

УДК 551.25:550.83(075.8)

Д. Безродний, канд. геол. наук, доц.  
E-mail: manific2@ukr.net,Л. Ткачов, асп.  
E-mail: lonia\_tkachov@bigmir.net,І. Безродна, канд. геол. наук  
E-mail: bezin3@ukr.netКиївський національний університет імені Тараса Шевченка,  
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

## ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПРУЖНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ПЛАГІОМІГМАТИТІВ КРИВОРІЗЬКОЇ НАДГЛИБОКОЇ СВЕРДЛОВИНИ ЗА ДАНИМИ ПЕТРОАКУСТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

*(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Г. Т. Продайводою)**На основі власних петроакустичних досліджень вивчено вплив процесу зміни тектонічних режимів на акустичні властивості зразків ядра плагіомігматитів Криворізької надглибокої свердловини.**Поставлені завдання вирішувалися за допомогою сейсмоакустичного інваріантно-поляризаційного методу, який дає можливість отримувати швидкості поздовжніх і поперечних хвиль у дев'яти напрямках. Авторами з високою точністю визначено швидкості пружних хвиль зразків ядра плагіомігматитів Криворізької надглибокої свердловини (інтервал 3261–5296 м).**На основі інтерпретації петрофізичних досліджень отримано повний набір матриць ефективних акустичних і пружних постійних, а також детально досліджено характер акустичної і пружної анізотропії, визначено параметри анізотропії та типи текстур гірських порід.**Установлено, що більшості зразків притаманний аксіально-ромбічний тип симетрії текстури. Інтегральний коефіцієнт анізотропії загалом зменшується з глибиною від 2,6 до 15 %, виняток становить катаклазований плагіомігматит. Аналіз параметрів анізотропії показав, що в інтервалі глибин 3700–4620 м спостерігаються найбільші значення інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії, а параметр лінійності значно перевищує сланцюватість.**З урівноважених значень швидкостей були отримані стереопроєкції вказівних поверхонь швидкості розповсюдження поздовжньої хвилі, різниці між "швидкою" та "повільною" швидкостями поперечних хвиль і диференціального коефіцієнта пружної анізотропії.**Швидкості поздовжніх хвиль на стереопроєкціях характеризуються меншою анізотропністю, ніж інші представлені параметри. Різниця між "швидкою" та "повільною" швидкостями поперечних хвиль для деяких зразків (№ 16240 і 17725) майже 1 км/с, що вказує на наявність інтенсивних процесів розщеплення пружних хвиль у плагіомігматитах. Складний і строкатий характер пружної анізотропії спостерігається на стереопроєкціях диференціального коефіцієнта анізотропії, величина якого змінюється від 14 до 48 %. Кількість екстремумів на стереопроєкціях параметрів анізотропії свідчить про значну неоднорідність текстури плагіомігматитів і змінюється таким чином:  $V_p - 3-6$ , для різниці швидкостей поперечних хвиль різної поляризації –  $6\pm 14$ ,  $A_d - 8\pm 11$ , що показує інформативність отриманих параметрів для вивчення анізотропності середовища. Для зразків № 17010 і 19148 існують мінімум два екстремуми, де характер розповсюдження пружних хвиль характеризує середовище як ізотропне, вони розташовані під кутом  $60^\circ$  до осі свердловини.**Результати досліджень свідчать про те, що породи розглянутого інтервалу свердловини перебували в умовах значного бокового стиснення. Тип симетрії акустичного тензора слабо впливає на зменшення коефіцієнта анізотропії, що пояснюється збільшенням тиску і відповідно густини з глибиною, що безпосередньо впливає на характер анізотропії порід у пластах.**Перспективи досліджень – у більш глибокому вивченні регіону зі складною геологічною будовою, який розкрила Криворізька надглибока свердловина, на основі комплексного петрографо-петрофізичного аналізу з урахуванням всебічної анізотропії.**Ключові слова: ефективні акустичні та пружні постійні, анізотропія, текстура, деформація.*

**Вступ.** Вивчення акустичної анізотропії земних надр – одне з актуальних питань сучасної геологічної науки, що дозволяє розв'язувати різноманітні проблеми фізики Землі, регіональної геології та геофізики, зокрема структурної геології та тектонофізики. При цьому значну роль відіграє акустика текстур гірських порід – сучасна галузь знань тензорної петрофізики і сейсмоакустики, яка досліджує вплив на ефективні акустичні та пружні сталі впорядкованості структурних елементів текстур гірських порід з метою визначення функцій розподілу орієнтації мікротріщин і мінералів, а також вивчення природи геодинамічних процесів і палеорекострукції деформаційної історії формування структур земної кори.

**Мета роботи:** дослідити характер пружної анізотропії плагіомігматитів Криворізької надглибокої свердловини за даними власних петроакустичних досліджень інваріантно-поляризаційним методом.

**Стан проблеми.** Дослідження анізотропії пружних хвиль гірських порід – джерело цінної інформації про геодинамічні умови їхнього формування і важлива для з'ясування сейсмічної анізотропії земних надр. Наявність анізотропії сейсмічних хвиль свідчить про наявність у геологічному середовищі впорядкованостей різноманітної фізичної природи. Типи впорядкованості визначаються механізмом деформації геологічного середовища.

Факт існування акустичної анізотропії свідчить про наявність у реальному геологічному середовищі впорядкованості різної геологічної та фізичної природи [1–4,

6–9]. Достатньо очевидно, що всі без винятку параметри азимутальної акустичної анізотропії контролюються типом симетрії впорядкованості структурних елементів геологічного середовища. Це органічно впливає із принципу Неймана – Кюрі [6], згідно з яким симетрія структури впорядкованого геологічного середовища визначає і характер симетрії тензора пружних сталей. У свою чергу, пружна симетрія накладає жорсткі обмеження на всі параметри азимутальної анізотропії сейсмічних хвиль упорядкованого геологічного середовища.

Теорія пружної анізотропії наведена в наукових працях А. Лява, В. Фойгта, Ф. І. Федорова, Г. І. Петрашеня, К. С. Александрова, Г. Т. Продайводи та ін. [1–4, 6–9]. Для експериментального дослідження анізотропії пружних сталей гірських порід застосовують такі методи:

- метод ортогональних напрямків;
- метод сфери;
- акустополіризаційний метод;
- метод особливих напрямків;
- інваріантно-поляризаційний метод.

Існуючі експериментальні ультразвукові методи вивчення пружної анізотропії гірських порід дають можливість виявити й оцінити пружну анізотропію, а залежно від обраного методу ще й визначати детальний просторовий розподіл швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль, число і просторову орієнтацію елементів пружної симетрії пружних середовищ. До основних недоліків зазначених вище методів слід віднести немо-

жливність кількісної оцінки регулярної й флуктуаційної складових ефективної фазової швидкості пружної хвилі, що забезпечує розрізнення ефектів анізотропії неоднорідностей та можливість визначення акустичної й пружної симетрії текстури гірських порід за відсутності апріорної інформації й довільної орієнтації лабораторної системи координат.

У реальних текстах гірських порід порушуються головні принципи симетричного аналізу: ізорозмірність структурних елементів, а їхня періодичність носить статистичний характер. Якщо зняти обмеження, які накладаються на ідентичність структурних елементів текстури, і замінити її квазіідентичністю й умовою тривимірної регулярності, то тоді можна скористатися принципами узагальненої статистичної симетрії, сформульовані Дж. Берналом [5].

Згідно з цими принципами впорядкований стан будь-якої геосистеми можна описати, спираючись на такі вихідні положення статистичної симетрії:

а) розмірність упорядкованості, яка вимірюється просторовою розмірністю повторюваності структурних елементів;

б) ступінь регулярності текстури;

в) ступінь квазіідентичності структурних елементів.

Фундаментальні основи застосування принципів симетрії до вивчення текстурованого середовища закладено в роботах О. В. Шубникова та І. І. Шафрановського [10]. Під текстурою розуміють деяке однорідне тіло (відносно певних властивостей) неґратчастої структури, яке складається з множини структурних елементів, що певним чином, згідно із законами симетрії, орієнтовані у просторі. Якщо структурні елементи розмножувати за допомогою операції довільних за величиною напрямків переносів, включаючи й нескінченно малі таким чином, щоб вони були розподілені у просторі з більш-менш однаковою щільністю, то можна одержати нескінченну кількість текстур і відповідних їм просторових точкових груп симетрії. Текстури гірських порід можна віднести до п'яти класів точкових груп кристалографічної та статистичної симетрії: сферичної, поперечно-ізотропної, ромбічної, моноклінної та триклінної.

Просторові точкові групи симетрії текстур, які включають у себе нескінченно малі переноси, мають осі симетрії нескінченного порядку і називаються граничними або неперервними точковими групами симетрії. Такі текстури не мають періодичної будови ані з одного із трьох вимірів простору.

На доцільність застосування просторових груп О. В. Шубникова і принципу П. Кюрі вперше звернув увагу І. І. Шафрановський [10]. Принципи симетрії використовувалися М. Патерсоном і Л. Вейсом для інтерпретації структурних діаграм деформованих гірських порід. Основні принципи класичної кристалографічної симетрії для аналізу текстур гірських порід можна застосовувати з певними обмеженнями. Унаслідок багатьох причин, які обумовлені умовами формування і гетерогенністю мінерального складу гірських порід і впливу постгенетичних перетворень, формування в них досконалої тривимірної регулярної структури практично неможливе.

Для вивчення пружної анізотропії текстур гірських порід і розв'язання пов'язаних з нею різних геологічних задач доцільно використовувати акустичний інваріантно-поляризаційний метод. Запропонований Г. Т. Продайворою [6–8], цей метод використовується для визначення пружних сталей і симетрії текстур гірських порід шляхом вимірювання фазових швидкостей різної поляризації в дев'яти напрямках кубомбодокаедра (куб зі скошеними під кутом 45° ребрами). Напрямки вимірювання фазових швидкостей пружних хвиль [6–8] унаслідок відсутності апріорної інформації

про симетрії текстури гірської породи не узгоджені з просторовим положенням елементів симетрії.

Макроскопічний об'єм зразка гірської породи має бути набагато більшим, ніж характерний розмір структурних неоднорідностей її текстури, а прозвучування зразка здійснюється ультразвуковими пружними хвилями, довжина яких також має бути більшою, ніж характерний розмір неоднорідностей гірської породи. При виконанні цих умов макроскопічний об'єм текстури гірської породи можна розглядати як деяке квазіоднорідне анізотропне геологічне середовище, що задовольняє умови довгохвильового наближення:  $V \gg L^3$ , де  $L$  – характерний розмір структурних неоднорідностей гірської породи, і  $\lambda \gg L_n$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі.

Для вимірювання фазових швидкостей гірських порід застосовується імпульсно-фазовий ультразвуковий метод.

**Методика.** Для реалізації високої точності вимірювань, що забезпечується імпульсним методом, особлива увага приділялася врахуванню похибок, обумовлених вибором параметрів імпульсів. У першу чергу враховувався той факт, що в гірських породах ультразвукові хвилі розсіюються і поглинаються, і кожне з цих фізичних явищ залежить від частоти. При поширенні акустичного імпульсу гауссової форми в середовищі із загасанням його ефективна частота заповнення, що відповідає максимуму спектра, не залишається постійною і зміщується в бік низьких частот.

У діапазоні ультразвукових частот від 0,5 до 5 МГц для більшості гірських порід характерна квадратична залежність загасання від частоти. Поширюючись у гірських породах, такий імпульс отримує спотворення, які будуть тим більші, чим більша ширина його спектра. У випадку прямокутного акустичного імпульсу, ширина його спектра обернено пропорційна тривалості.

Для досягнення високої точності при вимірюванні фазових швидкостей ультразвукових хвиль у зразках гірських порід необхідно враховувати умови, що виключають одна одну. З одного боку, для досягнення високої точності вимірювання часу поширення хвилі у зразку доцільно було б проводити вимірювання його на максимально можливій частоті, але з іншого, – високочастотні коливання швидше загасають, що викликає спотворення частотного спектра та форми імпульсу, і також проявляється частотна дисперсія швидкості.

При дослідженнях у зразках, що сильно поглинають, акустичний зондуєчий імпульс повинен мати добре виражений максимум спектральної щільності на несучій частоті й задовольняти умову монохроматичності стаціонарного спектра. Його тривалість має бути такою, щоб забезпечити стаціонарний режим коливань в акустичному імпульсі, який поширюється у зразку гірської породи. Синфазне зіставлення сигналів здійснюється в стаціонарній області імпульсного сигналу.

У ході досліджень було використано установку "Керн-4" (рис. 1), розроблену в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, яка оснащена пакетом програмного забезпечення для стабільної роботи в середовищі Windows. Прилад підключається до комп'ютера через USB-інтерфейс. "Керн-4" обладнаний двома портами виходу сигналу (для підключення випромінювача) і одним портом входу (для підключення приймача). Управління приладом повністю автоматизоване і здійснюється через програмний інтерфейс на підключеному до нього комп'ютері. Програма дає можливість вибирати частоту сигналу, що генерується вбудованим цифровим генератором імпульсів, його амплітуду і підсилення на вході. Також у ній можна задавати кількість генерованих імпульсів – від одного до декіль-

кох ("пачками"). Перед запуском установки в програмі в полі "Частота, кГц" обов'язково вводиться частота, на яку конструктивно розрахований випромінювач (резонансна частота).

Під час досліджень використовувалися п'єзокерамічні випромінювачі й приймачі (як на поздовжні, так і на поперечні хвилі) частотою 1000 кГц (для визначення  $V_s$ ) і 1110 кГц (для визначення  $V_p$ ) відповідно. У затиски між випромінювачем і приймачем акустичного сигналу ставиться зразок досліджуваної гірської породи (рис. 1), який досліджується в дев'яти напрямках для кожного типу хвилі (поздовжньої, поперечної "швидкої" і поперечної "повільної"). Для вимірювання "швидкої" й "повільної" хвиль поперечної поляризації та визначення напрямків їхньої поляризації [3] спочатку використовувалися імпульси малої тривалості. Це допомогло уникнути інтенсивної інтерференції між цими хвилями при збудженні п'єзоперетворювача тривалими імпульсами. Для окремої реєстрації "швидкої" й "повільної" поперечних мод утримувач зразка оснащений теодолітним пристроєм. Він забезпечує співвісне обертання і надійну реєстрацію кутів повороту зразка відносно фіксованих, взаємно-ортогональних, площин поляризації випромінювача і приймача.



Рис. 1. Комплекс акустичних досліджень "KERN-4"

Для побудови стереопроєкцій, а також для визначення коефіцієнтів сланцюватості, лінійності й типу симетрії текстури зразків гірських порід використовувала-

ся програма "KERN\_DP" (автор – Ю. А. Онанко) (рис. 2), яка дає можливість як у ручному, так і в автоматичному режимі проводити обробку даних. У програмі присутній також зв'язок з базою даних зразків, виміряних раніше.

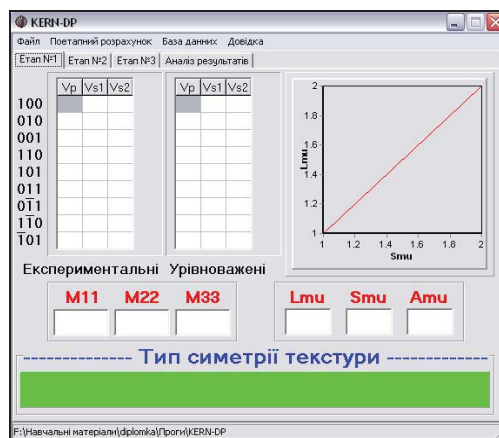


Рис. 2. Фрагмент програми "KERN\_DP"

Обробка даних ґрунтується на розв'язанні оберненої задачі шляхом інверсії азимутальної залежності регулярних складових акустичного і пружного тензорів [6].

Обробка даних проходить у три етапи:

1) Визначення інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії, сланцюватості та лінійності, а також типу симетрії текстури;

2) Розрахунок пружних постійних, акустичного тензора та визначення акустичної текстури зразка;

3) Побудова стереопроєкцій параметрів азимутальної анізотропії.

**Результати.** Використовуючи інваріантно-поляризаційний метод на новітній швидкодіючій апаратурі, було проведено численні виміри фазових поздовжніх і квазіпоперечних швидкостей, на основі яких за допомогою спеціального програмного забезпечення визначено параметри анізотропії порід колекції зразків плагіомігматитів ядра КНГС-8 з інтервалу 3261–5296 м.

У табл. 1 та рис. 3 наведено результати інтерпретації петроакустичних даних вивченої колекції зразків з ядра КНГС-8.

Таблиця 1

Власні значення та їхні довірчі межі при 5 % рівні значущості (в  $10^6 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ ) – у чисельнику та їхні власні напрямки – у знаменнику детермінованої складової акустичного тензора зразка гірської породи

Номери зразків	Глибина відбору зразків	Літологія	$\langle \mu_{11} \rangle \pm \Delta$			$L_\mu$	$S_\mu$	Інтегральний коефіцієнт анізотропії $A_{\mu\mu}, \%$	Симетрія акустичного тензора
			$l^{(1)}, m^{(1)}, n^{(1)}$	$l^{(2)}, m^{(2)}, n^{(2)}$	$l^{(3)}, m^{(3)}, n^{(3)}$				
13313	3261	Плагіомігматит катаклазований	55,63±0,08 0,713; -0,006; 0,70	51,73±0,07 0,13; 0,984; -0,122	49,05±0,08 -0,689; 0,176; 0,703	1,08	1,05	5,2	Аксіальна mmm
16240	3702	Плагіомігматит	34,856±0,3625 -0,21; -0,21; -0,95	27,873±0,3927 -0,63; 0,77; -0,03	23,844±0,3995 0,74; 0,598; -0,29	1,251	1,169	15,57	Аксіальна mmm
17010	3995	Плагіомігматит	63,050±0,0431 -0,21; 0,08; 0,98	62,770±0,0482 -0,68; 0,71; -0,20	51,682±0,0479 -0,71; -0,7; -0,096	1,004	1,215	8,91	Планальна mmm
17725	4243	Плагіомігматит	41,159±0,1068 -0,12; 0,93; -0,35	33,709±0,1061 0,05; -0,35; -0,94	29,908±0,1007 -0,99; -0,127; 0,003	1,221	1,127	13,26	Аксіальна mmm
19148	4617	Плагіомігматит	39,032±0,0545 0,9; -0,33; -0,283	34,637±0,0585 0,43; 0,6; 0,674	32,256±0,0569 -0,056; -0,729; 0,68	1,127	1,074	7,92	Аксіальна mmm
20540	5232	Плагіомігматит	59,83±0,18 0,9; -0,44; 0,57	58,86±0,20 0,4; 0,74; -0,54	62,50±0,19 -0,19; -0,507; 0,84	1,04	1,02	2,6	Аксіальна mmm
20604	5296	Плагіомігматит	59,963±0,0670 0,49; -0,43; 0,76	57,403±0,0641 0,04; -0,86; -0,52	54,550±0,0641 0,871; 0,285; -0,401	1,045	1,052	3,86	Планальна mmm

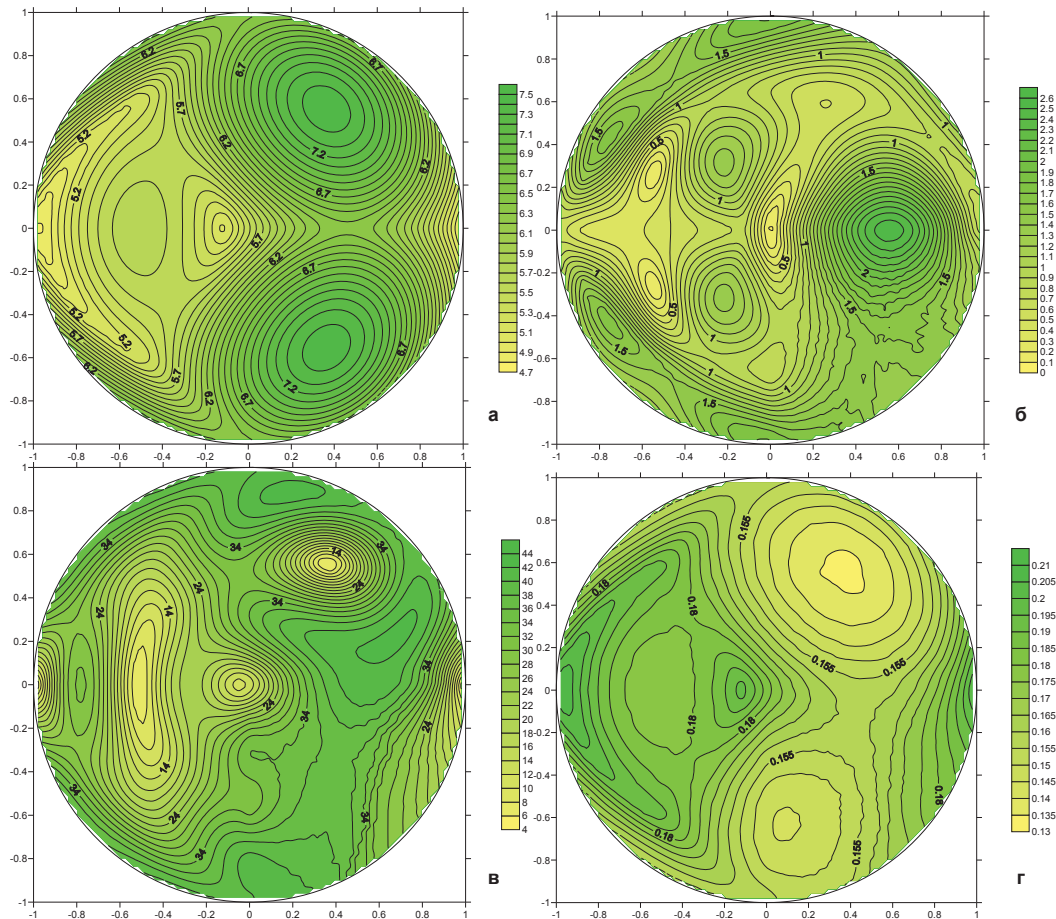


Рис. 3. Указівні поверхні індикатрис різниці між "швидкою" і "повільною" поперечними хвилями: а) 16240, б) 19148, в) 17725, г) 20604

Аналіз швидкостей розповсюдження пружних хвиль у плагіомігматитах підтвердив існування інтенсивної азимутальної анізотропії фазових швидкостей пружних хвиль різної поляризації. Найбільші значення з поздовжніх швидкостей показав зразок амфіболіту (№ 16589). Проте просте зіставлення величин швидкостей не дало об'єктивної кількісної оцінки анізотропії текстури плагіомігматитів, що спершу обмежило можливість надання відповіді про її характер і природу.

Реальна оцінка анізотропії була здійснена при визначенні повного набору матриць акустичних і пружних сталей. При цьому застосування операції врівноваження до експериментальних значень фазових швидкостей пружних хвиль дозволило істотно усунути вплив флуктуаційної складової.

Класифікацію текстур плагіомігматитів (табл. 1) на вищу, середню й нижню категорії здійснено за симетрією акустичного тензора з урахуванням довірчих меж знайдених власних значень. Установлено, що для всіх зразків виконується умова  $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{22} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle$ , тобто їм притаманна ромбічна симетрія (mmm).

Більшість із плагіомігматитів має аксіально-ромбічний тип симетрії текстури (табл. 1), хоч один зразок (№ 17010) з лінійною слабосмугастою текстурою можна умовно віднести до поперечно-ізотропної симетрії. Інтегральний коефіцієнт анізотропії ( $A_{\mu}$ ) загалом зменшується з глибиною від 2,6 до 15 %, виняток становить катаклований плагіомігматит (зразок № 13313), коефіцієнт анізотропії якого 5,2 %. Аналіз параметрів акустичного еліпсоїда показав, що в інтервалі глибин 3700–4620 м спостерігаються найбільші значення інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії й параметр  $L_{\mu}$  значно перевищує  $S_{\mu}$  (за винятком зразка № 17010). Це свідчить

про те, що породи розглянутого інтервалу свердловини перебували в умовах значного бокового стиснення. Низькі значення  $A_{\mu}$ ,  $L_{\mu}$  та  $S_{\mu}$  у призабійній частині свердловини пояснюються зоною інтенсивної тріщинуватості. Слід зазначити, що тип симетрії акустичного тензора не дуже впливає на процес "зменшення" коефіцієнта. Це пояснюється збільшенням тиску і відповідно густини з глибиною, що безпосередньо впливає на характер анізотропії порід у пластах.

Для всебічного аналізу пружної анізотропії плагіомігматитів з урівноважених значень швидкостей було отримано за методикою інваріантно-поляризаційного методу повні набори матриць пружних сталей, що, у свою чергу, дало можливість побудувати стереопроєкції вказівних поверхонь швидкості розповсюдження поздовжньої хвилі, різниці між "швидкою" та "повільною" поперечними хвилями, диференціального коефіцієнта пружної анізотропії та кута відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі (рис. 3).

Швидкості поздовжніх хвиль на стереопроєкціях характеризуються меншою анізотропністю, ніж інші представлені параметри. Найбільш істотні коливання швидкості спостерігаються для зразка № 17725 (від 3,85 до 5,35 км/с), а найменші коливання характерні для зразка № 19148 (від 4,3 до 4,95 км/с). Кількість екстремумів збільшується від трьох (для зразків № 16240 і 20604) до шести для зразка № 17725. Ці напрямки збігаються з напрямками розповсюдження хвиль поздовжньої поляризації.

Розподіл різниці між "швидкою" та "повільною" поперечними хвилями наведено на рис. 3, а–г. Як видно з рисунків, кількість екстремумів змінюється від 6 для зразка № 20604 до 14 для зразка № 19148, що свідчить про значну неоднорідність текстури плагіомігматитів. Сама різни-

ця для деяких зразків (№ 16240 і 17725) сягає майже 1 км/с, що вказує на наявність інтенсивних процесів розщеплення пружних хвиль, а отже, і незначну анізотропність плагіомігматитів. Причому навіть для найменш анізотропного зразка № 20540 цей параметр досягає 0,4 км/с.

Складний і строкатий характер пружної анізотропії спостерігається на стереопроєкціях і диференціального коефіцієнта анізотропії ( $A_d$ ). Величина цього параметра змінюється від 14 % для зразка № 19148 до майже 48 % для зразка № 16240. Кількість екстремумів змінюється від 8 (для зразка № 17010) до 11 (для зразка № 19148), що добре корелює для цих зразків з відповідними значеннями інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії. Для зразків № 17010 і 19148 існують мінімум два екстремуми, де значення  $A_d$  мало відрізняється від нуля, вони розташовані під кутом  $60^\circ$  до осі  $X_3$ . У цих напрямках характер розповсюдження пружних хвиль характеризує це середовище як ізотропне.

Пружна текстура всіх досліджених плагіомігматитів – триклінна. Текстури вищих порядків не виявлено.

Висновки. Унікальність даної методики вимірювання дозволяє зі значною точністю вимірювати швидкості проходження через зразок як поздовжніх, так і поперечних хвиль з різною частотою, яка задається програмно. Інваріантно-поляризаційний метод, переведений в автоматичний режим обробки даних результатів вимірювань швидкостей акустичних хвиль, показує надійні результати обробки, інтерпретації та моделювання. Використання сучасного обладнання та швидкодіючого програмного забезпечення дає змогу обчислювати результати дослідження колекції зразків, створювати бази даних зі збереженими вимірними даними параметрів анізотропії та типів текстур.

За результатами дослідження колекції зразків ядра з інтервалу 3261–5296 м свердловини КНГС-8 переважна частина порід має аксіальний тип симетрії текстури. Також на відміну від порід з планальним типом симетрії текстури породи з аксіальним мають більший інтегральний коефіцієнт анізотропії  $A_d$ . Це може пояснюватись іншою величиною та орієнтацією зерен у породі, на що вплинули процеси стискання породи в певному напрямку, коли вона була ще у вигляді залеглого під певним кутом пласта.

Швидкості поздовжніх хвиль на стереопроєкціях характеризуються меншою анізотропністю, ніж інші представлені параметри. Різниця між "швидкою" та "повільною" поперечними хвилями для деяких зразків (№ 16240 і 17725) сягає майже 1 км/с, що вказує на наявність інтенсивних процесів розщеплення пружних хвиль у плагіомігматитах. Складний і строкатий характер пружної анізотропії спостерігається на стереопроєкціях диференціального коефіцієнта анізотропії, величина якого змінюється від 14 до 48 %. Кількість екстремумів на стереопроєкціях параметрів анізотропії свідчить про значну неоднорідність текстури плагіомігматитів і змінюється таким чином:  $V_p - 3 \div 6$ , для різниці швидкостей поперечних хвиль різної поляризації –  $6 \div 14$ ,  $A_d - 8 \div 11$ , що показує інформативність отриманих параметрів для вивчення анізотропності середовища. Для зразків № 17010 та 19148 існують мінімум два екстремуми, де характер розповсюдження пружних хвиль

характеризує середовище як ізотропне, вони розташовані під кутом  $60^\circ$  до осі свердловини.

Проведені дослідження показали ступінь анізотропності вивченої колекції плагіогранітів Криворіжжя та її зв'язок з тектонічними перетвореннями в регіоні. Перспективи досліджень авторами передбачаються в більш глибокому вивченні регіону зі складною геологічною будовою, який розкрила Криворізька надглибока свердловина, на основі комплексного петрографо-петрофізичного аналізу з урахуванням всебічної анізотропії.

#### Список використаних джерел

1. Thomsen L. Weak elastic anisotropy / L. Thomsen // *Geophysics*. – 1986. – 51, 10. – 1954–1966.
2. Анізотропія упругих свойств горных пород / К. С. Александров, Т. В. Рыжова, Б. П. Беликов, Л. А. Шабанова // *Изв. АН СССР*. – 1968. – № 6. – С. 17–28.
3. Александров К.С., Рыжова Т.В., Беликов В.П., Шабанова Л.А., (1968). Анізотропія упругих свойств горных пород. *Izv. AN SSSR*, 6, 17-28. (In Russian)
3. Безродний Д. А. Математичне моделювання впливу кристалографічної орієнтації мінералів та мікротріщин на параметри пружної і акустичної анізотропії / Д. А. Безродний, І. М. Безродна // *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія*. – 2008. – № 45. – С. 49–52.
3. Bezrodnyj D.A., Bezrodna I.M., (2008). *Matematichne modelyuvannya vplyvu kristalografichnoy orientaciyi mineraliv ta mikrotrishhin na parametri pruzhnoy i akustichnoy anizotropiyi*. *Visnyk Kyivsk. un-tu: Geologiya*, 45, 49-52 (In Ukrainian).
4. Безродний Д. А., Математичне моделювання тектонофацій мезозони на основі акустичного аналізу метаморфічних порід Кривбасу / Д. А. Безродний // *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія*. – 2008. – № 44. – С. 13–16.
4. Bezrodnyj D.A., (2008). *Matematichne modelyuvannya tektonofacij mezozoni na osnovi akustichnogo analizu metamorfichnih porid krivbasu*. *Visnyk Kyivsk. un-tu: Geologiya*, 44, 13–16. (In Ukrainian)
5. Бернал Дж. Д. Поля обхвата обобщенной кристаллографии / Дж. Д. Бернал, С.Х. Каролайл // *Кристаллография*. – 1968. – № 13. – С. 927–951.
5. Bernal Dzh. D., Karolajl S.X., (1968). *Polya obxvata obobshhennoj kristallografiy. Kristallografiya*, 13, 927–951. (In Russian)
6. Акустичний текстурний аналіз метаморфічних порід Криворіжжя : монографія / Г. Т. Продайвода, С. А. Вижва, Д. А. Безродний, І. М. Безродна. – К., 2011. – 368 с.
6. Prodajvoda G.T., Vizhva S.A., Bezrodnyj D.A., Bezrodna I.M., (2011). *Akustichnij teksturnij analiz metamorfichnih porid krivorizhzhya: monogr.*, Kyiv, 368. (In Ukrainian)
7. Пружна симетрія і параметри анізотропії метаморфічних порід Криворізької надглибокої свердловини / Г. Т. Продайвода, Д. А. Безродний, І. М. Безродна, О. М. Кожан // *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія*. – 2001. – № 24. – С. 91–95.
7. Prodajvoda G.T., Bezrodnyj D.A., Bezrodna I.M., Kozhan O.M., (2001) *Pruzha simetriya i parametri anizotropiyi metamorfichnih porid Krivorizkoj nadglubokoy sverdlovini*. *Visnyk Kyivsk. un-tu: Geologiya*, 24, 91-95 (In Ukrainian).
8. Продайвода Г. Т. Математичне моделювання анізотропії ефективних акустичних і пружних постійних тектонічно-деформованих метаморфічних гірських порід / Г. Т. Продайвода, Д. А. Безродний, Т. Г. Продайвода // *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія*. – 2003. – № 26. – С. 20–24.
8. Prodajvoda G.T., Bezrodnyj D.A., Prodajvoda T.G., (2003). *Matematichne modelyuvannya anizotropiyi efektyvnikh akustichnikh i pruzhnikh postojnikh tektonichno-deformovanih metamorfichnikh girs'kikh porid*. *Visn. Kyiv. un-tu: Geologiya*, 26, 20–24. (In Ukrainian)
9. Федоров Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах / Ф. И. Федоров. – М. : Наука, 1965. – С. 384.
9. Fedorov F.I., (1965). *Teoriya uprugikh voln v kristalakh*. *Nauka*, 384. (In Russian)
10. Шафрановский И. И. Группы симметрии в структурной петрологии / И. И. Шафрановский // *Зап. Всесоюз. минерал. об-ва*. – 1956. – № 85. – С. 491–497.
10. Shafranovskij I.I., (1956). *Gruppy simmetrii v strukturnoj petrologii*. *Zap. Vsesoyuz. mineralog. ob-va.*, 85, 4, 491–497 (In Russian).

Надійшла до редколегії 27.09.14

D. Bezrodny, Cand. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.  
 E-mail: manific2@ukr.net,  
 L. Tkachov, Postgraduate Student  
 E-mail: lioia\_tkachov@bigmir.net,  
 I. Bezrodna, Cand. Sci. (Geol.)  
 E-mail: bezin3@ukr.net,  
 Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

### ELASTIC ANISOTROPY OF PLAGIO-MIGMATITE CORE SAMPLES FROM KRYVORIZ'KA ULTRADEEP WELL: A PETROACOUSTIC INVESTIGATION

*This paper investigates the influence of changes in the tectonic regime on the acoustic properties of plagio-migmatite samples from the Kryvoriz'ka ultra-deep well based on petroacoustic analysis.*

*The seismic-polarization method was used in the research to obtain velocities of longitudinal and transverse waves in nine directions. The velocity of plagio-migmatite core samples from Kryvoriz'ka ultra-deep well an interval of 3,261–5,296 m have been defined with high accuracy.*

*Based on petrophysical data, the authors obtained a full set of effective acoustic and elastic constants matrices and determined the parameters of anisotropy and rock texture types.*

*It has been found that most of the samples exhibit an axial-rhombic type of texture symmetry. The integral anisotropy coefficient generally decreases with depth from 2,6 to 15 %, with the exception of cataclased plagio-migmatite. Analysis of anisotropy parameters showed that the depth interval 3,700–4,620 m is associated with the highest values of the integral coefficient of acoustic anisotropy, with the linear parameter significantly exceeding schistosity. From balanced velocity values there were obtained stereo-projections of directing surfaces of longitudinal wave propagation velocity, differences between "fast" and "slow" velocities of transverse waves and the differential coefficient of elastic anisotropy.*

*Velocities of longitudinal waves at stereo-projections show less anisotropy than the other parameters. The difference between "fast" and "slow" transverse wave velocities for some samples (#16240 and #17725) is nearly 1 km/s, which suggests intensive elastic wave splitting in plagio-migmatites. The complexity and heterogeneity of elastic anisotropy is observed on stereo-projections of the differential anisotropy coefficient whose value ranges from 14 to 48 %. The number of extreme points on the stereo-projections of anisotropy parameters indicates significant heterogeneity of plagio-migmatite texture and changes as follows:  $V_p - 3,6$ , for the difference of transverse waves with different polarization – 6,14,  $A_d - 8,11$ . The parameters obtained are highly informative for research on the anisotropy of the medium. For samples #17010 and #19148 there are at least two extreme points where the nature of elastic wave propagation shows the medium to be isotropic, these are located at a 60° angle to the well axis.*

*Research results show that the rocks from the well interval in question have been under high lateral compression. The type of acoustic tensor symmetry has little effect on reducing the anisotropy coefficient, which can be accounted for by an increase in pressure, and hence in density, with depth, the latter directly affecting the nature of rock anisotropy in the strata.*

*Further research into the complex geological profile revealed by the Kryvoriz'ka ultra-deep well should be based on a thorough petrographical and petrophysical analysis, with multidirectional anisotropy taken into account.*

*Keywords: effective acoustic and elastic constants, anisotropy, texture, deformation.*

Д. Безродный, канд. геол. наук, доц.  
 E-mail: manific2@ukr.net,  
 Л. Ткачов, асп.  
 E-mail: lioia\_tkachov@bigmir.net,  
 И. Безродная, канд. геол. наук  
 E-mail: bezin3@ukr.net,  
 Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,  
 УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

### ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ ПЛАГИОМИГМАТИТОВ КРИВОРОЖСКОЙ СВЕРХГЛУБИННОЙ СКВАЖИНЫ ПО ДАННЫМ ПЕТРОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*На основе собственных петроакустических исследований изучено влияние процесса изменения тектонических режимов акустических свойств образцов ядра плагиомигматитов Криворожской сверхглубокой скважины.*

*Поставленные задачи решались с помощью сейсмоакустического инвариантно-поляризационного метода, который позволяет получать скорости продольных и поперечных волн в девяти направлениях. Авторами с высокой точностью определены скорости упругих волн образцов ядра плагиомигматитов Криворожской сверхглубокой скважины (интервал 3261–5296 м).*

*На основе интерпретации петрофизических исследований получен полный набор матриц эффективных акустических и упругих постоянных, а также детально исследован характер акустической и упругой анизотропий, определены параметры анизотропии и типы текстур горных пород.*

*Установлено, что большинству образцов присущ аксиально-ромбический тип симметрии текстуры. Интегральный коэффициент анизотропии в целом уменьшается с глубиной от 2,6 до 15 %, исключение составляет катаклазированный плагиомигматит. Анализ параметров анизотропии показал, что в интервале глубин 3700–4620 м наблюдаются наибольшие значения интегрального коэффициента акустической анизотропии, а параметр линейности значительно превышает сланцеватость.*

*Из уравновешенных значений скоростей были получены стереопроекции указательных поверхностей скорости распространения продольной волны, разницы между "быстрой" и "медленной" скоростями поперечных волн и дифференциальным коэффициентом упругой анизотропии.*

*Скорости продольных волн на стереопроециях характеризуются меньшей анизотропностью, чем другие представленные параметры. Разница между "быстрой" и "медленной" скоростями поперечных волн для некоторых образцов (№ 16240 и 17725) достигает почти 1 км/с, что указывает на наличие интенсивных процессов расщепления упругих волн в плагиомигматитах. Сложный и неоднородный характер упругой анизотропии наблюдается на стереопроециях дифференциального коэффициента анизотропии, величина которого изменяется от 14 до 48 %. Количество экстремумов на стереопроециях параметров анизотропии свидетельствует о значительной неоднородности текстуры плагиомигматитов и изменяется следующим образом:  $V_p - 3,6$ , для разности скоростей поперечных волн различной поляризации – 6±14,  $A_d - 8,11$ , а также показывает информативность полученных параметров для изучения анизотропии среды. Для образцов № 17010 и 19148 существуют минимум два экстремума, где характер распространения упругих волн характеризует среду как изотропную, они расположены под углом 60° к оси скважины.*

*Результаты исследований свидетельствуют о том, что породы рассматриваемого интервала скважины находились в условиях значительного бокового сжатия. Тип симметрии акустического тензора слабо влияет на уменьшение коэффициента анизотропии, что объясняется увеличением давления и соответственно плотности с глубиной, что непосредственно влияет на характер анизотропии пород в пластах.*

*Перспективы исследований – в более глубоком изучении региона со сложным геологическим строением, вскрытого Криворожской сверхглубокой скважиной, на основе комплексного петрографо-петрофизического анализа с учетом всесторонней анизотропии.*

*Ключевые слова: эффективные акустические и упругие постоянные, анизотропия, текстура, деформация.*