

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ТЕКТОНОФАЦІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Описано новий акустичний метод текстурного аналізу полімінеральних порід на основі дослідження текстури зразків Криворіжжя.

The new acoustic method of the textural analysis of polymineral breeds on the basis of research of a structure of samples Krivorozhyya is described.

Стан проблеми. Все більший інтерес в останні роки викликають дослідження сейсмічної анізотропії земних надр. Наявність анізотропії сейсмічних хвиль свідчить про наявність у геологічних середовищах на геологічних структурних рівнях впорядкованостей різноманітної фізичної природи. Типи упорядкованості визначаються механізмом деформації геологічного середовища [1], а отже, досить вичерпну інформацію про геодинамічні процеси, що відбувалися та відбуваються у земній корі та її надрах, можна отримати за результатами досліджень азимутальної сейсмічної анізотропії різних типів хвиль.

Значну роль у сучасних геофізичних дослідженнях відіграють задачі прогнозування геологічного розрізу при пошуках корисних копалин (в першу чергу нафти і газу), глибинних дослідженнях і моніторингу екологічного стану геологічного середовища. Для їх розв'язку великого значення набуває інформація, що отримана при ультразвукових дослідженнях керну глибоких і надглибоких свердловин в комплексі з сучасними петрографічними методами досліджень.

Для дослідження дислокаційної тектоніки застосовують методи структурного і тектонофаціального аналізу [2], в основу якого покладено кількісні ознаки деформацій та текстурно-структурні і мінеральні зміни порід, які супроводжують ці деформації.

Тектонічні деформації гірських порід проявляються у орієнтації кристалографічних осей мінералів, у видовженні або сплюснуванні породоутворюючих мінералів та формуванні макро- і мікротріщин, які залежать від інтенсивності деформацій і термодинамічних умов (температури, напруженого стану).

Існує закономірна відповідність між структурою, складом і ступенем деформації. Автором розглядаються можливості застосування сейсмоакустичного інваріантно-поляризаційного методу для текстурного аналізу деформацій гірських порід.

У квазіоднорідному анізотропному середовищі спостерігаються достатньо інтенсивні ефекти акустичного двопроменевого заломлення. Через те, що особливі напрямки в квазіоднорідних середовищах визначити важко, а при вимірах необхідно використовувати імпульси великої тривалості, то задача виміру фазових ефективних квазіпоперечних хвиль вважається особливо важкою.

Методика. Розроблена методика петроакустичних досліджень дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль у гірських породах, визначати пружну симетрію та текстуру порід. Ця інформація особливо важлива при інтерпретації геофізичної інформації, отриманої при дослідженнях порід на значних глибинах та в складних геологічних умовах, зокрема, для тектонофаціальних досліджень метаморфічних порід, та розглядається на прикладі Криворізької надглибокої свердловини та свердловин її полігону.

Методика таких досліджень включає в себе три блоки: експериментальні вимірювання швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль, обробка і інтерпретація отриманих результатів та математичне моделю-

вання анізотропії ефективних акустичних і пружних властивостей метаморфічних деформованих гірських порід з урахуванням даних петрографічних і електро-нно-мікроскопічних досліджень.

Методика експериментальних вимірювань швидкостей.

З штуфа гірської породи на каменерізному верстаті виготовляється зразок. Форма зразка залежить від характеру анізотропності породи, що досліджується.

1. У випадку, коли геологічне середовище можна прийняти як ізотропне, достатньо проводити вимірювання швидкостей повздовжньої та поперечних хвиль в одному напрямку, форма зразка має бути циліндричною.

2. У випадку, коли група симетрії породи описується кубічною симетрією, проводяться вимірювання у трьох взаємноортогональних напрямках і форма зразка рекомендується у вигляді кубу або трьох циліндрів вздовж трьох взаємноортогональних напрямків.

3. У решті випадків, коли тип симетрії нижчий або невідомий, геологічне середовище можна вважати анізотропним і зразок виготовляють у вигляді куборомбо-додекаедру.

Досліджені зразки метаморфічних порід Криворізької надглибокої свердловини та її полігону були представлені саме куборомбододекаедрами. Грані зразків були пришліфовані на паралельність не гірше 0.024 мм. Якщо площина зразка орієнтована при відборі в польових умовах, то виготовлення його здійснювалося відповідно до географічної системи координат. Звичайно приймається така орієнтація робочої системи координат: X'_1 – на географічну "північ", X'_2 – на "схід". Система координат права, виходячи з чого і вибирається напрямком координатної осі X'_3 .

При відборі зразка із керну свердловини для подальшого порівняльного аналізу результатів досліджень усіх сейсмоакустичних методів (сейсморозвідки, ВСП, ГДС та петрофізики), зразок виготовлявся перпендикулярно та вздовж осі свердловини.

Ультразвукова апаратура для вимірів швидкості забезпечує формування достатнього широкого набору частот заповнення і тривалості акустичних імпульсів, що застосовуються при вимірюваннях. Діапазон частот заповнення імпульсів від 0,25 МГц до 1,6 МГц забезпечив успішне дослідження фазових швидкостей на зразках практично будь-яких генетичних типів гірських порід (рис. 1 а).

Ефективна фазова швидкість поширення пружної хвилі v^* обчислювалася за формулою:
$$v^* = \frac{l}{2(t - t_0)}$$

l – довжина зразка; t_0 – час поширення ультразвукової хвилі в затримках; t – час поширення ультразвукової хвилі при наявності між затримками зразка. Оцінка точності вимірювання фазових швидкостей імпульсно-фазовим ультразвуковим методом здійснювалася у двох напрямках:

1. кількісна оцінка систематичних похибок;
2. кількісна оцінка випадкових похибок.

Для оцінки систематичних похибок використовувалася атестований стандарт-еталон, виготовлений зі сталі. Систематична похибка обчислювалася за формулою:

$$\varepsilon_c = \pm \sqrt{\frac{\sum (v_i^{(l)} - v_i^{(c)})^2}{2n}},$$

де $v_i^{(l)}$ – фазова швидкість вимірювання стандарту в лабораторії; $v_i^{(c)}$ – номінальна фазова швидкість стандарту.

Систематична похибка оцінювалася мінімум двічі на день: перед початком та при завершенні робіт, а іноді і більше, залежно від кількості вимірюваних зразків з метою перевірки нормальної роботи сейсмоакустичної установки.

Для оцінки випадкових похибок використовуються контрольні (повторні) вимірювання фазових швидкостей на одних і тих самих зразках. Ця похибка обчислюється за формулою:

$$\varepsilon_e = \pm \sqrt{\frac{\sum (v_i^{(l)} - v_i^{(k)})^2}{2n}},$$

де $v_i^{(l)}$ – первинні вимірювання швидкості; $v_i^{(k)}$ – контрольні вимірювання швидкості.

Систематична похибка, що оцінювалася за результатами багатоденних спостережень, складала досить незначну величину як для повздовжніх, так і для поперечних хвиль. Для повздовжніх хвиль ця величина складала ± 16 м/с, а для поперечних – ± 26 м/с, що у відносному плані відповідно складає 0.26 % для повздовжніх хвиль і 0.61 % – для поперечних хвиль. Загалом систематична похибка була оцінена за 124 незалежними спостереженнями.

Оцінка випадкових похибок була здійснена незалежно по 31 зразку Криворізької надглибокої свердловини і по 1-2 зразкам кожної свердловини полігону. Загалом ця оцінка була отримана за результатами обстежень 44 зразків. Майже на всіх зразках, крім тих, яким притаманна висока тріщинуватість, була досягнута необхідна точність вимірювань. Так, для повздовжніх хвиль оцінка випадкової похибки коливається від ± 0.022 км/с для зразка амфіболіту КНГС-8 до ± 0.193 км/с для зразка сланцю зі свердловини 16883 полігону. У відносному плані це відхилення змінюється від 0.23 % до 2.41 % для повздовжніх хвиль. Майже аналогічні результати спостерігаються при оцінці випадкової похибки для поперечних хвиль. Ця похибка по виміряним зразкам розташовувалася у інтервалі від ± 0.019 км/с до ± 0.091 км/с, що у відносному плані склало область від 0.18 % до 2.32 %.

Обробка і інтерпретація результатів петроакустичних досліджень.

Розроблено алгоритм і програму інверсії азимутальної залежності квазіповздовжніх і квазіпоперечних

швидкостей розповсюдження у функцію розподілу орієнтації мінералів і мікротріщин.

На цьому етапі проводилося визначення акустичних констант [1], яке має важливе значення для розв'язання цілого ряду задач:

1. вибору стандартної акустичної системи координат,
2. визначення підсистеми симетрії,
3. обґрунтування методики урівноваження фазових швидкостей і т.п.

Для згладжування флюктуаційної складової ефективною фазовою швидкості, яка обумовлена недосконалістю текстур гірських порід, застосовується інваріантно-поляризаційний метод [1]. У його основу покладено, що згортка акустичного тензора μ_i є інваріантом. Тобто, в будь-яких трьох взаємно ортогональних напрямках хвильової нормалі сума квадратів фазових швидкостей ізонормальних хвиль є постійною величиною. Ця фундаментальна властивість будь-якого анізотропного середовища використовувалася для урівноваження ефективних фазових швидкостей у робочих системах координат куборомбододекаедру [1]. В подальшому обчислювалася величина коефіцієнту відносної середньоквадратичної акустичної анізотропії (A_μ), що визначалася як міра відхилення акустичних констант анізотропної текстури від найближчої до неї ізотропної текстури.

Співставлення власних значень з урахуванням їх довірчих меж дозволяє стверджувати, що симетрія акустичного тензора досліджених зразків метаморфічних порід є не вищою ромбічної.

Здійснено аналіз параметрів акустичного еліпсоїду: акустичної лінійності $La = \mu_0 / \mu_m$ і акустичної сланцюватості $Sa = \mu_m / \mu_p$ (тут μ_0 , μ_m , μ_p – відповідно найбільше, проміжне і найменше власні значення акустичного тензора). Графік залежності $La = f(Sa)$ (рис. 1 б) характеризує ступінь упорядкованості елементів текстури породи уздовж окремих напрямків (акустична лінійність) або розміщення на площині (акустична сланцюватість).

На наступному етапі обчислювалася усереднена (регулярна) складова $\langle C_{mn} \rangle$ ефективного тензора пружних сталей, яка дає оцінку дисперсії згладженої флюктуаційної складової.

Проведено аналіз параметрів анізотропії, їх азимутальна залежність представляється у вигляді стереопроєкцій ізоліній (рис. 1 в) значень параметрів: фазової швидкості квазіповздовжньої хвилі, різниці між "швидкою" й "повільною" квазіпоперечними хвилями, кута відхилення вектора пружних зміщень і векторів променевих швидкостей від напрямку хвильової нормалі, диференціального коефіцієнту анізотропії.

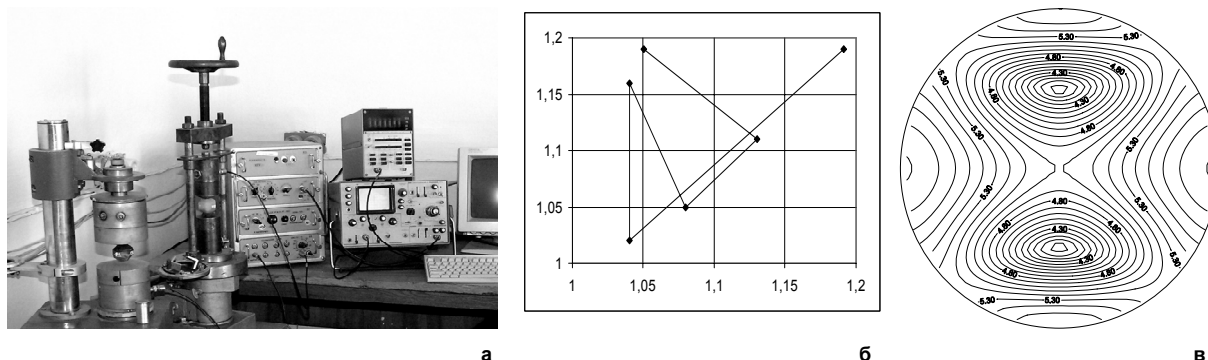


Рис. 1. Етапи тектонофоціального аналізу за акустичними даними:
 а – установка ультразвукових вимірювань зразків; б – діаграма параметрів акустичного еліпсоїду текстур метаморфічних порід керну Криворізької надглибокої свердловини;
 в – стереопроєкція вказівних поверхонь фазової швидкості квазіповздовжньої хвилі амфіболіту

За даною методикою отримано експериментальні дані про пружні сталі зразків метаморфічних порід Криворізької надглибокої свердловини, вони дозволяють зробити певні висновки відносно пружної симетрії порід, які відібрані зі значних глибин. Серед порід Криворізької надглибокої свердловини були розглянуті кристалічні сланці, залізисті кварцити, амфіболіти, плагіограніти і плагіомігматити, гнейси. Текстури досліджених порід відносяться до класу планальних і аксіальних текстур моноклінальної, тетрагональної та ромбічної симетрії.

Математичне моделювання анізотропії ефективних акустичних і пружних сталей.

Оцінка впливу тектонічних деформацій на анізотропію акустичних і пружних властивостей метаморфічних порід Кривбасу здійснювалася за результатами математичного моделювання ефективних пружних постійних гірських порід із використанням багатокомпонентної моделі, яка була максимально наближена до будови реальних текстур метаморфічних порід. Розроблено алгоритм і програму математичного моделювання, що дозволяє визначати вплив на ефективні акустичні і пружні сталі гірських порід кристалографічної орієнтації мінералів, просторової орієнтації зерен мінералів по формі та орієнтації мікротріщин. При розв'язку поставленої задачі застосовувався метод умовних моментних функцій із використанням розрахункової схеми Морі-Танака. Для чисельних розрахунків алгебраїчних компонент тензора $M_{\alpha\beta kl}$ у ромбічному наближенні застосовувалося чисельне інтегрування методом Гаусса.

Багатокомпонентна модель текстури деформованої текстури гірської породи представляла собою матричну модель (твердий скелет) із орієнтованими включеннями у вигляді сфероїдів різного формату $\alpha = \frac{c}{a}$ (тут c , a

– коротка і довга осі сфероїду). Кристалографічні осі сфероїдальних зерен породоутворюючих мінералів були орієнтовані вздовж осей сфероїду. Мікротріщини моделювалися сфероїдами формату $\alpha = 10^{-3} \div 10^{-4}$. Це забезпечує можливість моделювання практично всіх типів текстур метаморфічних порід Кривбасу.

Текстурні особливості метаморфічних порід відображають термодинамічні умови та реологічні механізми дислокаційних структур Кривбасу, які формувалися, згідно з даними тектонофаціального аналізу [2], у такій послідовності:

1. в'язкі розломи катазони–мезазони;
2. в'язкі кліважні розломи вторинної мезазони;
3. субв'язкі розломи вторинної епізони;
4. крихков'язкі розломи і прирозломні складки та флексури вторинної епізони;
5. крихкі розломи.

В'язкі розломи катазони–мезазони поділяють товщу нижньопротерозойських метакременистотеригенних порід і залізистих кварцитів та метавулканічних порід основного складу, а також пізньоархейські гранітоїди сурсько-токівського та дніпровського комплексів, на яких ця товща залягає, на систему блоків-лусок.

Серед розломів даного типу за реологічним механізмом, за допомогою яких відбувалося зміщення (зсувна течія порід), виділені: кристалізаційно-сланцюваті, кліважні та комбіновані кліважно-кристалізаційно-сланцюваті.

Кристалізаційне розсланцювання у в'язких розломах супроводжувалося орієнтуванням плоских і видовжених зерен породоутворюючих мінералів та пластичною формозміною цих зерен і агрегатів, що знайшло відображення у розвитку анізотропних текстур – сланцюватих у метаосадочних та метавулканічних породах і гнейсуватих у гранітоїдах.

На відміну від кристалізаційного розсланцювання, кліважування відбувалося як односистемне в'язке сколювання у супроводі локалізованої повздовж площин сколювання перекристалізації порід. Інтенсивність кліважування та кристалізаційного розсланцювання визначається типом тектонофацій (деформаційних фацій за Є. Паталагою [3]).

Кварц є загально визнаним чутливим індикатором деформацій у метаморфічних породах завдяки його здатності до переважної кристалографічної орієнтації. При високотемпературному метаморфізмі спостерігається переважна орієнтація кристалографічної осі c кварцу у площині сланцюватості перпендикулярно лінійності, орієнтація осі c кварцу перпендикулярно сланцюватості спостерігається в умовах низькотемпературного метаморфізму.

Залежно від температурного режиму в деформованих кварцитах спостерігається формозміна зерен кварцу від сплюснування до подовження зерен кварцу при підвищенні температури.

Висновки.

У досліджених зразках порід, які неодноразово зазнавали впливу тектонічних деформацій, анізотропія викликана впорядкованістю мікротріщин і мінералів за формою та кристалографічною орієнтацією мінералів. Впорядкованість мікротріщин, яка викликана залишковими напруженнями, змінюється в межах зразка та відображає зміну локальних полів мікронапруг, які обумовлені будовою петроструктури.

Наведений метод текстурного аналізу полімінеральних порід дає можливість на основі результатів петроакустичних досліджень отримувати цінну інформацію про геологічну будову та забезпечує можливість розв'язання задач динамічного аналізу мікроорієнтувань мінералів і мікротріщин будь-яких генетичних типів текстур гірських порід.

1. Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск, 2000. 2. Лукієнко О.І. Тектонофаціальна структура Кривбасу // Вісник Київ. ун-ту. Геологія. – 2000. – Вип. 17. – С. 8–13. 3. Паталага Е.І. Тектонофаціальний аналіз складчатих сооружений фанерозоя. – М., 1985.

Надійшла до редколегії 05.09.07