

УДК 550.834.042+551.21.3+539.375

АНАЛІЗ ДАНИХ ВИМІРЮВАННЯ АНІЗОТРОПІЇ В МІНЕРАЛАХ

Ю. Онанко, Г. Продайвода, С. Вижва, А. Онанко

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 60, 01601 Київ, Україна
E-mail: onanko@univ.kiev.ua*

Розглянуто систему аналізу даних ультразвукового вимірювання анізотропії швидкості в мінералах для експрес-опрацювання. Вона забезпечує врахування впливу неоднорідності складу й текстури мінералу та її впорядкованості.

Ключові слова: анізотропія мінералів, тріщини, ультразвукові хвилі, пружні сталі, пісковики, Волино-Поділля.

Під час дослідження мінералів необхідно розрізнити вплив неоднорідності їхнього складу і текстури та її впорядкованості, яка має недосконалий і, здебільшого, статистичний характер [1, 2]. Поширення ультразвукових (УЗ) пружних хвиль у мінералах супроводжується розсіянням і поглинанням, яке залежить від частоти f і спричиняє спотворення акустичних імпульсів унаслідок скінченної ширини їхнього спектра та ускладнює вимірювання фазових швидкостей V пружних хвиль [5, 7, 8]. Результати вимірювань опрацьовували за допомогою автоматизованої системи числового аналізу й візуалізації даних УЗ вимірювань параметрів анізотропії швидкості V пружних хвиль у мінералах.

Геолого-петрографічна характеристика. Для експериментального вивчення пружних сталей відібрано взірці з Лудинської площі Волино-Подільського регіону. Визначено їхній літологічний склад, структурно-текстурні особливості, характер цементу. Досліджено такі дрібнозернисті пісковики:

1) порода ясно-сірого кольору з масивною, нешаруватою текстурою. Наявна система субпаралельних тріщин під кутом $\alpha \approx 10\text{--}15^\circ$ до осі симетрії. Одна з тріщин заповнена кальцитом. Поверхня взірця гладка, злом раковистий, ділянками нерівний та східчастий по тонких тектонічних тріщинках, які заліковані карбонатом коричневого кольору. Порода щільна, непориста, поглинання краплі води на поверхні взірця мінімальне. Структура псамітова, рівномірнозерниста, дрібнозерниста (розмір уламків – близько 0,1 мм). Уламки кварцу білого кольору формують цукроподібну масу, цемент – за припущенням кременистий регенераційний (взірець Лу-9, глибина – 2 866 м);

2) порода ясно-сірого кольору з неупорядкованою, проте не шаруватою текстурою. Поверхня відколу нерівна. Порода не пориста: поглинання краплі води перевищує $t > 5$ хв. Структура псамітова, рівномірнозерниста, дрібнозерниста (розмір уламків – близько 0,1 мм). Уламки білого кварцу псамітової розмірності утворюють суцільну цукроподібну основну масу на поверхні взірця. Цемент кременистий регенераційний з невеликою домішкою глинистої речовини (взірець Лу-15, глибина – 3 009 м);

3) порода ясно-сірого до білого кольору, подекуди забарвлення слабко смугасте. Текстура шарувата. Це виявляється в чергуванні ясно-сірих прошарків потужністю до 5 мм

з тоншими (до 2 мм) прошарками темнішого відтінку (до зеленкувато-сірого) завдяки зміні складу цементу. Поверхня відколу пласка, нерівна, відчутно шорсткувата на дотик. Порода міцна, добре зцементована, пориста. Структура псамітова, дрібнозерниста (розмір зерен – 0,1–0,2 мм). Цемент глинистий, білий (каолінітовий), у тонких прошарках, можливо, кременисто-глинистий; тип цементациї – відкрито-поровий. Склад породи: уламково-теригенна фракція (кварц, магнетит) – 80 %, цемент – 20 % (взірець Лу-37, глибина – 3 102–3 110 м).

Зі штуфів керна на каменерізному станку виготовлено взірці у вигляді куборомбододекаєдрів розміром $30 \times 30 \times 30 \text{ мм}^3$. Забезпечено паралельність відповідних пар граней не гірше $\parallel \leq \pm 0,015 \text{ мм}$. Орієнтація напрямів вимірювання – з точністю $\Delta\alpha = \pm 1,5^\circ$.

Стандартними петрофізичними методами визначали густину ρ й ефективну пористість взірців. Фазову швидкість V об'ємних пружних хвиль одержано за допомогою імпульсної установки для УЗ вимірювання швидкості V на частоті $f \approx 1\,670 \text{ кГц}$. Як п'єзовипромінювач і приймач поздовжніх та поперечних мод використовували п'єзокварц відповідної поляризації. Точність визначення фазових швидкостей поздовжніх та поперечних мод $\Delta V/V \approx 0,5 \%$.

Швидкість об'ємних пружних хвиль V , акустична константа μ_{11} і пружна стала C_{mn} змінюються в широких межах. Це пов'язано з варіаціями літологічного складу порід і складом цементу, наявністю пор і мікротріщин.

Найбільші значення фазової швидкості та пружної сталої зафіксовано у взірці Лу-9, основна маса якого складена з уламків білого кварцу, що формують цукроподібну масу. Найменші значення V і C_{mn} визначені у взірці Лу-37, основна маса якого представлена уламково-теригенною фракцією (кварц, магнетит). Пружна анізотропія характерна для різновидів з макро- і мікросхаруватістю та для масивних різновидів пісковиків.

Проаналізовано параметри акустичної анізотропії основних петротипів осадових порід Лудинської площі. За власними значеннями акустичного тензора μ_{11} обчислено інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_{μ} . В інтервалі 2 850–3 100 м значення A_{μ} змінюється в межах $7,17 \% \leq A_{\mu} \leq 13,62 \%$, становлячи в середньому близько 10,33 %. Загалом досліджені пісковики мають середні значення інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії: $5 \% < A_{\mu} < 15 \%$.

Стереопроєкції параметрів пружної анізотропії показано на рис. 1–4. Зокрема, на рис. 1 зображено стереопроєкції азимутальної залежності поздовжньої швидкості V_{\parallel} (ізолінії в кілометрах за секунду).

Пружна анізотропія відображає історію деформації. Досліджувані взірці мають виражену впорядкованість будови, яка приводить до ще більш вираженої анізотропії пружних хвиль. Анізотропія і впорядкованість структурних елементів – взаємопов'язані фундаментальні властивості, що відображають деформаційні процеси їхнього формування й перетворення. Пружна симетрія середовища накладає жорсткі обмеження на характер азимутальної залежності параметрів анізотропії пружних хвиль. На рис. 2 показано стереопроєкції різниці поперечних швидкостей $\Delta V_{\perp} = V_{\perp 1} - V_{\perp 2}$ (ізолінії в кілометрах за секунду).

Найінформативнішим параметром анізотропії є диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії A_d , значення якого характеризує відхилення текстури від найближчого ізотропного середовища. За допомогою цього коефіцієнта можна порівнювати анізотропію пружних середовищ різної симетрії. Зазначені поверхні параметрів анізотропії зображають у вигляді стереопроєкцій ізоліній. Ця поверхня дає вичерпні уявлення про просто-

рову зміну параметрів анізотропії об'ємних пружних хвиль і відображає вплив симетрії. На рис. 3 зображено стереопроєкції диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d (ізолінії у відсотках).

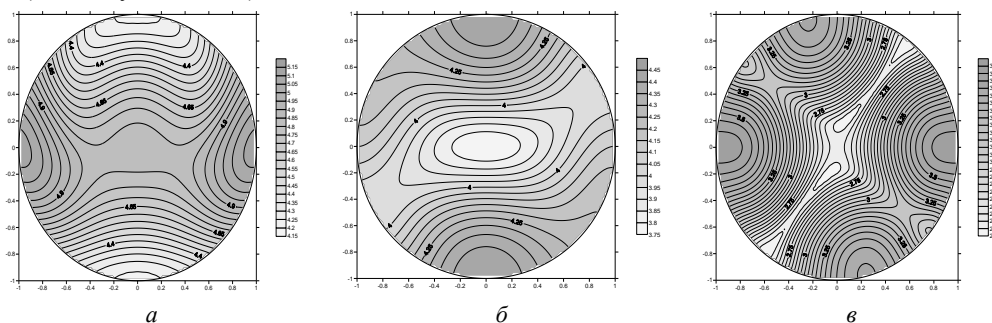


Рис. 1. Стереопроєкції азимутальної залежності поздовжньої швидкості $V_{||}$:
 a – Лу-9; b – Лу-15; c – Лу-37.

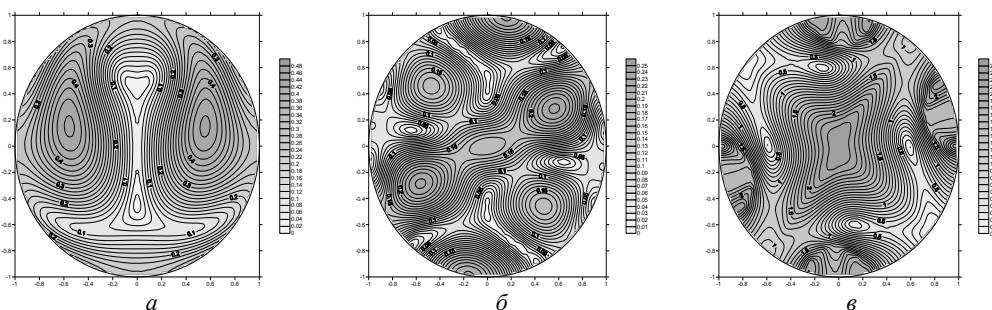


Рис. 2. Стереопроєкції різниці поперечних швидкостей $\Delta V_{\perp} = V_{\perp 1} - V_{\perp 2}$:
 a – Лу-9; b – Лу-15; c – Лу-37.

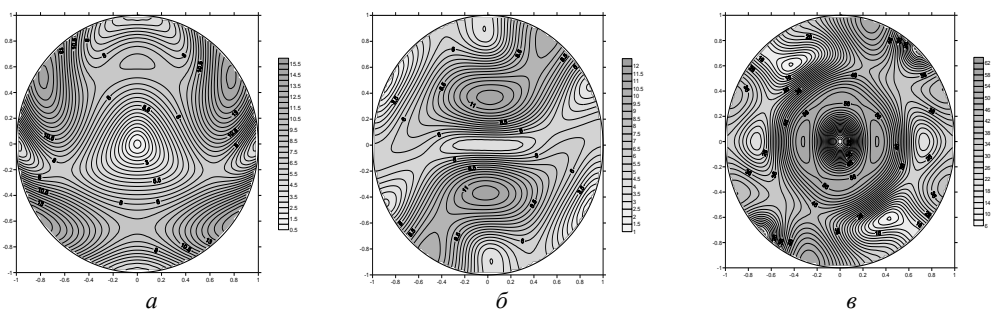


Рис. 3. Стереопроєкції диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d :
 a – Лу-9; b – Лу-15; c – Лу-37.

Експериментально з'ясовано, що більшість взірців є пружно-анізотропними. Коефіцієнт пружної анізотропії змінюється в межах $7,17\% \leq A_{\mu} \leq 13,62\%$. Особливо на значення A_{μ} впливає просторовий збіг напрямів орієнтації структурних елементів, насамперед, кристалографічної орієнтації та орієнтації зерен за формою разом з орієнтацією

мікротріщин. Анізотропія взірців зумовлена текстурними особливостями, упорядкованістю структурно-морфологічного парагенезису, що виявляється у смугастості та лінійності. Це пов'язано зі сплющено-лінзоподібним розвитком смугастості й сланцюватості, орієнтуванням шарнірів і осьових площин лінійних складок та орієнтуванням мінералів за формою й будовою. Анізотропія ускладнена накладеною впорядкованою мікротріщинуватістю [3, 4, 6].

На рис. 4 показано стереопроєкції кута відхилення вектора пружних зміщень \vec{U} від напрямку хвильової нормалі (\vec{U}, \vec{n}) (ізолінії в градусах).

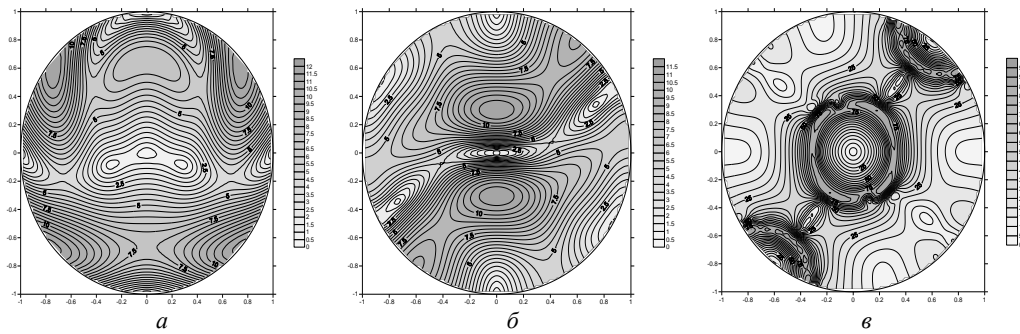


Рис. 4. Стереопроєкції кута відхилення вектора пружних зміщень \vec{U} від напрямку хвильової нормалі (\vec{U}, \vec{n}):
а – Лу-9; б – Лу-15; в – Лу-37.

Одержані дані пружної сталі C_{mn} досліджуваних взірців дають підстави зробити висновки щодо симетрії їхніх текстур. Симетрія ромбічна – $9C_{mn}$. У цьому разі деякі значення C_{mn} незначно відрізняються від нуля. Текстури взірців можна зачислити до класу планальних (акустично сланцюватих) або аксіальних (акустично лінійних). Поперечно-ізотропна апроксимація пружної анізотропії осадових порід є наближенням. Вибір наближення пружної симетрії накладає жорсткі обмеження на азимутальну залежність усіх параметрів анізотропії об'ємних пружних хвиль, розщеплення поперечних хвиль і поляризаційні ефекти.

Отже, розроблену автоматизовану систему числового аналізу та візуалізації даних ультразвукового вимірювання параметрів анізотропії швидкості пружних хвиль можна використовувати для експрес-опрацювання експериментальних значень фазової швидкості квазіпоздовжніх V_{\parallel} , “швидкої” $V_{\perp 1}$ і “повільної” $V_{\perp 2}$ квазіпоперечних хвиль та густини ρ . Розглянуто програмно-алгоритмічні засоби автоматизованої системи числового аналізу й візуалізації даних УЗ вимірювання параметрів анізотропії швидкості пружних хвиль, які забезпечують урахування впливу неоднорідності складу і текстури та її впорядкованості.

Одержано значення пружної сталі C_{mn} взірців Волино-Подільського регіону. Вони свідчать про те, що пружна симетрія ромбічна, а не поперечно-ізотропна. Коефіцієнти пружної та акустичної анізотропії змінюються в широких межах. Доведено, що для них також характерні явища акустичного двозаломлення, поляризаційні ефекти і сингулярна поведінка векторів пружних зміщень \vec{U} навколо акустичних осей, які не збігаються з напрямками осей симетрії текстур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Александров К. С. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород / К. С. Александров, Г. Т. Продайвода. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. – 354 с.
2. Вижва С. А. Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів / С. А. Вижва. – К. : Обрії, 2004. – 236 с. 2
3. Вижва С. А. Сейсмоакустична діагностика процесів руйнування в геологічному середовищі / С. А. Вижва, Г. Т. Продайвода, Ю. А. Онанко // Геоінформатика. – 2011. – № 1. – С. 42–47.
4. Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу / Г. Т. Продайвода, С. А. Вижва, І. М. Безродна, Г. Т. Продайвода. – К. : ВПЦ “КУ”, 2011. – 367 с.
5. Лукієнко О. І. Структурна геологія / О. І. Лукієнко. – К. : КНТ, 2008. – 350 с.
6. Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання : [Довідник – навч. посібник] / М. І. Толстой, Ю. Л. Гасанов, Н. В. Костенко [та ін.]. – К. : ВПЦ “КУ”, 2003. – 329 с.
7. Продайвода Г. Т. Акустоупругие эффекты в микротрещиноватой геологической среде / Г. Т. Продайвода, Б. П. Маслов, С. А. Вижва // Геофиз. журн. – 2001. – Т. 23, № 5. – С. 92–100.
8. Томилин Н. Г. Иерархическая модель разрушения горных пород : [Науки о Земле : Физика и механика геоматериалов] / Н. Г. Томилин, В. С. Куксенко. – М. : Вузовская книга, 2002. – 116 с.

*Стаття: надійшла до редакції 04.05.2012
прийнята до друку 29.05.2012*

DATA ANALYSIS OF ANISOTROPY MEASURING IN MINERALS

Yu. Onanko, G. Prodayvoda, S. Vyzhva, A. Onanko

*Taras Shevchenko National University of Kyiv,
60, Volodymyrska St., 01601 Kyiv, Ukraine
E-mail: onanko@univ.kiev.ua*

The analysis system of anisotropy ultrasound measuring of velocities are examined in minerals for express-treatment, which provides the account of influence composition heterogeneities and texture structure of minerals and their ordering.

Key words: mineral anisotropy, cracks, ultrasound waves, elastic constants, sandstones, Volyno-Podillya.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ В МИНЕРАЛАХ

Ю. Онанко, Г. Продайвода, С. Выжва, А. Онанко

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
ул. Владимирская, 60, 01601 Киев, Украина
E-mail: onanko@univ.kiev.ua*

Рассмотрено систему анализа данных ультразвуковых измерений анизотропии скоростей в минералах для экспресс-обработки, которая обеспечивает учет влияния неоднородностей состава и текстуры минералов и её упорядоченности.

Ключевые слова: анизотропия минералов, трещины, ультразвуковые волны, упругие постоянные, песчаники, Вольно-Подолье.