним дослідженням пружної анізотропії метаморфічних сланців Криворізької надглибокої свердловини. Обчислення детермінованої складової тензору пружних постійних здійснювалося в триклінному наближенні з застосуванням операції згладжування флюктуаційної складової фазових швидкостей, яка обумовлена недосконалістю текстури порід. Пружні постійні були представлені в стандартній акустичній системі координат, базис якої співпадає з власними векторами детермінованої складової акустичного тензора.

Для експериментального вивчення пружних постійних були досліджені 43 зразки керну метаморфічних сланців свердловини КНГС-8 з різних глибин від 971 м до 5337 м. За результатами петрографічних досліджень був встановлений їхній мінеральний склад та структурно-текстурні особливості.

За результатами проведених детальних макро- і мікропетрографічних досліджень основних петрографічних типів порід КНГС встановлено [2], що вони представлені сланцями біотитовими, амфібол-біотитовими, амфібол-епідотовими, гранат-біотитовими, хлорит-амфіболовими, кварц-біотитовими, кварц-амфіболовими, біотит-амфіболовими, карбонат-біотитовими,

За даними електронно-мікроскопічних досліджень зразків, було встановлено, що мікротріщинуватість присутня практично в усіх зразках у вигляді мікротріщин, що оконтурюють окремі зерна мінералів, а самі тріщини можуть займати до 2 % об'єму породи, а за даними петрографічних досліджень – ще більший відсоток об'єму. Формати мікротріщин α змінюються від 0,001 до 0,89. При дослідженні орієнтації пустот в площині X_1X_2 було встановлено, що практично для всіх зразків характерно існування двох

майже ортогональних систем мікротріщин, до яких належить 90 % всіх пустот. В більшості випадків зерна породотвірних мінералів і мікротріщини мають переважну орієнтацію вздовж осі X_3 . Значні коливання форматів зерен породотворюючих мінералів і мікротріщин свідчать про складні деформаційні процеси, при яких відбувалося формування метаморфічних сланців КНГС.

Петроакустичні вимірювання зразків гірських порід з наявною інтенсивною тріщинуватістю були ускладнені, а іноді і не дали результатів у зв'язку з порушеннями зразків при накладанні додаткової напруги та незворотних змінах в тріщинно – поровому просторі зразків при їх виносі на денну поверхню.

Для вимірювань були виготовлені зразки, які мають форму куборомбододекаедра, грані якого позначаються кристалграфічними індексами [100], [010], [001] і т.п. у робочій системі координат. Вздовж кожного з 9 напрямків куборомбододекаедра були виміряні фазові швидкості трьох пружних хвиль (кваповздовжньої, "швидкої" і "повільної" квазіпоперечних хвиль). Для вимірювань була використана ультразвукова установка, принцип дії якої описаний в роботах [2]. Частота коливань – 0,8 МГц, похибка визначення швидкості квазіповздовжньої хвилі 0,26 %, а квазіпоперечної – 0,61 %.

На основі експериментальних досліджень швидкостей пружних хвиль сейсмоакустичним інваріантно-поляризаційним методом для зразків метаморфічних гірських порід свердловини КНГС-8 та свердловин полігону були розраховані:

- урівноважені швидкості квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль;
- значення акустичного тензора в робочій системі координат;
- власні значення і їхні довірчі границі та їхні власні напрямки детермінованої складової акустичного тензора;
- ефективні пружні сталі;
- акустична лінійність та сланцюватість (шаруватість) ;
- параметри азимутальної анізотропії пружних хвиль.

Для згладжування флюктуаційної складової ефективною фазовою швидкості, яка обумовлена недосконалістю текстур гірських порід, застосовувався інваріантно-поляризаційний метод, описаний в роботі [1]. Згортка акустичного тензора μ_i є інваріантом. Отже, в будь-яких трьох взаємно ортогональних напрямках хвильової нормалі сума квадратів фазових швидкостей ізонормальних хвиль буде сталою величиною. Ця фундаментальна властивість будь-якого анізотропного середовища використовувалася для врівноваження ефективних фазових швидкостей в робочих системах координат куборомбододекаедру. Операція врівноваження фазових швидкостей і обчислення осереднених компонент акустичного тензора $\langle \mu_i \rangle$ в робочій і власній системах координат, визначення його власних векторів і значень наведені в роботі [1].

Коефіцієнт диференціальної відносної середньоквадратичної пружної анізотропії визначався за формулою:

$$A_{(c)} = \sqrt{F_{\min} / (\Lambda^2)_c} \cdot 100\%,$$

де $F_{\min} = (\Lambda^2)_c - (\Lambda^{02})_c$, а $(\Lambda^2)_c = \Lambda_{11}^2 + \Lambda_{22}^2 + \Lambda_{33}^2 + 2(\Lambda_{12}^2 + \Lambda_{13}^2 + \Lambda_{23}^2)$; $(\Lambda^2)_c$ і $(\Lambda^{02})_c$ – відповідно приведені тензори Крістоффеля для анізотропного середовища і найближчого до нього ізотропного середовища.

Інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії визначався за формулою:

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

$$(\mu_{ij}^2)_c$$

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

Класифікацію текстур на вищу, середню і нижню категорії здійснюється в даному методі за симетрією акустичного тензора з урахуванням довірчих границь знайдених власних значень таким чином:

- сферична симетрія (∞/∞ 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 $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{22} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle$.

Обчислення врівноважених швидкостей об'ємних пружних хвиль, значень акустичного тензора в робочій системі координат, власних значень і їхніх довірчих границь та їхніх власних напрямків детермінованої складової акустичного тензора досліджених зразків порід, початкових наближень для пружних постійних здійснено на основі результатів експериментальних вимірювань фазових швидкостей квазіповздовжньої, "швидкої" і "повільної" квазіпоперечних хвиль та густини порід. За результатами розрахунків власних значень акустичного тензора розраховано параметри акустичної лінійності L_a і сланцюватості S_a та визначено тип симетрії текстури акустичного тензора.

Розрахунок пружних постійних метаморфічних порід Криворіжжя було проведено з використанням програми "Urgv16". У ній у якості вихідних даних використано файли врівноважених швидкостей квазіповздовжньої і квазіпоперечних хвиль, акустичних констант і початкових наближень пружних постійних, які було розраховано за програмою "Akust10". За результатами обчислень для кожного зразку було сформовано матрицю пружних постійних з урахуванням флуктуаційної складової та здійснено перевірку гіпотези значимості відхилення пружних постійних від нуля.

За результатами проведеного аналізу параметрів акустичної анізотропії основних типів метаморфічних сланців, що представляють Криворізьку надглибоку свердловину, встановлено що величина коефіцієнту анізотропії змінюється від 1,78 до 25,1 %, складаючи в середньому 12,54 %. Сланці, в основному, представлені тектонофаціями VII – X, іноді тектонофацією VI;

Співставлення власних значень з урахуванням їхніх довірчих меж дозволяє стверджувати, що симетрія акустичного тензора досліджених зразків метаморфічних порід є не вище ромбічної ($\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{22} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle$).

Це підтверджується і аналізом параметрів акустичного еліпсоїду: акустичної лінійності $L_a = \mu_0 / \mu_m$ і акустичної сланцюватості $S_a = \mu_0 / \mu_p$, які наведені на рис. 1. Приведений графік залежності $L_a = f(S_a)$ характеризує ступінь упорядкованості елементів текстури породи уздовж окремих напрямків (акустична лінійність) або розміщення на площині (акустична сланцюватість).

Встановлено, що для метаморфізованих сланців Криворізької надглибокої свердловини більш характерні сланцюваті (планальні) текстури, які складають майже 60 % досліджених зразків (рис. 1). Сланцювато-лінійний і лінійний мотиви текстури присутні приблизно у рівних частинах. Виділено два зразки, які можна апроксимувати поперечно-ізотропною симетрією, інші зразки характеризуються ромбічною симетрією текстур акустичного тензора. Кристалічні сланці з сланцюватими текстурами характеризуються порівняно більш високими значеннями інтегрального коефіцієнту акустичної анізотропії A_p , ніж сланці з лінійно-сланцюватим і лінійним мотивами.

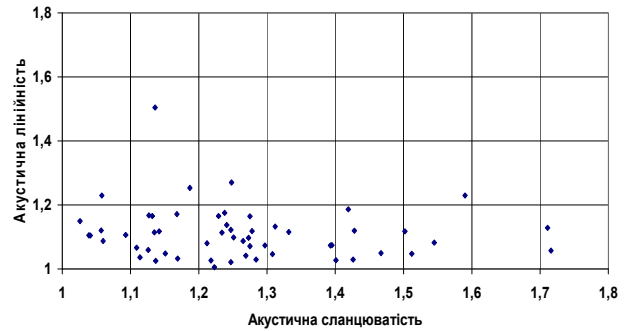


Рис. 1 Діаграма параметрів акустичного еліпсоїду текстур сланців КНГС

Проведений порівняльний аналіз параметрів акустичного еліпсоїду текстур основних різновидів сланців КНГС зі ступенем тектонічних перетворень (рівень тектонофацій). Він показав, що майже для 75 % з них характерна така закономірність: вищим балам тектонофацій (9-10 рівні) мезозони відповідають точки діаграми, що максимально наближені до осі S_p або розташовані поблизу неї; більш низьким балам тектонофацій (7-8 рівні) мезозони відповідають точки діаграми, що лежать поблизу прямої, що поділяє акустичні текстури на переважно лінійні або сланцюваті або вище від неї.

З метою оцінки пружної симетрії текстур та параметрів азимутальної пружної симетрії метаморфічних сланців КНГС з урівноважених значень фазових швидкостей ізонормальних хвиль (квазіповздовжньої і "швидкої" та "повільної" квазіпоперечних хвиль) було проведено обчислення регулярної складової $\langle C_{mn} \rangle$ ефективного тензора їх пружних постійних [1, 2].

Аналіз матриці ефективних пружних постійних показав, що пружна симетрія текстур порід – не вище ромбічної, а, в переважній більшості, триклінна, пружних текстур вищих порядків виявлено не було.

Для вичерпного дослідження закономірностей розповсюдження пружних хвиль в метаморфічних сланцях КНГС був проведений аналіз параметрів пружної анізотропії зразків [1, 2].

Азимутальну залежність параметрів анізотропії для зразків досліджених метаморфічних порід було досліджено у вигляді стереоекспозицій ізоліній їхніх значень (рис. 2).

Встановлено, що текстури цих зразків за співвідношенням власних значень акустичного тензора можна віднести до ромбічної системи.

При дослідженні вказаних поверхонь параметрів анізотропії встановлено:

- для швидкостей розповсюдження повздовжніх хвиль характерна їх зміна від 4,1 до 7,2 км/с залежно від хімічного і мінералогічного складу зразків сланців;

- для різниці фазових швидкостей поперечних хвиль характерна наявність декількох екстремумів, які відповідають напрямкам, в яких наявні ефекти акустичного двопронезаломлення та поляризації (максимуми ΔV_s) та наявність двох акустичних осей, в оточенні яких спостерігаються сингулярності в поведінці векторів пружних зміщень поперечних мод (близькі до нуля значення ΔV_s);

- для коефіцієнтів диференціальної анізотропії визначено напрямки з максимальними (до 30 %) та мінімальними (близько 0 %) значеннями, в яких анізотропія сягає відповідно найбільших значень та відсутня;

- для кута відхилення вектора пружних зміщень квазіповздовжньої хвилі від напрямку хвильової нормалі характерні напрямки екстремумів співпадають з напрямками екстремальних значень інших параметрів пружної анізотропії і відображають ізотропні і максимально анізотропні осі або лінії симетрії середовища.

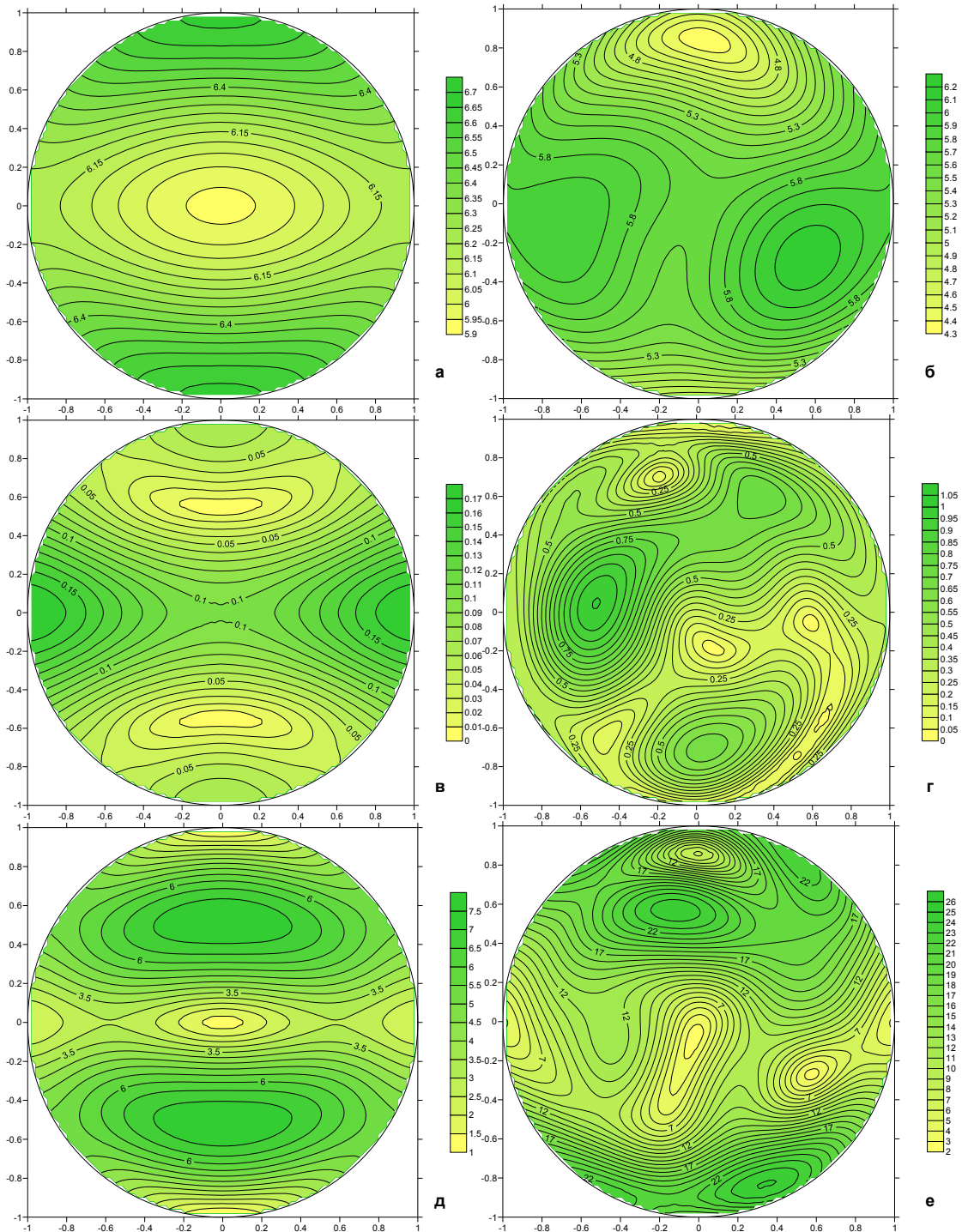


Рис. 2 Стереопроєкції вказаних поверхонь параметрів анізотропії для зразків сланцю біотит-амфіболового № 10013 (а, в, д) та сланцю кварц-біотитового № 10045: а, б – азимутальної залежності фазової швидкості V_P , в, г – різниці квазіпоперечних швидкостей ΔV_S , д, е – диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d

Висновки Отриманні експериментальні дані про пружну анізотропію зразків метаморфічних сланців Криворізької надглибокої свердловини дозволяють зробити певні висновки відносно пружної симетрії порід, які відібрані зі значних глибин. Текстури досліджених порід відносяться до класу планальних і аксиальних текстур моноклінальної, тетрагональної та ромбічної симетрій. В досліджених зразках метаморфічних сланців різних типів, які неодноразово зазнавали впливу тектонічних деформацій, пружна анізотропія викликана впорядкованіс-

тю мікротріщин і мінералів по формі та кристалографічною орієнтацією мінералів. Впорядкованість мікротріщин, яка викликана залишковими напругами, змінюється в межах зразків та відображає зміну локальних полів мікронапруг, які обумовлені будовою петроструктури.

1. Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск, 2000. 2. Продайвода Г.Т. Акустичний текстурний аналіз метаморфічних порід Криворіжжя: Монографія / Г.Т. Продайвода, С.А. Вижва, Д.А. Безродний, І.М. Безродна. – К., 2011.