

Ю. А. Онанко, Г. Т. Продайвода, С. А. Вижва, А. П. Онанко, О. В. Шабатура

## ЕФЕКТИ АНІЗОТРОПІЇ В СКЛАДНИХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНИХ УМОВАХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ВОЛИНО-ПОДІЛЬСЬКОЇ ПЛИТИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Y. A. Onanko, G. T. Prodayvoda, S. A. Vyzhva, A. P. Onanko, A. V. Shabatura

## THE ANISOTROPY EFFECTS IN COMPLICATED TENSE-DEFORMED CONDITIONS OF VOLYN-PODILLYA PLATE ROCK-COLLECTORS FROM THE ULTRASONIC MEASUREMENT RESULTS

Досліджено ефекти параметрів анізотропії порід-колекторів Волино-Подільської плити за результатами ультразвукових вимірювань для складних напружено-деформаційних умов. Для порід встановлено ромбічний тип акустичної анізотропії, що пов'язаний з текстурними особливостями, речовинним складом та складнопорядкованою мікротріщиноватістю порід.

*Ключові слова:* породи-колектори, акустична анізотропія, мікротріщини, швидкості пружних хвиль.

Исследованы эффекты параметров анизотропии пород-коллекторов Волино-Подольской плиты по результатам ультразвуковых измерений для сложных напряженно-деформационных условий. Для пород определен ромбический тип акустической анизотропии, который обусловлен текстурными особенностями, вещественным составом и сложнопорядоченной микротрещиноватостью пород.

*Ключевые слова:* породы-коллекторы, акустическая анизотропия, микротрещины, скорости упругих волн.

The effects of anisotropy parameters of the Volyn-Podillya Plate rock-collectors are explored from the results ultrasound measurements for the complicated tense-deformed conditions. For rock specimens is discovered orthorhombic type of acoustic anisotropy this is determined with texture, composition and rocks compound-ordered microfracturing.

*Keywords:* rock-collectors, acoustic anisotropy, microcracks, elastic waves velocities.

### ВСТУП

Анізотропія швидкостей  $V$  пружних хвиль гірських порід розглядається як один із найбільш інформативних параметрів геологічних процесів, зокрема геодинамічних. Експериментальні дослідження, чисельний аналіз і математичне моделювання параметрів анізотропії ультразвукових (УЗ) досліджень швидкостей пружних повздожних хвиль, характеристик акустичного тензору дозволяють встановити особливості напружено-деформованого стану гірських порід. Проте варто зауважити, що ці дослідження пов'язані із значними труднощами [1, 3–10]. По-перше, при вивченні порід-колекторів необхідно розрізнявати вплив неоднорідності структурного складу і будови текстур гірських порід та їх упорядкованості, яка має недосконалий і статистичний характер; по-друге, належить враховувати роль пружної анізотропії порід; по-третє, зважати на вплив умов утворень (глибинності, деформаційного режиму, накладеного метаморфізму тощо). Відомо, що інтенсивний динамотермальний метаморфізм, що накладався на породи, призводив до структурно-механічного перетворення їх при різних рівнях тисків ( $P$ ) та температур ( $T$ ) в ані-

зотропних полях напружень ( $\sigma$ ). Ці перетворення мали свій відбиток у структурно-текстурних особливостях порід. Плантальна структура означає, що породи в момент свого утворення перебували в умовах квазівсебічного літостатичного тиску; аксіальна структура може свідчити про наявність директивних напружень.

Комплексний підхід до аналізу результатів вимірювання УЗ досліджень на зразках гірських порід, що полягає в оцінці акустичного тензору при залученні інших геологічних характеристик породи (літологічних, петрологічних), дозволить розв'язати ряд задач, пов'язаних із встановленням характеристик анізотропії пружних властивостей порід-колекторів [2, 11].

### РАЙОН РОБІТ, МЕТОДИ ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для експериментального дослідження акустичних констант були відібрані зразки порід-колекторів із різних структурних зон Волино-Подільського регіону: Володимирівської, Великомоствівської, Сокальської і Сушнівської площ (табл. 1). У текстурному рисунку досліджуваних порід-колекторів спостерігався перехід від брекчіювання до часткової мілонітизації

Таблиця 1. Літологічна характеристика зразків

Зразок		Вл-27	Вл-31	Вм-27	Со-20	Су-18	Су-19
Площа		Володимирівська		Велико-мостівська	Сокальська	Сушнівська	
Порода		Пісковик		Вапняк доломітизований	Пісковик		
Забарвлення		Світло сіре до білого	Світло-сіре	Сіре з буруватим відтінком	Світло-сіре	Світло-сіре, смугасте	Біле
Скол		Плаский, нерівний	Східцевий, шершавий	Шершавий, нерівний	Нерівний, бугристий	Нерівний, вузлуватий	Нерівний, раковистий
Структура		Д/з, псамітова	Приховано-кристалічна, д/з, р/з, псамітова	Нерівно-зерниста, д/з, тонко-зерниста	Дрібно-зерниста	Рівнозерниста псамітова переважно тонкозерниста	
Розміри зерен, мм		0,05 ÷ 0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	≥ 0,1
Текстура		Нешарувата	Лінзи 8 мм зеленого кольору	Плямиста, кальцитові скупчення 0,1–0,3 мм	Перервно-шарувата до однорідної	Шаруватість слабохвиляста	Рівномірна
Орієнтація тріщинуватості відносно осі симетрії керну		1)   ; 2) 80°	—	1) ⊥; 2)   ; l = 0,1–0,3 мм заліковані Cal і Dol	20°	—	Незаліковані
Пористість		Погано виражена	—	—	Відкрита і закрита	—	—
Склад	Матрикс	Q <sub>u</sub> — 75%,	Q <sub>u</sub>	Кальцит, доломіт	Уламки Q <sub>u</sub> , польових шпатів	Уламки Q <sub>u</sub> , можливо з ПШ	Уламки Q <sub>u</sub> , можливо ПШ
	Цемент	25%	Силікатно-глинистий	—	Кременистий	30% кременистий	15–20% кременисто-каоліновий

та філонізації. Розмір пор у дрібнозернистих пісковиків становив близько  $d \approx 50$  мкм присутні як відкрита, так і закрита види пористості. Дрібнозернисті пісковики з тонкошаровою текстурою характеризуються чергуванням дрібнозернистих напівобкатаних зерен уламкового кварцу і польового шпату та шарів глинистого цементу і гідрослюд. Прошарки збагачені бітумом до 10%. Уламки кварцу і гідрослюд орієнтовані вздовж шаруватості. Цемент глинистий, кременистий, регенераційно-корозійний. Катагенічні зміни проявляються в ущільненні зерен внаслідок регенерації кварцу. Спостерігаються утворення орієнтованих лусок біотиту і мікротріщинуватість. Тріщинуватість має ознаки декількох генерацій; тріщини заліковуються кальцитом і доломітом; присутні тріщини без заповнювача.

Фазові швидкості об'ємних пружних хвиль одержані за допомогою імпульсної установки для УЗ вимірювань швидкостей на частоті  $f \approx 1,67$  МГц. У п'єзовипромінювачі і приймачі повздовжніх і поперечних мод коливань пруж-

них хвиль використовувалися п'єзокварци відповідної поляризації. Точність визначення фазових швидкостей повздовжніх та поперечних мод  $\Delta V/V \approx 0,5\%$ .

#### МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Використання чутливого методу вимірювань параметрів анізотропії швидкостей пружних хвиль V дає змогу встановити основні риси розвитку акустичної анізотропії в умовах напружено-деформованого стану гірських порід. Тому задачею цього дослідження є показ ефективності застосування методу вимірювань параметрів анізотропії швидкостей пружних хвиль V з точки зору встановлення основних типів акустичної анізотропії, зв'язку її з геологічними умовами існування порід-колекторів.

#### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Акустичні константи  $\mu_{ij}$  досліджуваних зразків змінюються в широких межах, що пов'язане із варіаціями їх літологічного складу і складом цементу, наявністю пор і мікротріщин на фоні

існування інтенсивної азимутальної анізотропії фазових швидкостей пружних хвиль різної поляризації. Оскільки зіставлення величин швидкостей в різних напрямках не дає об'єктивної кількісної оцінки анізотропії текстури гірської породи, оцінювання анізотропії можна провести лише при визначенні повного набору тензорних матриць акустичних і пружних постійних, які забезпечують надійні оцінки акустичної і пружної симетрії середовищ та параметрів анізотропії пружних хвиль. Для вирішення цих задач були залучені урівноважені значення фазових швидкостей пружних хвиль гірських порід.

Попередня обробка результатів УЗ вимірювань (операція урівноваження до вимірних значень фазових швидкостей пружних хвиль) дозволила істотно згладити вплив флуктуаційної складової. Це, по-перше, підтверджується досить вузькими, за винятком одиничних випадків, довірчими границями обчислених власних значень регулярної складової акустичного тензора. По-друге, аналіз акустичних констант  $C_{mn}$  дозволив встановити чисельні значення анізотропії зразків: акустичну лінійність  $L_{\mu}$ , акустичну сланцюватість  $S_{\mu}$ , інтегральний коефіцієнт пружної анізотропії  $A_{\mu}$ , тип симетрії акустичного тензора  $\mu_{ij}$ . Зазначені параметри опи-

сують в чисельному вигляді форму акустичного еліпсоїда, а саме акустичну лінійність  $L_{\mu} = \mu_g / \mu_m$  та акустичну сланцюватість  $S_{\mu} = \mu_m / \mu_p$ , де  $\mu_g$ ,  $\mu_m$ ,  $\mu_p$  — відповідно найбільше, проміжне і найменше власні значення акустичного тензора.

Класифікацію текстур на вищу, середню і нижню категорії було здійснено за результатами виділення симетрії акустичного тензора  $\mu_{ij}$  з урахуванням довірчих меж знайдених власних значень, де враховувалися такі положення: 1) сферична симетрія (якщо виконується рівність  $\langle \mu_{11} \rangle = \langle \mu_{22} \rangle = \langle \mu_{33} \rangle$ ); 2) поперечно-ізотропна симетрія (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  $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle = \langle \mu_{22} \rangle$ ); 3) ромбічна симетрія (умова  $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{22} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle$ ). Результати чисельних розрахунків власних значень і власних напрямків акустичного тензора, а також значення коефіцієнтів акустичної анізотропії і параметрів акустичної лінійності та сланцюватості для зразків порід Волино-Подільського регіону представлені в табл. 2.

#### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Діаграма залежності акустичної лінійності  $L_{\mu}$  від акустичної сланцюватості  $S_{\mu}$  текстур досліджуваних зразків гірських на рис. 1 показує

Таблиця 2. Власні значення детермінованої складової акустичного тензора  $\mu_{ij}$  зразків гірських порід Волино-Подільського регіону (довірчі границі при 5% рівні значущості у чисельнику та їх власні напрямки — у знаменнику)

Зразок Інтервал глибин, м	$\langle \mu_{11} \rangle \pm \Delta, (\text{км/с})^2$			$\langle \mu_{22} \rangle \pm \Delta, (\text{км/с})^2$			$\langle \mu_{33} \rangle \pm \Delta, (\text{км/с})^2$			$A_{\mu}, \%$	Симетрія акустичного тензора	$L_{\mu}$	$S_{\mu}$
	$l^{(1)}$	$m^{(1)}$	$n^{(1)}$	$l^{(2)}$	$m^{(2)}$	$n^{(2)}$	$l^{(3)}$	$m^{(3)}$	$n^{(3)}$				
Вл-27 2210– 2219	31,681 ± 0,0164			30,575 ± 0,0164			27,165 ± 0,0148			6,43	Планальна	1,036	1,126
	0,530	0,842	-0,097	-0,844	0,535	0,036	0,082	0,063	0,995		Ромбічна		
Вл-31 2263– 2268	36,623 ± 0,3103			32,679 ± 0,3069			22,254 ± 0,3090			19,48	Планальна	1,121	1,468
	-0,107	-0,147	-0,983	-0,993	0,062	0,099	0,046	0,987	-0,153		Ромбічна		
Вм-27 2170– 2178	52,236 ± 0,0565			49,310 ± 0,0634			46,152 ± 0,0635			5,04	Планальна	1,059	1,068
	-0,178	0,984	0,029	-0,701	-0,106	-0,706	-0,691	-0,146	0,708		Ромбічна		
Со-20 3484– 3506	39,917 ± 0,0303			35,331 ± 0,0311			34,796 ± 0,0297			6,25	Аксіальна	1,130	1,015
	0,946	-0,322	0,027	0,318	0,914	-0,253	0,056	0,248	0,967		Ромбічна		
Су-18 2545– 2550	30,469 ± 0,0682			28,822 ± 0,0686			24,208 ± 0,0633			9,48	Планальна	1,057	1,191
	0,755	0,609	0,245	-0,656	0,704	0,271	-0,007	-0,365	0,931		Ромбічна		
Су-19 2500– 2502	31,428 ± 0,1038			28,739 ± 0,1042			25,583 ± 0,0919			8,33	Планальна	1,094	1,123
	0,729	0,684	0,020	-0,681	0,723	0,121	0,068	-0,102	0,992		Ромбічна		

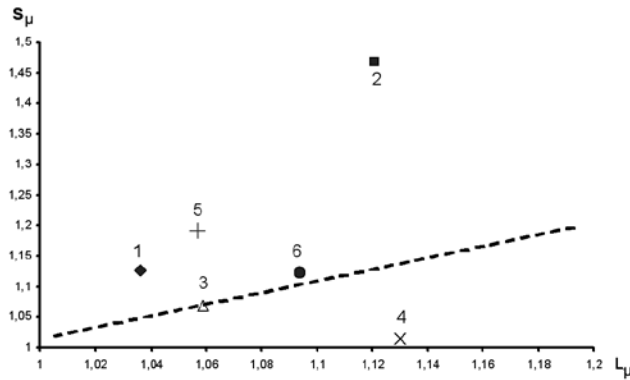


Рис. 1. Діаграма залежності акустичної лінійності  $L_\mu$  від акустичної сланцюватості  $S_\mu$  текстур зразків. Переривиста лінія розмежовує планальні та аксіальні текстури  
Зразки: 1) Вл-27; 2) Вл-31; 3) Вм-27; 4) Со-20; 5) Су-18; 6) Су-19

міру упорядкованості елементів текстури породи вздовж окремих напрямків (лінійна орієнтація, що відповідає акустичній лінійності) або вздовж площин (шаруватість, сланцюватість, що відповідає акустичній сланцюватості).

Результати аналізу параметрів акустичного тензора показали декілька головних тенденцій. Відстежується квазілінійна залежність між величинами  $L_\mu$  і  $S_\mu$  на рис. 1, яка вказує на спільну причину їх формування, яка супроводжується також збільшенням показника інтегральної акустичної анізотропії  $A_\mu$ . Тренд  $L_\mu$  і  $S_\mu$  з глибиною певною мірою узгоджений і не має зв'язку із глибинністю. Ця теза, з одного боку, виключає фактор літостатичного тиску на формування варіацій  $L_\mu$  і  $S_\mu$ , а з іншого — дозволяє допустити домінуючий вплив структурно-текстурних особливостей зразка на формування акустичної симетрії (кристалографічні осі, орієнтація структурних елементів — зерен, тріщин). Ін-

тегральний коефіцієнт акустичної анізотропії досліджуваних зразків змінюється в широких межах:  $6,25\% < A_\mu < 19,48\%$  і становить у середньому  $A_\mu \approx 9,99\%$ . Вплив глибинності (літостатичного тиску) на  $A_\mu$  неоднозначний — на малих глибинах проявляється лінійна залежність  $A_\mu$  від глибини. Із збільшенням глибини  $H$  відмічається помітне зниження  $A_\mu$ . Малий обсяг вибірки не дає змогу чітко встановити природу цього тренда, але помічено, що з глибиною відбувається зростання впливу планальної компоненти симетрії акустичного тензора і зменшення аксіальної.

Найбільш виражені типи акустичної симетрії проявлені в пісковиках, і навпаки, для зразка вапняку характерний найменш виражений тип симетрії і найнижча величина інтегрального коефіцієнта анізотропії. До того ж, у нього виявлені найбільш високі значення фазових швидкостей і пружних постійних. Всі зразки (окрім

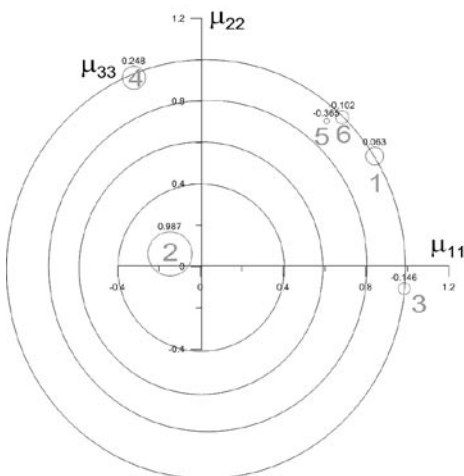


Рис. 2. Полярна діаграма параметрів акустичного тензора  $\mu_{11}$ ,  $\mu_{22}$ ,  $\mu_{33}$   
Зразки: 1) Вл-27; 2) Вл-31; 3) Вм-27;  
4) Со-20; 5) Су-18; 6) Су-19

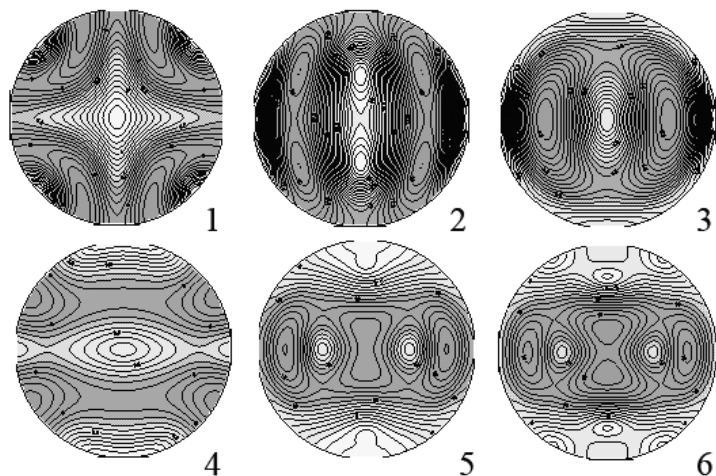


Рис. 3. Стереопроєкції диференціального коефіцієнта пружної анізотропії  $A_\mu$ , ізолінії в %  
Зразки: 1) Вл-27; 2) Вл-31; 3) Вм-27; 4) Со-20; 5) Су-18; 6) Су-19

пісковиків із Сокальської площі, Со-20) мають планальний тип симетрії акустичного тензора; зразок із аксіальною симетрією акустичного тензора (Со-20) має один із найнижчих коефіцієнтів інтегральної акустичної анізотропії  $A_{\mu}$ . Не відмічається суттєвих статистично значущих відмінностей латерального розподілу  $A_{\mu}$  зразків.

Результати аналізу симетрії акустичного тензора  $\mu_{ij}$  показують, що досліджувані текстури порід-колекторів за співвідношенням власних значень акустичного тензора можна віднести до ромбічної симетрії на рис. 2. Ця особливість чітко проявляється при розгляді стереопроєкції диференціального коефіцієнта пружної анізотропії  $A_d$  на рис. 3.

### ВИСНОВКИ

Таким чином, аналіз параметрів акустичного тензора  $\mu_{ij}$  зразків порід-колекторів Волино-Подільського регіону показав наявність, принаймні, дворівневої природи анізотропії пружних властивостей. Перший фактор анізотропії формується за рахунок речовинного складу, орієнтованого розташування зерен мінералів у породі, тріщин, текстурних особливостей. Він найбільш виражений у домінуючій літологічній групі зразків — пісковиках. Для пісковиків характерні найвищі діапазони зміни параметрів акустичної лінійності  $L_{\mu}$ , акустичної сланцюватості  $S_{\mu}$  та інтегрального коефіцієнта пружної анізотропії  $A_{\mu}$ , а максимальні величини мають зразки з ромбічною симетрією акустичного тензора  $\mu_{ij}$ . Причиною такої варіації є, насамперед, структурно-текстурні особливості порід (пружні константи породоутворюючої породи, величина та орієнтація тріщинних систем породи, наявність чи відсутність заповнювача тріщин тощо). Другий фактор анізотропії зв'язаний переважно з умовами утворення породи. Із зростанням глибинності відмічається зміна домінуючого типу акустичної симетрії: з планального на аксіальний для зразків з ромбічною симетрією. Причому із зростанням глибинності  $H$  і літостатичного тиску  $P$  динаміка зміни параметрів акустичної лінійності  $L_{\mu}$  переважає над відпо-

відною зміною акустичної сланцюватості  $S_{\mu}$ . Ця тенденція проявляється на фоні загального зростання  $A_{\mu}$ , але тільки для проміжних глибин; подальше зростання глибинності  $H$  приводить до зниження інтегрального коефіцієнта пружної анізотропії  $A_{\mu}$ .

1. Александров К. С., Продайвода Г. Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 354 с.
2. Астафьев С. В., Шилько Е. В., Ружин В. В., Псахье С. Г. Исследование влияния напряженного состояния на отклик границ раздела блоков в геологических средах при динамических воздействиях // Геология и геофизика. — 2008. — Т. 49, №1. — С. 67–77.
3. Беспалько А. А., Гольд Р. М., Яворович Л. В., Дацко Д. И. Влияние текстурных особенностей образцов алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2002. — №2. — С. 27–31.
4. Вижва С. А. Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. — К.: Обрії, 2004. — 236 с.
5. Ипатенко С. П., Ипатенко А. С. Новое о физике Земли (Начала геонимии). — К.: НЧП "КОРУНД", 2002. — 194 с.
6. Маслов Б. П., Продайвода Г. Т., Вижва С. А. Новый метод математического моделирования процессов разрушения в литосфере // Геоинформатика. — 2006. — № 3. — С. 53–61.
7. Продайвода Г. Т., Вижва С. А., Куликов О. А. Пружні постійні і анізотропія об'ємних пружних хвиль пісковиків // Вісник Київ. ун-ту. — 1995. — №13. — С. 38–54.
8. Продайвода Г. Т., Маслов Б. П., Вижва С. А. Акустоупругие эффекты в микротрещиноватой геологической среде // Геофиз. журн. — 2001. — Т. 23, №5. — С. 92–100.
9. Продайвода Г. Т., Вижва С. А., Безродна І. М., Продайвода Т. Г. Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу. — К.: ВПЦ "Київ. ун-т", 2011. — 367 с.
10. Хисматуллин Р. К. Динамика напряженно-деформированного состояния горной породы при разных типах насыщенности // Нефтегазовое дело. — 2006. — №4. — С. 1–14.
11. Шкуратник В. Л., Вознесенский А. С., Набатов В. В., Вильямов С. В. Об идентификации генотипов горных пород по их акустоэмиссионному отклику на термическое воздействие // Наук. пр. УкрНДМІ НАН України. — 2009. — Ч. 1, №5 — С. 225–233.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ  
E-mail: onanko@univ.kiev.ua