

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.834+550.34.016+550.34.013.4

Д. Безродний, канд. геол. наук

ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ГЕОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ

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

Наводиться технологія акустичного текстурного аналізу, що базується на петроакустичних дослідженнях і включає в себе 2 блоки: експериментальні вимірювання швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль та обробка і інтерпретація результатів. Методика дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль в гірських породах, пружну симетрію та текстуру порід, послідовність розвитку деформацій і тектонічну природу умов їх формування і перетворення тощо.

The texture analysis of acoustic technology, which is based on the petroacoustic research and consists of two parts: the experimental measurements of velocities of quasi-longitudinal and quasi-processing waves and interpretation of results are given. The method makes it possible to obtain detailed information about the anisotropy of elastic waves in rocks, the elastic symmetry and texture of rocks, a sequence of deformation and tectonic nature of the conditions of their formation and transformation, etc.

Вивчення пружної анізотропії земних надр представляє значний інтерес для вирішення багатьох проблем

фізики Землі, дислокаційної тектоніки геологічних регіонів, регіональної геології і геофізики.

Стан проблеми Наявність пружної анізотропії свідчить про існування в гірських породах на різних структурних рівнях упорядкованості різноманітної природи. Її типи визначаються механізмом деформації і тектонічним режимом формування гірських порід. Вивчення впорядкованостей текстур гірських порід дає важливу інформацію про послідовність розвитку деформацій і тектонічну природу умов їх формування і перетворення. Багаточисельні ультразвукові дослідження гірських порід (Александров К.С., Бабушка В., Баяк Є.І., Беліков Б.П., Берч І., Бурмістров О.О., Буртний Є.Є., Головата О.С., Горбачевич Ф.Ф., Жаріков Є.А., Корчин В.О., Крістенсен Н., Лобанов К.В., Продайвода Г.Т., Прос З., Рамананатандро Р., Шабанова А.О. та інші) показали, що для вичерпної характеристики асиметричної анізотропії швидкостей різних типів пружних хвиль необхідно застосовувати методи, що забезпечують визначення повного набору компонент матриці пружних постійних гірської породи.

Проте існуючі основні методи вивчення пружної анізотропії гірських порід не завжди дають можливість отримати повний розв'язок поставленої задачі.

Метод ортогональних напрямків [1, 2, 4, 7], в якому експериментальні вимірювання швидкостей повздовжніх та поперечних хвиль здійснюються у трьох ортогонально орієнтованих циліндричних або пластинчатих зразках, що виготовлені з одного блоку породи і їхня орієнтація узгоджена з елементами текстури гірської породи. Метод дозволяє виявити наявність анізотропії і зробити наближену оцінку коефіцієнту анізотропії пружних хвиль, але просторовий аналіз швидкостей пружних хвиль та визначення повного набору матриці пружних постійних він не забезпечує.

В більш удосконаленому методі сфери [1, 7] визначення анізотропії швидкостей повздовжніх хвиль здійснюється на зразках, що мають форму кулі. Він забезпечує визначення детального просторового розподілу швидкостей квазіповздовжніх хвиль та кількісну оцінку коефіцієнта анізотропії квазіповздовжніх хвиль, але неможливість дослідження швидкостей поперечних хвиль не забезпечує розрахунку пружних модулів та повного набору компонент матриці пружних постійних гірських порід.

Акустополаризаційний метод [1, 3, 7] дослідження пружної анізотропії мінералів і гірських порід базується на вивченні явища розщеплення хвиль поперечної поляризації. Метод дозволяє визначати наявність анізотропії, число і просторову орієнтацію елементів пружної симетрії середовищ, виявляти ефект лінійної акустичної анізотропії поглинання. Суттєвим недоліком методу є складність розрізнення ефектів лінійної анізотропії поглинання та пружної анізотропії, а також неможливість визначення повного набору матриці компонент пружних постійних для випадку низькосиметричних середовищ.

В методі особливих напрямків [1, 7] швидкості розповсюдження пружних хвиль вимірюються в особливих напрямках, що суворо узгоджені з елементами симетрії структури мінералів і текстури гірських порід. Метод забезпечує якісні результати при вивченні гірських порід, елементи симетрії текстур яких відомі. Він дає можливість отримати повний набір пружних постійних для текстур гірських порід із відомою просторовою орієнтацією елементів симетрії. Але у випадку, коли симетрія текстури гірської породи і просторова орієнтація її елементів невідомі, то метод особливих напрямків застосовувати неможливо.

Інваріантно-поляризаційний метод [1, 7] забезпечує можливість визначення повного набору компонент матриць 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 вичерпний розв'язок задачі визначення параметрів анізотропії пружних хвиль, включаючи побудову стереопроєкцій ізоліній індикатрис фазових швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль. Безперечною перевагою інваріантно-поляризаційного методу є можливість кількісної оцінки регулярної і флуктуаційної 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.

Можливості застосування сейсмоакустичного інваріантно-поляризаційного методу для вирішення ряду геологічних задач розглянуто в роботі для текстурного аналізу деформацій гірських порід.

Дослідження природи деформованих порід 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 [6]. При цьому при дослідженні метаморфічних порід використовується уявлення про структурно-реологічні обстановки – катазону, мезозону та первинну й вторинну епізону. Подібні обстановки певною мірою співвідносяться з відомими петрологічними зонами У.Грубенманна. Але від останніх відрізняються тим, що при їх виділенні, в першу чергу, враховуються реологічні фактори. До катазони при цьому віднесено високопластичні та навіть наближені до в'язкого середовища, що за РТ – умовами під час деформації порід відповідають гранулітові та амфіболітові фаціям метаморфізму та ультраметаморфізму. З позицій тектонофаціального аналізу найважливішими концентраторами глибоких дислокаційних перетворень геологічних середовищ є розломи, а точніше відповідні їм зони, у межах яких подібні перетворення забезпечуються зсувною течією порід. На характер і морфологічні форми реалізації такої течії впливають відзначені вище реологічні фактори. З урахуванням останніх розломи поділяються на крихкі, крихко-в'язкі та в'язкі кліважні й сланцюваті [5, 6].

Тектонічні деформації гірських порід проявляються в орієнтації кристалографічних осей мінералів, у видовженні або сплюснутті породотвірних мінералів та формуванні макро- і мікротріщин, які залежать від інтенсивності деформації і термодинамічних умов (температури, напруженого стану). Для дослідження дислокаційної тектоніки застосовують методи структурного і тектонофаціального аналізу [5, 6], в основу якого покладено кількісні ознаки деформацій та текстурно-структурні та мінеральні зміни порід, які супроводжують ці деформації.

Таким чином, існує закономірна відповідність між структурою, складом і ступенем деформації порід [1, 5, 6, 7]. Так сильно деформовані породи формуються в умовах більш низьких тисків і температур, ніж менш деформовані породи [5]. Процеси катаклазу характеризуються текстурними змінами порід і мінералів (зокрема кварцу): розгнейсуванням, переорієнтацією кристалів мінералів і зміною їх розмірів та форми тощо.

Отримані апріорні можуть бути використані при інтерпретації даних експериментальних сейсмоакустичних досліджень, моделюванні тектонофацій і їх якісній і кількісній оцінці з застосуванням акустичного методу текстурного аналізу гірських порід.

Розроблена **методика** акустичного текстурного аналізу дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль в гірських породах, визначати пружну симетрію та текстуру порід [1, 7]. Ця інформація особливо важлива при інтерпретації геофізичної інформації, отриманої при дослідженнях порід на значних глибинах і в складних геологічних умовах, зок-

рема, для тектонофаціальних досліджень метаморфічних порід.

Технологія таких досліджень (рис. 1) включає в себе 2 блоки:

- експериментальні вимірювання швидкостей квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль;
- обробка і інтерпретація експериментальних результатів.

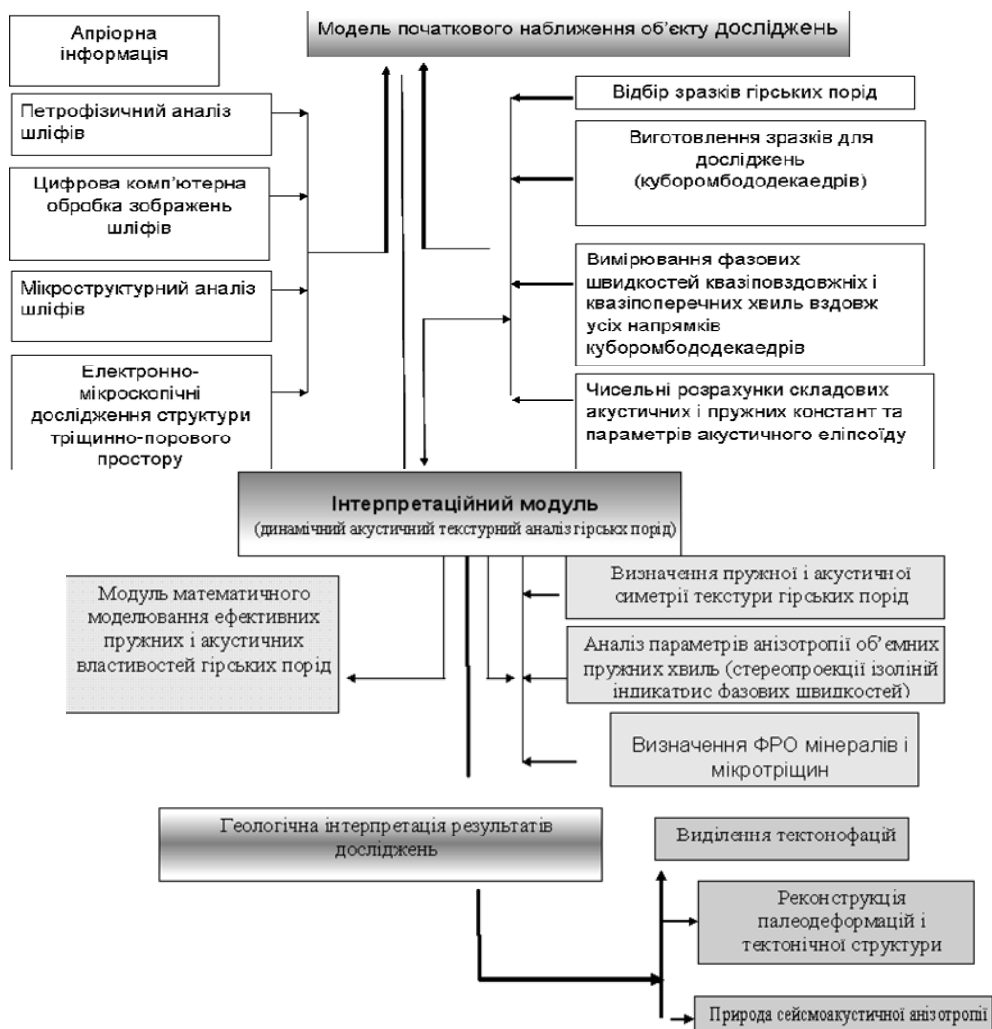


Рис. 1 Схема вимірювально-інтерпретаційної технології

Методика експериментальних вимірювань швидкостей

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

У випадку ізотропного середовища, достатньо проводити вимірювання швидкостей повздовжньої та поперечних хвиль в одному напрямку, форма зразка має бути циліндричною.

Якщо група симетрії породи кубічна, вимірювання швидкостей проводяться у трьох взаємоортогональних напрямках і форма зразка рекомендується у вигляді куба, або 3 циліндрів вздовж трьох взаємоортогональних напрямків.

У решті випадків, коли тип симетрії нижче або невідомий, геологічне середовище можна вважати анізотропним і зразок виготовляють у вигляді куборомбододекаедру.

Ультразвукова апаратура для вимірів швидкості забезпечує формування достатньо широкого набору частот заповнення і тривалості акустичних імпульсів, що застосовуються при вимірюваннях. Діапазон частот заповнення

імпульсів від 0,25 МГц до 5 МГц забезпечує успішне дослідження фазових швидкостей на зразках практично будь-яких генетичних типів гірських порід [1, 7].

Середньоквадратична похибка визначення швидкостей повздовжніх і поперечних хвиль у кристалічних зразках не перевищує 0,4 % для повздовжніх і 0,5 % для поперечних хвиль. У осадових породах вона дещо нижче: 0,5 % для повздовжніх і 0,9 % для поперечних на частоті 0,4–0,8 МГц.

Обробка і інтерпретація результатів петроакустичних досліджень

Розроблений алгоритм і програма інверсії азимутальної залежності квазіповздовжніх і квазіпоперечних швидкостей у функцію розподілу орієнтації мікротріщин.

На першому етапі проводиться визначення акустичних констант [1, 7], яке має важливе значення для вирішення цілого ряду задач:

- вибору стандартної акустичної системи координат,
- визначення підсистеми симетрії,
- обґрунтування методики урівноваження фазових швидкостей і т.і.

Для згладжування флуктуаційної складової ефективної фазової швидкості, яка обумовлена недосконалістю текстур гірських порід, застосовується інваріантно-поляризаційний метод [1, 7].

Зортка акустичного тензору μ_i є інваріантом. Отже, в будь-яких трьох взаємно ортогональних напрямках хвильової нормалі сума квадратів фазових швидкостей ізонормальних хвиль буде постійною величиною. Ця фундаментальна властивість будь-якого анізотропного середовища використовується для врівноваження ефективних фазових швидкостей в робочих системах координат куборомбододекаедру [7]. Величина коефіцієнта відносної середньоквадратичної акустичної анізотропії (A_μ) визначається як міра відхилення акустичних констант анізотропної текстури від найближчої до неї ізотропної текстури.

Співставлення власних значень з урахуванням їхніх довірчих границь дозволяє визначати симетрію акустичного тензору зразків. За результатами багаторічних досліджень [1, 7] було встановлено, що для більшості зразків магматичних і метаморфічних порід симетрія акустичного тензору – ромбічна, для осадових порід характерні як ромбічна, так і поперечно-ізотропна види симетрії.

Проводиться аналіз параметрів акустичного еліпсоїду: акустичної лінійності $L_a = \mu_0 / \mu_m$ і акустичної сланцюватості $S_a = \mu_0 / \mu_p$ (тут μ_0 , μ_m , μ_p – відповідно найбільше, проміжне й найменше власні значення акустичного тензору). Графік залежності $L_a = f(S_a)$ характеризує ступінь упорядкованості елементів текстури породи вздовж окремих напрямків (акустична лінійність) або розміщення на площині (акустична сланцюватість).

На наступному етапі обчислюється усереднена (регулярна) складова $\langle C_{mn} \rangle$ ефективного тензору пружних постійних, яка дає оцінку дисперсії згладженої флуктуаційної складової.

Визначені на другому етапі повні набори компонент матриць ефективних пружних постійних дають можливість провести аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль. Їхня азимутальна залежність представляється у вигляді стереопроєкцій ізоліній вказівних значень параметрів: фазової швидкості квазіповздовжньої та різниці між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями, кута відхилення вектора пружних зміщень і векторів променевих швидкостей від напрямку хвильової нормалі, диференціального коефіцієнту пружної анізотропії.

При аналізі параметрів акустичного еліпсоїду текстур метаморфічних порід береться до уваги, що його тензор має геометричний образ, який представляє собою характеристичну поверхню другого порядку – трьохосний еліпсоїд. Якщо скористатися узагальненим поняттям цієї поверхні, то можна побудувати поверхню, яка зв'язана із компонентами акустичного тензора, приведені 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 деформацій. Внаслідок прогресивного розвитку цього процесу кожний еліпсоїд деформації при зміні від кулі до його кінцевої форми повинен пройти через неперервну серію інших еліпсоїдальних форм. 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 деформацій. Інтенсивність деформації зсуву, яка і спричиняє орієнтацію структурних елементів, визначається величиною, яка з точністю до постійних, дорівнює другому інваріанту девіаторної частини тензора деформацій:

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

де ε_1 , ε_2 , ε_3 – власні значення деформацій [1, 7].

Беручи 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 акустичної анізотропії I_μ повинна бути пропорційна параметру інтенсивності деформацій I_ε , а саме:

$$I_\mu = \theta \cdot I_\varepsilon,$$

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:

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

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

$$\omega_\varepsilon = \beta I_\mu,$$

де β – деякий масштабний множник, який залежить від фізичної природи упорядкованих структурних елементів текстури гірської породи. Встановлена тенденція зменшення цього показника з зростанням балу тектонічних перетворень [1].

Розроблена методика акустичного текстурного аналізу тектонофацій була застосована для зразків метаморфічних порід свердловин полігону Криворізької наглибокої свердловини і її полігону.

За методикою інваріантно-поляризаційного методу були виміряні швидкості квазіповздовжніх і квазіпоперечних (швидка і повільна) пружних хвиль зразків метаморфічних порід КНГС і її полігону. На основі отриманих швидкісних даних були визначені повні набори матриць акустичних і пружних постійних. Вони дозволяють зробити певні висновки відносно пружної симетрії порід, які відібрані зі значних глибин. Розглянуті кристалічні сланці, залізисті кварцити, амфіболіти, плагіограніти і плагіомігматити, гнейси. Текстури досліджених порід відносяться до класу планальних і аксіальних текстур моноклінної, тетрагональної та ромбічної симетрії.

В 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.

Висновки Таким чином, наведена в статті технологія дослідження пружної анізотропії на прикладі методи-

ки акустичного текстурного аналізу повністю враховує пружну анізотропію геологічного середовища, базується на петроакустичних дослідженнях і обробці отриманих матеріалів за допомогою інверсії азимутальної залежності квазіповздовжніх і квазіпоперечних швидкостей у функцію розподілу орієнтації мікротріщин. Технологія дає можливість отримувати вичерпну інформацію про анізотропію пружних хвиль в гірських породах, пружну симетрію та текстуру порід, відтворює розвиток деформацій та тектонічну природу умов їх формування і перетворення, вирішує інші геологічні задачі.

1. Безродний, Д.А. Пружна анізотропія метаморфічних порід Кривбасу і її використання для вирішення задач тектонофаціального аналізу // Дис. на здобуття наукового ступеня канд. геолог. н. – 2008. – 250 с. 2. Бурмистров, А.А. Новое в изучении упругой анизотропии метаморфических пород кольской серии. / А.А.Бурмистров, Е.А.Жариков,

К.В.Лобанов // Тези наук. конф. "Ломоносовские чтения". – 2004. – <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1170523>. 3. Головатая, О. С. Изучение анизотропии упругих свойств и ее влияния на напряженное состояние пород верхней части земной коры на примере Кольской сверхглубокой скважины/ О. С.Головатая // дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. – Аппатіти. – 2004. – 218 с. 4. Корчин, В.О. Регіональні діагностичні петрофізичні особливості порід антарктичного півострова (район станції Академік Вернадський) / В.О. Корчин, п.о.Буртний, О.Є. Карнаухова та інші // Український антарктичний журнал, 2010, № 9. – 2010. – С. 23–31. 5. Лукієнко О.І. Типи розломів за реологічними формами прояву та їх будова, умови та фактори утворення і еволюція / О.І.Лукієнко // Вісник Київськ. ун-ту, Геологія, 1998. – вип. 15. – С. 12–17. 6. Паталаха Е.И. Тектонофаціальний аналіз складчатих сооружений фанерозоя (обоснование, методика, приложение) / Е.И.Паталаха // – М.: Надра, 1985. – 168 с. 7. Продайвода, Г.Т. Акустичний текстурний аналіз тектонофацій метаморфічних порід Криворіжжя / Г.Т.Продайвода, С.А.Вижва, Д.А. Безродний, І.М.Безродна // ВПЦ "Київський університет". – 2012. – 368 с.

Надійшла до редколегії 08.02.12