

АНИЗОТРОПІЯ АКУСТИЧНИХ ТА ПРУЖНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ЗА ДАНИМИ ЛАБОРАТОРНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

С.А. Вижва¹, І.М. Безродна², Д.А. Безродний³, С.А. Попов⁴

¹ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, E-mail: vyzhvas@gmail.com
Доктор геологічних наук, професор, завідувач кафедри

²ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, E-mail: bezin3@ukr.net
Кандидат геологічних наук, заступник директора

³ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, E-mail: manific2@ukr.net
Кандидат геологічних наук, доцент

⁴ННІ «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, E-mail: saporovsa@mail.ru
Кандидат геологічних наук, завідувач лабораторії

Проведено вимірювання швидкостей квазіпоздовжньої, а також швидкої та повільної квазіпоперечних хвиль 48 кубічних зразків пісковиків ядра свердловин Руновщинської площі ДДЗ.

За результатами петрофізичних досліджень були визначені параметри акустичної і пружної анізотропії колекції зразків, зокрема, параметри акустичного тензора і акустичного еліпсоїда; типи симетрії і категорії текстур порід; параметри Томсена.

Переважає кількість зразків має поперечно-ізоотропний тип симетрії текстури (79 %), а 10 зразків – ромбічний. Більшість зразків мають планальний тип симетрії (17 зразків), менша частина – аксіальний (16 зразків). Досліджувані зразки є переважно квазіізотропними (24 зразка, $0 < A_{\mu} < 5\%$) і середньоанізотропними (17 зразків, $5 < A_{\mu} < 10\%$), тільки 7 зразків мають інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_{μ} вище за 10 %. Ці явища можуть свідчити про те, що в процесі свого формування та перетворення гірські породи свердловини зазнавали неодноразові впливи стискаючих та розтягуючих тектонічних напруг різного напрямку.

При аналізі розрахованих параметрів Томсена (δ , ϵ , γ) для різних продуктивних горизонтів свердловини (Г6, Г7 в, Г7н, Г7нв) авторами з всієї колекції порід виділено дві групи зразків, які чітко поділяються за параметром Томсена δ . На основі графічних побудов $A_{\mu} = f(\delta)$ авторами отримано 2 рівняння з достатньо тісним кореляційним зв'язком ($R^2 \approx 0.9$).

Неврахування анізотропності порід призводить до помилок в результатах інтерпретації сейсмоакустичних даних, а, відповідно, до зменшення ефективності геологорозвідувальних робіт.

Ключові слова: акустична і пружна анізотропія, петрофізичні дослідження, породи-колектори

ANISOTROPY OF ACOUSTIC AND ELASTIC PARAMETERS OF TERRIGENOUS RESERVOIR ROCKS ACCORDING TO THE ULTRASONIC EXPLORATIONS

S.A. Vyzhva¹, I.M. Bezrodna², D.A. Bezrodnyi³, S.A. Popov⁴

Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
E-mail: vyzhvas@gmail.com

Dr. Sci. (Geol), prof., Head of the Department of Geophysics

² *Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,*
E-mail: bezin3@ukr.net

Cand. Sci.(Geol), Assotiate director

³ *Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,*
E-mail: manific2@ukr.net

Cand. Sci.(Geol), Associate prof.

⁴ *Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,*
E-mail: sapopovsa@mail.ru

Cand. Sci.(Geol), Head of laboratory

Authors measured the velocities of quasicompressional wave as well as fast and slow shear waves on 48 cubic samples of borehole core of Runovshchyna area in Dnipro-Donets Basin.

Parameters of the acoustic and elastic anisotropy of the samples in particular parameters of acoustic tensor and ellipsoid; symmetry type and categories of rock structure; Tomsen parameters were defined based on the petrophysical studies.

The vast majority of samples have a transverse isotropic type of texture symmetry (79%), and 10 samples have the rhombic type. Most samples have a planar type of symmetry (17 samples), the smaller part has axial type (16 samples). Studied samples are mostly quasi-isotropic (24 samples, $0 < A_{\mu} < 5\%$) and medium anisotropic (17 samples, $5 < A_{\mu} < 10\%$); only 7 samples have an integral acoustic anisotropy coefficient A_{μ} higher than 10%. These phenomena can indicate that in the process of its formation and transformation, rocks of the well were exposed to repeated influences of compressive and stretching tectonic stresses of different directions.

In the analysis of the calculated Thomsen parameters (δ , ϵ , γ) for the various producing horizons of the well ($\Gamma 6$, $\Gamma 7$ В, $\Gamma 7$ Н, $\Gamma 7$ НВ), the authors have identified two groups of rocks from the collection, which are clearly divided by the Thomsen parameter δ . On the basis of graphic constructions $A_{\mu} = f(\delta)$, the authors obtained 2 equations with a sufficiently close correlation relationship ($R^2 \approx 0.9$).

Failure to take account of the anisotropy of the rocks leads to errors in the results of the interpretation of seismic acoustic data, and, accordingly, to reduction of the exploration work efficiency.

Key words: acoustic and elastic anisotropy, petrophysical studies, reservoir rocks

АНИЗОТРОПИЯ АКУСТИЧЕСКИХ И УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.А. Выжва¹, И.Н. Безродная², Д.А. Безродный³, С.А. Попов⁴

¹ УНИ «Институт геологии» Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина, E-mail: vyzhvas@gmail.com
Доктор геологических наук, профессор, заведующий кафедрой

² УНИ «Институт геологии» Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина, E-mail: E-mail: bezin3@ukr.net
Кандидат геологических наук, заместитель директора

³ УНИ «Институт геологии» Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина, E-mail: manific2@ukr.net
Кандидат геологических наук, доцент

⁴ УНИ «Институт геологии» Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина, E-mail: sapovvsa@mail.ru
Кандидат геологических наук, заведующий лабораторией

Проведено измерение скоростей квазипродольной, а также быстрой и медленной квазипоперечных волн 48 кубических образцов песчаников керна скважин Руновщинской площади ДДВ.

По результатам петрофизических исследований определены параметры акустической и упругой анизотропии коллекции образцов, в частности, параметры акустического тензора и акустического эллипсоида; типы симметрии и категории текстур пород; параметры Томсена.

подавляющее количество образцов имеет поперечно-изотропный тип симметрии текстуры (79 %), а 10 образцов – ромбический. Большинство образцов имеют планальный тип симметрии (17 образцов), меньшая часть – аксиальный (16 образцов). Исследуемые образцы являются преимущественно квазиизотропными (24 образца, $0 < A_{\mu} < 5\%$) и среднеанизотропными (17 образцов, $5 < A_{\mu} < 10\%$), только 7 образцов имеют интегральный коэффициент акустической анизотропии A_{μ} выше 10%. Эти явления могут свидетельствовать о том, что в процессе своего формирования и преобразования горные породы скважины испытывали неоднократные воздействия сжимающих и растягивающих тектонических напряжений разного направления.

При анализе рассчитанных параметров Томсена (δ , ϵ , γ) для различных продуктивных горизонтов скважины (Г6, Г7в, Г7н, Г7нв) авторами из всей коллекции пород выделено две группы образцов, которые четко разделяются по параметру Томсена δ . На основе графических построений $A_{\mu} = f(\delta)$ авторами получено 2 уравнения с достаточно тесными корреляционными связями ($R^2 \approx 0.9$).

Неучет анизотропности пород приводит к ошибкам в результатах интерпретации сейсмоакустических данных, а, соответственно, к уменьшению эффективности геологоразведочных работ.

Ключевые слова: акустическая и упругая анизотропия, петрофизические исследования, породы-коллекторы

Вступ

Протягом останніх років все більше зростає інтерес до вивчення сейсмоакустичної анізотропії земних надр, зокрема, анізотропії пружних властивостей гірських порід. Ці дослідження представляють інтерес для вирішення багатьох проблем фізики Землі, регіональної геології, структурної геології, тектонофізики і геофізики, зокрема, для вирішення проблем пошуків складнопобудованих порід-колекторів нафти і газу.

Проведені багатьма дослідниками (Александров К.С., Безродна І.М., Безродний Д.А., Беліков Б.П., Вижва С.А., Воларович М.П., Баюк Є.І., Горбацевич Ф.Ф., Мілеєв В.С., Продайвода Г.Т., Рижова Т.Ф., Шабанова А.О., Guoxing Liu, Klima K., Lokajicek T., J. D. Maynard, Pros Z., Xinpeng Du, Ji-Cheng Zhao та ін.) ультразвукові дослідження гірських порід показали, що упорядкованість структурних елементів текстур гірських порід спричиняє анізотропію швидкостей різних типів пружних хвиль (Guoxing, Maynard, 2012; Xinpeng, Ji-Cheng, 2017; Александров, Продайвода, 2000; Безродний, Безродна, 2008; Горбацевич, 2002; Продайвода, Вижва, Безродний, Безродна, 2011; Безродна, Безродний, Козіонова, 2017; Tkachov, Prodayvoda, Bezrodniy, 2013). Для її вичерпної характеристики необхідно застосовувати методи, що забезпечують визначення параметрів акустичної і пружної анізотропії гірської породи.

Методика дослідження

Інваріантно-поляризаційний метод (Продайвода, Вижва, Безродний, Безродна, 2011) забезпечує можливість визначення симетрії текстури гірських порід шляхом вимірювання фазових швидкостей різної поляризації мінімально в трьох напрямках зразка у вигляді куба, а в ідеалі – в 9 напрямках на зразках у вигляді куборомбододекаедра. Причому при відсутності апріорної інформації про симетрію текстури гірської породи немає необхідності узгодження напрямків вимірювання швидкостей із просторовим положенням елементів

симетрії. Визначення акустичного тензора гірських порід забезпечує розв'язок задачі розрахунку параметрів акустичної анізотропії пружних хвиль.

За результатами петроакустичних досліджень інваріантно-поляризаційним методом обраховуються параметри акустичної і пружної анізотропії колекції зразків, зокрема:

- параметри акустичного тензора $\mu_{11}, \mu_{22}, \mu_{33}$;
- параметри акустичного еліпсоїда: акустична лінійність L_μ і акустична сланцюватість S_μ ;
- класифікація текстур за симетрією акустичного тензора на сферичну, поперечно-ізотропну і ромбічну;
- класифікація текстур на планальний (сплюснутий) і аксіальний (витягнутий) типи симетрії за співвідношеннями максимального, середнього і мінімального значення акустичного тензора.

Безперечною перевагою інваріантно-поляризаційного методу є можливість кількісної оцінки коефіцієнта акустичної анізотропії на основі розрахованого акустичного тензора (Александров, Продайвода, 2000; Безродний, Безродна, 2008; Продайвода, Вижва, Безродний, Безродна, 2011).

Коефіцієнт акустичної анізотропії зразків порід визначається за формулою:

$$A_\mu = \sqrt{\frac{\frac{1}{3}[(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + (\mu_{11} - \mu_{33})^2 + (\mu_{22} - \mu_{33})^2]}{(\mu_{ii}^2)_c}}}. 100\%, \quad (1)$$

де $(\mu_{ii}^2)_c = \mu_{11}^2 + \mu_{22}^2 + \mu_{33}^2$; а $\mu_{11}, \mu_{22}, \mu_{33}$ - власні значення акустичного тензора.

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= V_{1p}^2 + V_{1s1}^2 + V_{1s2}^2, \\ \mu_{22} &= V_{2p}^2 + V_{2s1}^2 + V_{2s2}^2, \\ \mu_{33} &= V_{3p}^2 + V_{3s1}^2 + V_{3s2}^2, \end{aligned} \quad (2)$$

де V_{1p}, V_{2p}, V_{3p} - швидкості повздовжньої хвилі, які виміряні відповідно вздовж напрямків X, Y, Z; V_{1s1}, V_{1s2} - швидкості поперечної хвилі вздовж напрямку X і поляризацією паралельно площинам XZ і XY відповідно; V_{2s1}, V_{2s2} - швидкості

поперечної хвилі вздовж напрямку Y і поляризацією паралельно площинам YZ і XY відповідно; $V_{3s1} + V_{3s2}$ - швидкості поперечної хвилі вздовж напрямку Z і поляризацією паралельно площинам YZ і XZ відповідно.

На основі параметрів акустичного тензора проводиться аналіз параметрів акустичного еліпсоїда - акустичної лінійності L_μ і акустичної сланцюватості S_μ :

$$L_\mu = \frac{\mu_q}{\mu_m}; \quad S_\mu = \frac{\mu_m}{\mu_p}, \quad (3)$$

де μ_q , μ_m , μ_p – найбільше, проміжне і найменше значення акустичного тензора.

Класифікація текстур на вищу, середню і нижчу категорії здійснюється за симетрією акустичного тензора:

- сферична симетрія, якщо виконується рівність $\langle \mu_{11} \rangle = \langle \mu_{22} \rangle = \langle \mu_{33} \rangle$;
- поперечно-ізотропна симетрія, якщо виконується 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 $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle = \langle \mu_{22} \rangle$;
- ромбічна симетрія, якщо виконується умова $\langle \mu_{11} \rangle \neq \langle \mu_{22} \rangle \neq \langle \mu_{33} \rangle$.

За отриманими за наведеною методикою даними можна провести розрахунок відомих при інтерпретації сейсморозвідки параметрів Томсена (Thomsen, 1986), зокрема:

- δ - відхилення від еліптичності за зміною в вертикальній площині швидкості повздовжньої хвилі. Це так званий ефект малих вилучень - фіксує взаємозв'язок між швидкістю, необхідною для випрямлення годографів на сейсмограмах ЗГТ і середньою швидкістю при нульовому віддаленні, вимірної за допомогою сейсмокаротажу;

- ϵ - відносний коефіцієнт анізотропії по повздовжній хвилі. Це параметр, що зазвичай називають власне «анізотропією гірської породи».

- γ - зміни швидкості поперечної хвилі в залежності від відхилення напрямку від вертикалі, - так званий ефект зсувної хвилі.

Ці параметри можна розрахувати з пружних постійних породи:

$$\epsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}, \quad \gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{(C_{13}+C_{44})^2-(C_{33}-C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33}-C_{44})}.$$

Пружні постійні порід, в свою чергу, можна отримати з вимірювань нами у 3-х напрямках квазіповздовжньої та двох квазіпоперечних хвиль:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \sigma \cdot V_{1p}^2, \quad C_{22} = \sigma \cdot V_{2p}^2, \quad C_{33} = \sigma \cdot V_{3p}^2, \\ C_{44} &= C_{55} = \sigma \cdot V_{1s1}^2, \quad C_{66} = \sigma \cdot V_{1s2}^2, \\ C_{13} &= \left[\frac{(2C_{22}-C_{11}-C_{33}-2C_{44})^2-(C_{11}-C_{33})^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}} - C_{44}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отримані параметри Томсена використовуються в сейсморозвідці при врахуванні різних типів сейсмічної анізотропії: трансверсальної ізотропії з похилою віссю симетрії, трансверсальної ізотропії з горизонтальною віссю симетрії, трансверсальної ізотропії з вертикальною віссю симетрії, орторомбічної анізотропії (Matt Hall, 2015).

Основні результати дослідження

У даній роботі проаналізовано результати досліджень зразків теригенних порід Руновщинської площі, що розташована в межах Дніпровсько-Донецької западини.

Вперше структура даного родовища була виявлена ще у 1954 році. Вона являє собою брахіформне підняття субширотного простягання з асиметричною будовою крил та перекліналей, заповнене мезозойськими відкладами. Нафтогазоносність Руновщинської ділянки, як перспективного об'єкту, на даний час відома тільки у відкладах тріасу.

Власне об'єктом дослідження були породи нижньої пермі (48 зразків), що були відібрані із керна свердловини № 110 (глибина відбору 3145-3283 м) Руновщинської площі. Зразки представлені різнозернистими пісковиками (рис. 1).

Авторами були проведені вимірювання швидкостей квазіповздовжньої, а також швидкої та повільної квазіпоперечних хвиль на 48 зразках пісковиків

акустичної анізотропії A_μ вище за 10 %. Зокрема, середнє значення A_μ складає 6,07 % і змінюється від 1,14 % (зразок 57) до 18,99 % (зразок 141) (рис. 4).

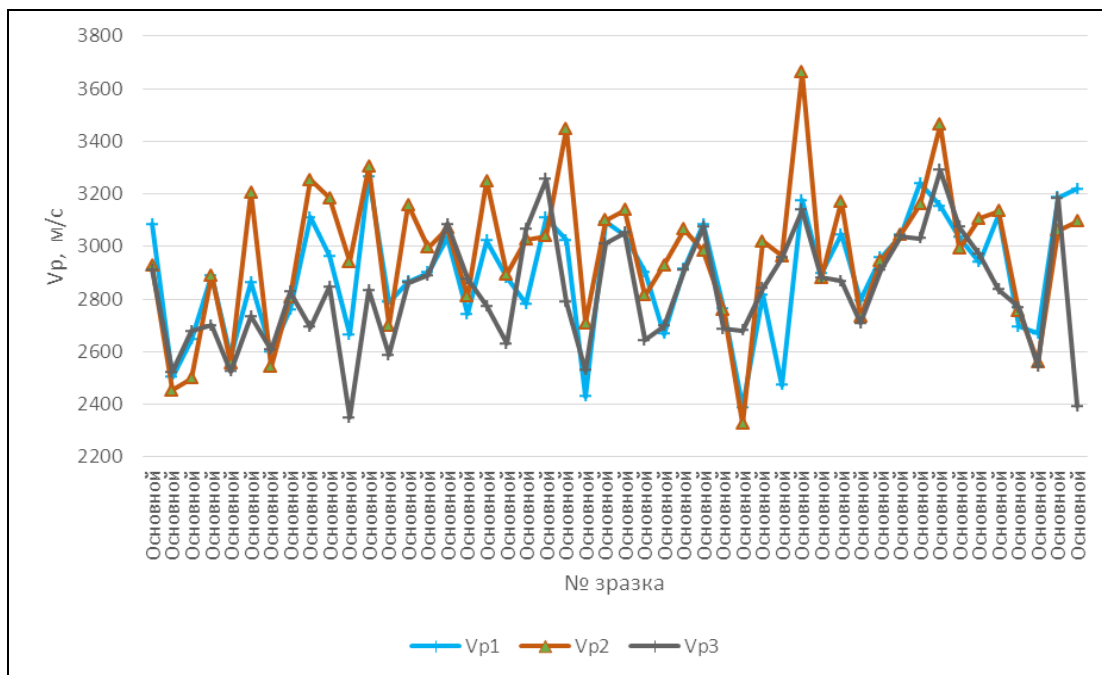


Рис. 2. Швидкість повздовжньої хвилі в досліджених зразках
Fig. 2. The velocity of the longitudinal wave in the samples studied

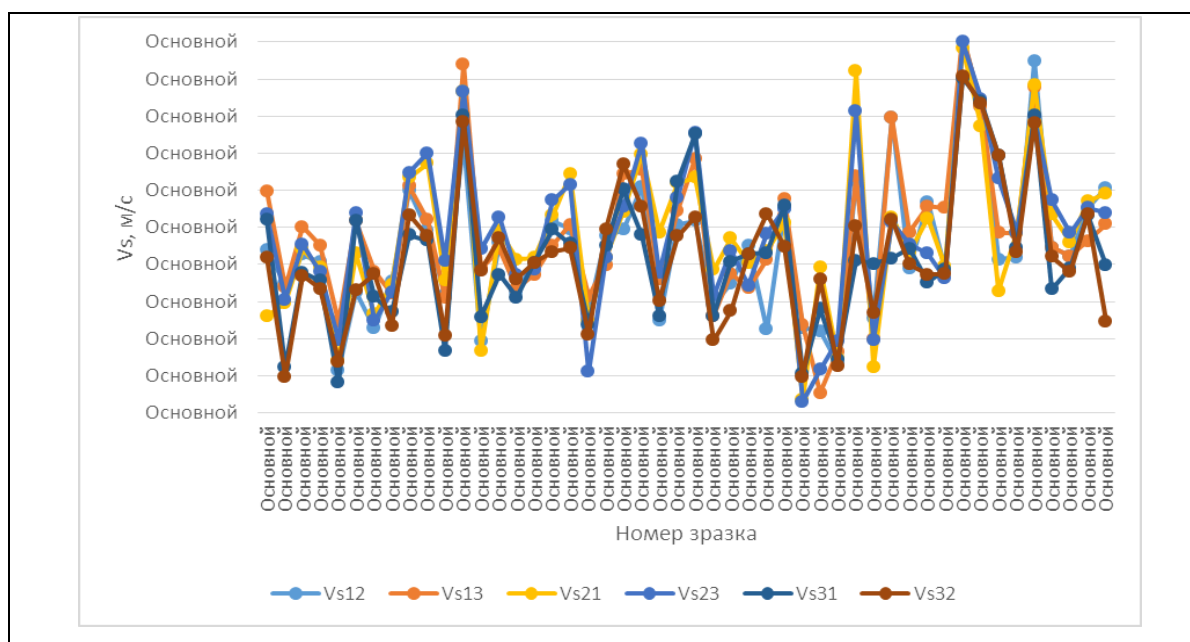


Рис. 3. Швидкості швидких та повільних квазіпоперечних хвиль в досліджених зразках
Fig. 3. The velocities of fast and slow quasi-transverse waves in the investigated samples

Значення коефіцієнта анізотропії, яке отримано в межах 5-10 % може бути викликано:

- наявністю тріщин і витягнутих вторинних пустот;
- мікросланцюватою, мікрошаруватою, смугасто-шаруватою та сланцюватою текстурою порід (як визначено за мікропетрографічним аналізом);
- орієнтованим розташуванням лусочок слюди, мікрошарів, що збагачені та збіднені цементом, наявністю глинистих лінзочок (як визначено під мікроскопом) тощо.

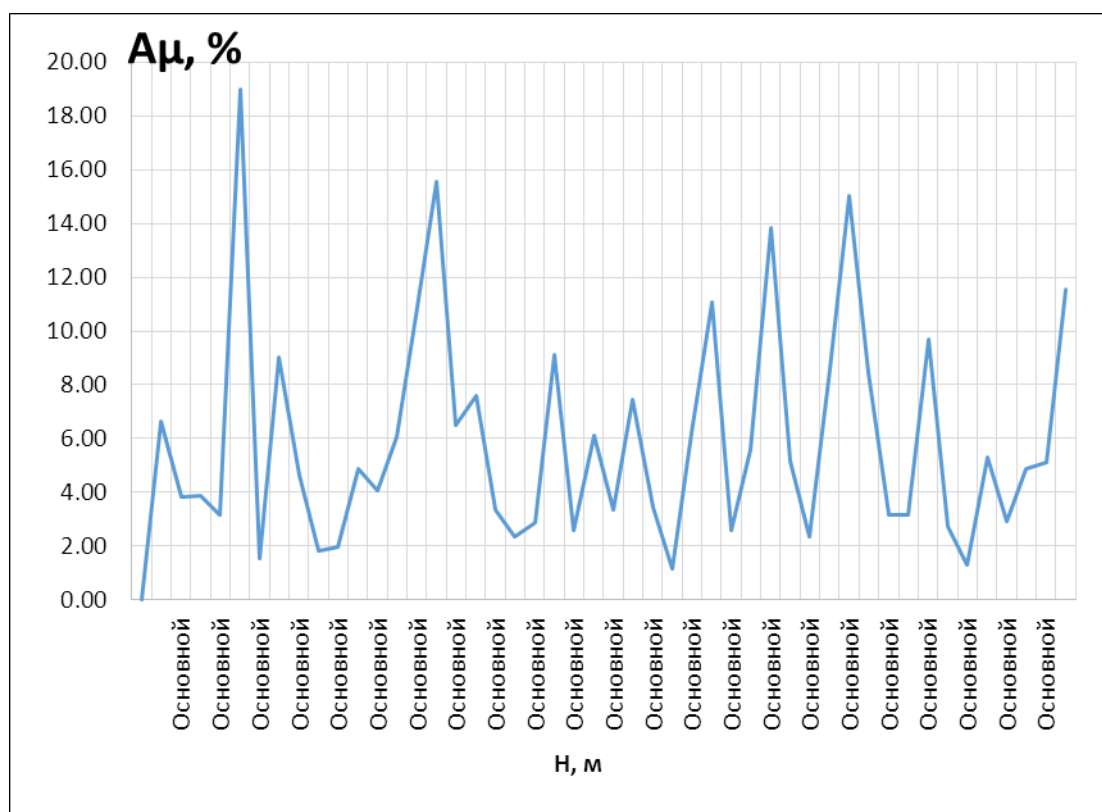


Рис. 4. Акустична анізотропія зразків пісковиків свердловини № 110-Руновщинська

Fig. 4. Acoustic anisotropy of samples of sandstone wells № 110-Runoshchinskaya

Висока анізотропія в зразках може бути викликана багатьма факторами, зокрема:

- однонаправленою або площинною орієнтацією пустот, зокрема, тріщин;

- однонаправленою або площинною орієнтацією мінералів в породах, що підтверджується небагатьма шліфами як орієнтоване розташування слюди, видовжених зерен інших мінералів;

- найбільшу анізотропію викликає одночасна наявність орієнтації мінералів та присутність орієнтованих тріщин в великій їх кількості.

Графік $S_{\mu} = f(L_{\mu})$ характеризує (рис. 5) ступінь упорядкованості елементів текстури породи вздовж окремих напрямків (лінійна орієнтація, тобто акустична лінійність) або вздовж площин (шаруватість, сланцюватість, тобто акустична сланцюватість). Пряма на діаграмі, проведена під кутом 45° до координатних осей, поділяє області планальної й аксіальної симетрії текстур

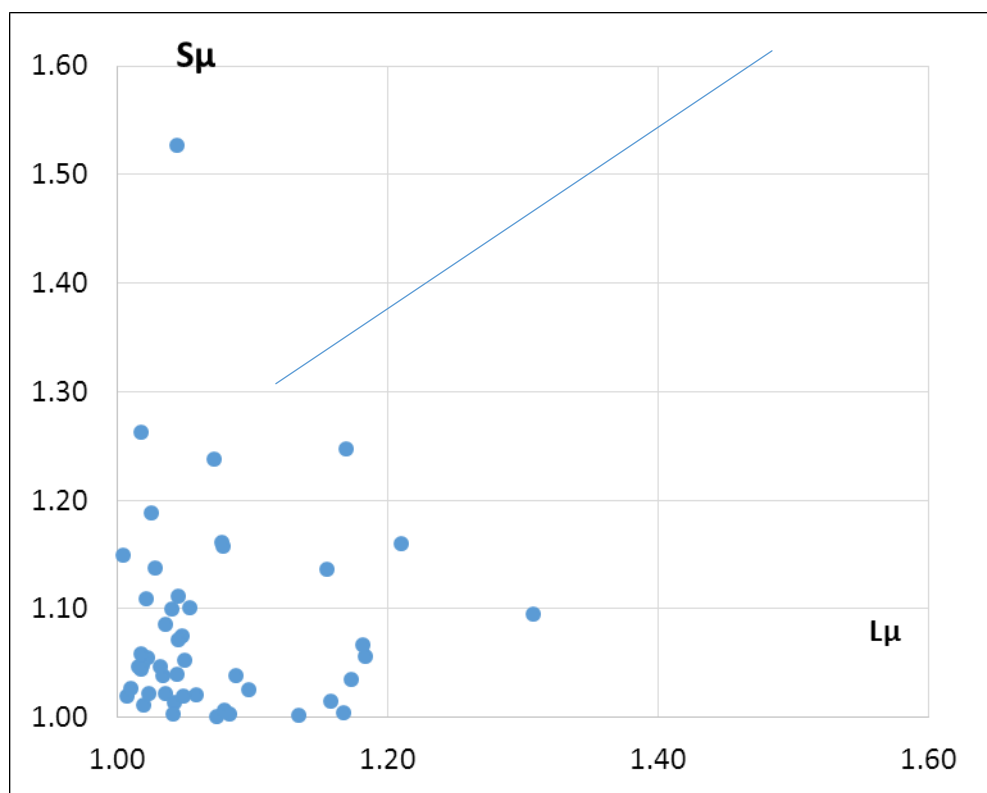


Рис. 5. Діаграма параметрів акустичного еліпсоїда текстур пісковиків свердловини №110-Руновщинська

Fig. 5. Diagram of parameters of acoustic ellipsoid of sandstone textures of wells №110-Runoshchinskaya

порід, тобто поділяє текстури з переважно сланцюватим і лінійним структурним мотивами.

За аналізом взаємозв'язку $S_{\mu} = f(L_{\mu})$ авторами встановлено, що 5 зразків - практично ізотропні ($|S_{\mu} - L_{\mu}| < 0,1$), 11 зразків квазіізотропні ($0,1 < |S_{\mu} - L_{\mu}| < 0,3$). Плानальний тип симетрії за даними параметрів акустичного еліпсоїда (акустичної сланцюватості та лінійності) мають 17 зразків, решта – аксіальний тип симетрії (16 зразків).

Це явище може свідчити про те, що в процесі свого формування та перетворення гірські породи свердловини зазнавали неодноразові впливи тектонічних напруг різного напрямку.

При класифікації текстур на вищу, середню і нижчу категорії було встановлено, що переважна кількість зразків має поперечно-ізотропний тип симетрії текстури (79 %), а ромбічний - 10 зразків. Кубічний тип симетрії текстури в зразках – відсутній, що говорить про те, що досліджені породи зазнавали перетворення після процесів літіфікації.

Наявність симетрії нижчої (ромбічної) категорії може свідчити про наявність стискуючих чи розтягуючих бокових напруг та про неодноразовий вплив термобаричних процесів на ці зразки. Авторами виділено шість інтервалів свердловини, де за петроакустичними даними встановлено вторинні термобаричні процеси: 3252.5-3153.8 м, 3156-3157 м, 3222.2-3225.8 м, 3263.5-3266.4 м, 3267-3272.9 м, 3314.9-3315.3 м.

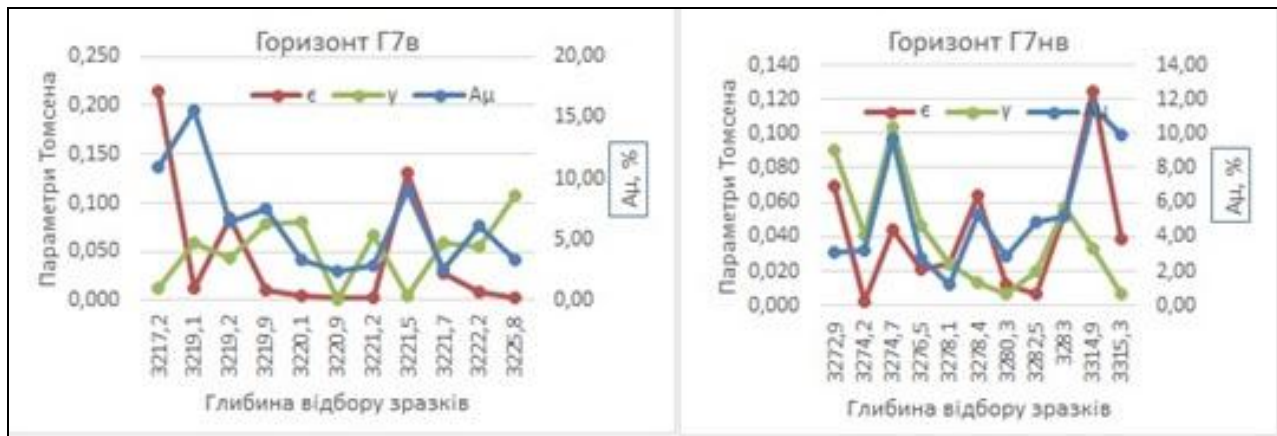
В дослідженому інтервалі свердловини авторами за наведеними формулами (4) розраховані параметри Томсена (δ , ε , γ) для різних продуктивних горизонтів свердловини, зокрема, для Г6, Г7 в, Г7н, Г7нв.

При статистичному аналізі визначених параметрів Томсена і інтегрального акустичного коефіцієнта анізотропії A_{μ} авторами досліджено їх кореляційні залежності. За аналізом з всієї вибірки порід виділено дві групи порід-пісковиків, які чітко поділяються за параметром δ (відхилення від еліптичності за зміною в вертикальній площині швидкості повздовжньої хвилі). На основі

графічних побудов $A_{\mu} = f(\delta)$ авторами отримані кореляційні рівняння (рис. 6,7) з дуже тісною кореляцією близькою до 90:

1 вибірка порід: $A_{\mu} = 0,0859 \delta - 0,1196$ ($R^2 = 0,8927$),

2 вибірка порід: $A_{\mu} = 0,0739 \delta - 0,3504$ ($R^2 = 0,9053$).



а

б

Рис. 6. Графіки залежностей параметрів Томсена та інтегрального акустичного коефіцієнта анізотропії для зразків продуктивних горизонтів Руновщинської площі; а – горизонт Г7в, б – горизонт Г7нв

Fig. 6. Characteristics of the dependences of the Thomsen parameters and the integral acoustic coefficient of anisotropy for samples of productive horizons of the Runovshchynskaya Square; а – horizon G7v, б – horizon G7nv

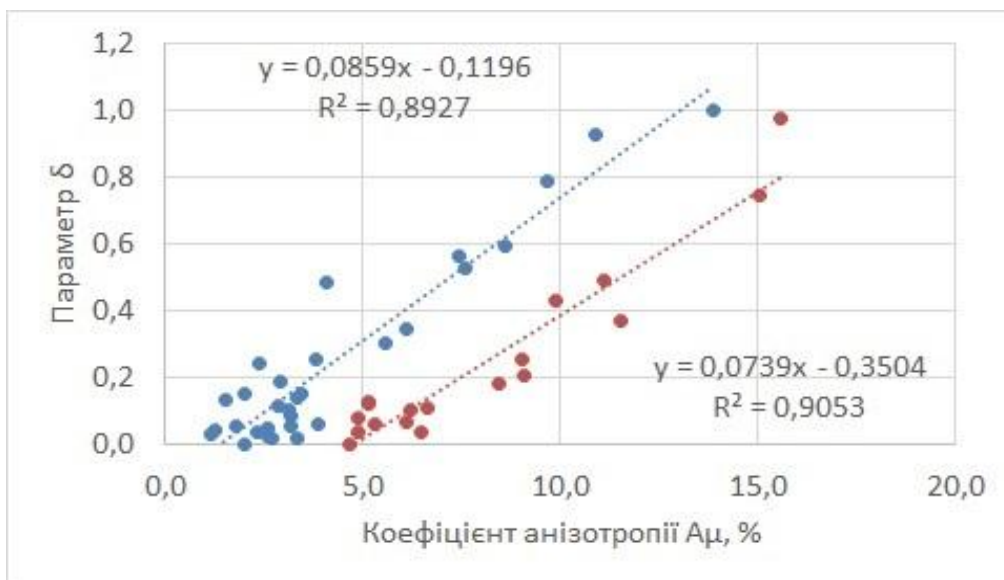


Рис. 7. Кореляційний аналіз зв'язку між параметром Томсена delta (ефектом малих вилучень) та інтегральним акустичним коефіцієнтом анізотропії

Fig. 7. Correlation analysis of the connection between the Thomsen parameter delta (small deletion effect) and the integral acoustic coefficient of anisotropy

Висновки

Таким чином, авторами проведені дослідження з вивчення параметрів акустичної і пружної анізотропії на основі експериментальних ультразвукових досліджень колекції зразків свердловини № 110 Руновщинської площі.

На основі визначення типів симетрії зразків порід встановлено наявність переважно планального поперечно-ізотропного типу симетрії їх текстури, що свідчить про їх формування в умовах вертикального літостатичного тиску. Для окремих зразків за акустичними даними встановлений ромбічний тип симетрії текстури, виділено шість інтервалів свердловини. Це може свідчити про наявність процесів неодноразового стиснення-розуцільнення порід.

Авторами розраховані параметри Томсена (δ , ϵ , γ) для різних продуктивних горизонтів свердловини, зокрема, для Г6, Г7 в, Г7н, Г7нв. За статистичним аналізом з всієї вибірки порід виділено дві групи порід-пісковиків, які чітко поділяються за параметром Томсена δ . На основі графічних побудов $A_{\mu} = f(\delta)$ авторами отримано 2 кореляційні рівняння з дуже тісною кореляцією близькою до 90.

Наявність акустичної анізотропії в досліджених породах вказує на існування в них упорядкованості різноманітної фізичної природи. Типи упорядкованості визначаються складом та механізмом деформації і тектонічним режимом формування гірських порід.

Отримані авторами результати можна вважати унікальним джерелом інформації про палеотектонічні режими та умови формування досліджених пластів, які є перспективними на пошуки нафти і газу, а також використати при врахуванні акустичної анізотропії при інтерпретації даних сейсмозвідки на Руновщинській площі.

В подальших дослідженнях авторів планується провести порівняння результатів моделювання впливу типів пустот та мінерального складу на параметри пружної анізотропії з результатами, що отримані за петрофізичними

дослідженнями, а також більш глибоко дослідити природу взаємозв'язку параметрів анізотропії та параметрів Томсена.

Список літератури

1. Guoxing Liu, Maynard J.D. 2012. Measuring elastic constants of arbitrarily shaped samples using resonant ultrasound spectroscopy. *The Journal of the Acoustical Society of America* 131, 2068; <http://doi.org/10.1121/1.3677259>
2. Xinpeng Du, Ji-Cheng Zhao. 2017. Facile measurement of single-crystal elastic constants from polycrystalline samples *Computational Materials* 17. doi:10.1038/s41524-017-0019-x
3. Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск: Изд.-во СО РАН, 2000. – 354 с.
4. Безродний Д.А., Безродна І.М. Математичне моделювання впливу кристалографічної орієнтації мінералів та мікротріщин на параметри пружної і акустичної анізотропії // Вісник Київськ. ун-ту. Геологія. – 2008. – № 45. – С. 49-52.
5. Горбацевич Ф.Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. – Кольский научный центр РАН, ГИ, Апатиты, 2002. – 152 с.
6. Продайвода Г.Т., Вижва С.А., Безродний Д.А., Безродна І.М. Акустичний текстурний аналіз метаморфічних порід Криворіжжя. Київ: ВПЦ «Київ. Ун-т», 2011. – 368 с.
7. Безродна І., Безродний Д., Козіонова О. Аналіз впливу мінерального скелету порід-колекторів Руновщинської площі на пружні та акустичні параметри (за результатами математичного моделювання) // Вісник Київськ. ун-ту. Геологія. – 2017. – № 77. – С. 52-58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.06>
8. Tkachov L., Prodayvoda G., Bezrodniy D. Anisotropy of the phase velocities and polarization of elastic waves in anisotropic geological environment /2th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, GeoInformatics 2013; Kiev; Ukraine; 13 May 2013 до 16 May 2013; Код 103374
9. Thomsen L. 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics* 51 (10). 1954–1966. doi:10.1190/1.1442051.
10. Matt Hall. 2015. What is anisotropy? // <https://agilescientific.com/blog/2015/2/9/what-is-anisotropy>.

References

1. Guoxing Liu, Maynard J.D. 2012. Measuring elastic constants of arbitrarily shaped samples using resonant ultrasound spectroscopy. *The Journal of the Acoustical Society of America* 131, 2068. <http://doi.org/10.1121/1.3677259>
2. Xinpeng Du, Ji-Cheng Zhao. 2017. Facile measurement of single-crystal elastic constants from polycrystalline samples *Computational Materials* 17. doi:10.1038/s41524-017-0019-x
3. Aleksandrov, K.S., Prodaivoda, G.T. 2000. Anisotropy of elastic properties of minerals and rocks. Novosibirsk. SO RAN, 354 p. (in Russian).
4. Bezrodnyi D.A., Bezrodna I.M. 2008. Mathematical design of influence of crystallography orientation of minerals and microcracks on the parameters of resilient and acoustic anisotropy. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 45. P.49-52. (in Ukrainian).
5. Gorbatsevich F.F. 2002. Acoustopolariscopy of rock-forming minerals and crystalline rocks. Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, GI, Apatity. 152 p. (in Russian).
6. Prodayvoda G.T., Vizhva S.A., Bezrodnyi D.A., Bezrodna I.M. 2011. Acoustical texture analysis of metamorphic rocks Krivorizhzhya. Kiev: VPC “Kiev. Un-t”. 368 p. (in Russian).

7. Bezrodna I., Bezrodnyi D., Kozionova O. 2017. Analysis of impact of mineral matrix of Runovshchinska area reservoir rocks on the elastic and acoustic parameters (based on the results of mathematical modelling). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 77. 52-58. (in Ukrainian). <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.06>
8. Tkachov L., Prodayvoda G., Bezrodniy D. Anisotropy of the phase velocities and polarization of elastic waves in anisotropic geological environment/2th International Conference on Geoinformatics. Theoretical and Applied Aspects, GeoInformatics 2013. Kiev. Ukraine. 13 May 2013 до 16 May 2013. Код 103374
9. Thomsen L. 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics* 51 (10).1954–1966. doi:10.1190/1.1442051.
10. Matt Hall. 2015. What is anisotropy? <https://agilescientific.com/blog/2015/2/9/what-is-anisotropy>.