УДК 550.8.014+550.8.053

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.06>

І. Безродна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: bezin3@ukr.net;

В. Свистов, асп.,

E-mail: wladsvyst@ukr.net;

Д. Безродний, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: manific2@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ АКУСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ПІРОКСЕН-МАГНЕТИТОВИХ ПОРІД ПІЩАНСЬКОЇ СТРУКТУРИ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Виживою)**Подано аналіз результатів дослідження акустичних властивостей порід Піщанської залізорудної структури.**Метою роботи є встановлення особливостей розподілу акустичних властивостей та параметрів акустичної анізотропії в зразках порід керна, відібраного зі свердловини № 3 Піщанської структури для визначення природи її виникнення.**Вибірка із 35 зразків з інтервалу глибин 144–273 м розділена на 3 групи порід, а саме: магнетит-піроксенові, кварц-магнетит-піроксенові та біотит-амфіболові кристалічні сланці.**Здійснено ряд петроакустичних лабораторних вимірювань на зразках порід у формі куборомбододаєдра з використанням інваріантно-поляризаційного методу. Значення вимірюваних фазових швидкостей "квазіпоздовжньої" та двох "квазіпоперечних" хвиль ще на етапі вимірювань показали суттєву акустичну анізотропію порід. Діапазони вимірюваних швидкостей зразків колекції становлять 7661 ÷ 5046 м/с для поздовжніх хвиль і 4232 ÷ 2648 м/с для поперечних. Різниця значень вимірюваних для кожної із пар граней куборомбододаєдра становить від 100 до 800 м/с для V_p та від 0 до 500 м/с – для V_s .**Розраховано параметри акустичного еліпсоїда, за співвідношеннями яких здійснено поділ зразків на три основні групи за акустичною текстурою: акустично лінійна, сланцювата та ромбічна.**Проведено аналіз коефіцієнтів анізотропії за результатами вимірювання швидкостей хвиль: поздовжньої та відносної акустичної анізотропії. Більшості зразків притаманний низький або середній рівень акустичної анізотропії (від 2 до 7 %). Виокремлено групу високоанізотропних порід (11–14 %), що представлені зразками біотит-амфіболових кристалосланців.**За параметрами акустичного тензора більшості зразків притаманний поперечно-ізотропний тип симетрії, що властивий зразкам з інтервалів глибин 174–220 м та 222–232 м, меншій частині – ромбічний. Розбіжності за параметрами анізотропії зразків можна пояснити суттєвою неоднорідністю їхніх текстур, а саме: мікротріщинами, мінералами різного розміру, форми та орієнтації.**Результати досліджень показують, що акустичні властивості зразків відрізняються вздовж інтервалу глибин, що досліджувався. Це пов'язано з різним мінералогічним складом порід, а також свідчить про складні умови утворення порід на різних глибинах і присутність різних типів деформацій, що супроводжували формування Піщанської структури.**Ключові слова: акустична анізотропія, текстура, симетрія, тензор.*

Вступ. Дослідження швидкісних властивостей гірських порід і подальший аналіз природи акустичної анізотропії в різних генетичних типах гірських порід дозволяє встановити причини виникнення явищ неоднорідності фізичних властивостей. Такими чинниками можуть бути мінеральний склад, кристалографічна орієнтація зерен мінералів, форма та орієнтація мікротріщин і пор, тонка шаруватість, напружений стан, вплив на середовище фізичних полів та ін. Саме глибоке дослідження цієї проблематики і подальше вдосконалення апаратури та методики вимірювання акустичної анізотропії відкриває великі можливості для визначення внутрішньої будови гірських порід, встановлення геологічних чинників, що сприяли їхньому формуванню.

Стан проблеми. Протягом усієї історії досліджень анізотропії швидкісних властивостей гірських порід розроблено низку підходів і значну методологічну базу їхньої детермінації, подальшого аналізу та пояснення кристалічної, тектонічної й літологічної причин виникнення даного явища. Дослідження акустичної анізотропії нерозривно пов'язані з пружною анізотропією, що і знаходить своє відображення в особливостях методів. Дослідженням та розробкою теоретичних на методологічних аспектів вивчення акустичних властивостей гірських порід займалися такі вчені, як К.С. Александров, В. Бабушка, І.М. Безродна, Д.А. Безродний, Т.В. Берч, С.А. Вижива, Ф.Ф. Горбачевич, Г. Керн, Т. Локайчек, Г.Т. Продайвода, З. Прос, Ф. Рижова, Т. Світек, Є.Б. Черепецька та ін.

Більшість методів мають спільне підґрунтя та базуються на тензорному аналізі акустичних параметрів. Вибір апаратури та методології досліджень залежить від поставлених завдань та особливостей об'єкта вивчення, зокрема, достатня кількість матеріалів, наявність апріорної інформа-

ції тощо (Александров і Продайвода, 2000). Отже, тому основні методи дослідження можна розділити за кількома характеристиками, а саме – за типом хвиль, що досліджуються, за різним рівнем вивчення акустичної анізотропії та набором компонентів, що визначаються.

Зокрема, метод сфер (Pros and Babuska, 1967), що на момент свого започаткування дозволяв визначати лише розподіл поздовжніх хвиль у зразках, нині продовжує розвиватись і вдосконалюватись. Останні модифікації дозволяють детально оцінити анізотропію пружних хвиль за рахунок вимірювання 3D розподілу квазіпоздовжніх і квазіпоперечних хвиль у зразках за 132 напрямками. Ще однією перевагою даного методу є можливість здійснення досліджень параметрів акустичної анізотропії в умовах гідростатичного тиску. Так, у роботах (Lokajček et al, 2014; Svitek et al, 2014) наведено результати комбінованого вивчення неоднорідностей гірських порід з додатковим застосуванням термоакустичної установки (Kern et al, 1997), а також методу нейтронної дифракції (Соболев и Никитин, 2001).

Акустополіризаційний метод (Горбачевич, 2002) широко використовується для визначення анізотропії акустичних властивостей матеріалів, кількості та орієнтації елементів пружної симетрії, проте також дозволяє встановлювати лінійну акустичну анізотропію поглинання та загальну оцінку неоднорідностей зразків гірських порід. Ще однією особливістю даного методу є можливість встановлення окремо узагальнених коефіцієнтів анізотропії поздовжніх та поперечних хвиль (Тришина та ін. 2007; Горбачевич та ін, 2017; Ковалевский та ін. 2012). Проте здійснення вимірів тільки у трьох основних напрямках робить оцінку акустичних властивостей досить приблизною.

Існує також низка методів, що застосовуються в методах неруйнівного контролю матеріалів (дефектоскопія)

і дозволяють установлювати неоднорідності розподілу фізичних властивостей гірських порід і мінералів (Grishchenko et al., 2017). На думку авторів, варто виокремити метод лазерної ультразвукової стереоскопії, що дозволяє здійснювати оцінку анізотропії гірських порід через функції частотних залежностей коефіцієнта затухання та швидкостей пружних хвиль для трьох взаємно перпендикулярних напрямків. Проте даний метод більше підходить для дрібнозернистих порід, оскільки існує низка вимог до співвідношень довжини хвилі, геометричних розмірів зерен мінералів: адже точність вимірів у цьому методі сильно залежить від можливого розсіювання сигналу від бокових стінок зразка та неоднорідностей (Черепецкая, 2005; Лысенко, 2013).

Досить часто при проведенні досліджень пружних та акустичних властивостей як суміжний метод оцінки текстур гірських порід та їхньої акустичної анізотропії застосовують нейтронну дифракцію (Іванкіна та ін., 2004; Іванкіна et al., 2005). Даний метод характеризується високою проникністю нейтронного потоку та низькою абсорбцією нейтронів для більшості елементів, що дає змогу отримувати значення високої точності.

Значно детальнішим та інформативнішим є інваріантно-поляризаційний метод (Александров та Продайвода, 2000; Продайвода та ін., 2011), який дозволяє за відсутності апріорної інформації про симетрію гірської породи та за довільної орієнтації лабораторної системи координат детально встановити просторовий розподіл акустичних властивостей і оцінити середньоквадратичний коефіцієнт акустичної анізотропії та її інші параметри, що розраховуються за результатами визначення квазіпоздовжніх і двох квазіпоперечних фазових швидкостей у дев'яти напрямках. Даний метод застосовується як для досліджень осадових (Вижева та ін., 2018), так і для кристалічних порід (Безродний та ін., 2014).

Метою роботи є встановлення особливостей розподілу акустичних властивостей та параметрів акустичної анізотропії в зразках порід керна, відібраного зі свердловини № 3 Піщанської структури для визначення природи її утворення.

Опис об'єкта досліджень. У даній роботі проведено аналіз 35 зразків керна піроксен-магнетитових кристалосланців відібраних зі свердловини № 3 Піщанської структури в інтервалі глибин 144–273 м.

Піщанська структура розташована на північній околиці с. Піщане Балтського району Одеської області. Даний геологічний об'єкт внесений до списку геофізичних феноменів України. За результатами попередніх досліджень прогнозні ресурси магнетитових руд до відміток 500 м становлять близько 100 млн т, а за результатами технологічних випробувань встановлено, що з даних руд можна отримати металізовані окатиші (88,8 % вмісту заліза), що йдуть на виготовлення високоякісних марок сталі (Ентін, 2012).

На основі петрографічного опису виготовлених у ННІ "Інститут геології" 25 шліфів основних петрографічних різновидів порід, авторами проведено аналіз їхнього мінералогічного складу та структурно-текстурних особливостей. За петрографічними даними колекція зразків була поділена на три групи, зокрема:

1. Магнетит-піроксенів кристалічні сланці (19 зразків: ПС-7, ПС-13 – ПС-23, ПС-29 – ПС-35). Група порід складена, в основному, мінералами піроксену (60–91 %) та магнетиту (7–40 %), з незначними вкрапленнями кварцу та плагіоклазу (до 2 %). Текстури шліфів порід переважно однорідні та смугасто шаруваті, у трьох зразків – брекчієподібні. Структура зразків кристалозерниста, дрібно- та середньозерниста, окремі зразки є різнозернистими.

Розмір зерен змінюється від 0,15 до 6 мм, а форма – від ізометричної до сильно видовженої.

2. Кварц-магнетит-піроксенів кристалічні сланці (12 зразків: ПС-2 – ПС-3, ПС-5, ПС-8 – ПС-9, ПС-11, ПС-12, ПС-24 – ПС-28). Породи складені піроксеном (29–86 %), магнетитом (10–27 %) та зернами кварцу/плагіоклазу (1–57 %). Текстура більшості зразків сланцювата, смугасто-сланцювата, у двох шліфах – брекчієподібна та однорідна. У структурному плані переважають різнозернисті зразки, також зустрічається дрібно-середньозернисті структури із зернами 0,1–5 мм.

3. Біотит-амфіболові кристалічні сланці (чотири зразки: ПС-1, ПС-4, ПС-6, ПС-10). Для даної групи притаманна лінійно-сланцювата текстура та середня зернистість з розмірами зерен від 0,35 до 1,9 мм, із вмістом амфіболу та біотиту від 37 до 63 % та кварцу з плагіоклазом від 36 до 63 %, з незначним вмістом магнетиту, графіту, титаніту та апатиту (до 4 % загалом).

Проведені попередні петромагнітні дослідження колекції зразків (Bezrodnyi et al., 2018) дозволили припустити, що структура магнетиту в породах не є однорідною, його зерна в породи містять певну кількість гематиту; дані дозволяють стверджувати про наявність частки маґеміту, яка становить у середньому від 2–3 % до понад 10 %.

Методика. Авторами в петрофізичній лабораторії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка за допомогою ультразвукової установки "Керн-4" були проведені лабораторні вимірювання швидкостей пружних хвиль зразків. На основі методики інваріантно-поляризаційного метода (Продайвода та ін., 2011) зразки, що мають форму кубоборомбододекаєдрів, досліджувалися в дев'яти напрямках, в яких були виміряні фазові швидкості трьох пружних хвиль (квазіпоздовжньої, "швидкої" й "повільної" квазіпоперечних хвиль). За результатами вимірювань зразків проведено кількісну оцінку їхньої акустичної анізотропії, здійснено аналіз і порівняння отриманих даних.

На основі вимірюваних швидкостей квазіпоздовжньої та квазіпоперечних хвиль були розраховані (Продайвода та ін., 2011):

- параметри акустичного тензора μ_{ij} , що визначається з величин швидкостей пружних хвиль;
- коефіцієнт відносної середньоквадратичної акустичної анізотропії (A_μ):

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

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

- параметри акустичного еліпсоїду: акустична лінійність $L_a = \mu_0 / \mu_m$ та акустична сланцюватість $S_a = \mu_m / \mu_p$ (тут μ_0, μ_m, μ_p – відповідно найбільше, проміжне та найменше власні значення акустичного тензора).

Класифікацію текстур здійснено за симетрією акустичного тензора μ_{ij} (Продайвода та ін., 2011):

- сферична симетрія, якщо виконується рівність $\mu_{11} = \mu_{22} = \mu_{33}$;
- поперечно-ізоотропна симетрія, якщо виконується одна з умов $\mu_{11} \neq \mu_{22} = \mu_{33}$; або $\mu_{11} = \mu_{22} \neq \mu_{33}$; або $\mu_{11} \neq \mu_{33} = \mu_{22}$;
- ромбічна симетрія, якщо виконується умова $\mu_{11} \neq \mu_{22} \neq \mu_{33}$.

Окремо здійснено спробу порівняння визначення коефіцієнтів акустичної анізотропії за методикою інваріантно-поляризаційного та акустополіризаційного методів. Зокрема, останній метод передбачає розрахунок

двох коефіцієнтів анізотропії на основі результатів вивчення швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, виміряних на зразках кубічної форми у трьох напрямках.

Коефіцієнт анізотропії поздовжніх хвиль розраховувався за формулою (Горбачевич, 2002)

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \sqrt{(V_1 - V_{cp})^2 + (V_2 - V_{cp})^2 + (V_3 - V_{cp})^2},$$

де $V_{cp} = (V_1 + V_2 + V_3)/3$, а V_1, V_2, V_3 – швидкості розповсюдження поздовжніх коливань, що виміряні за трьома основними гранями зразків.

Результати. На основі наявних матеріалів і спираючись на методику інваріантно-поляризаційного та акустополаризаційного методів, авторами було досліджено та проаналізовано ряд акустичних параметрів зразків, зокрема і параметрів акустичної анізотропії.

Яскраво виражена неоднорідність порід проявилась ще на етапі ультразвукових досліджень. Установлено, що значення швидкостей пружних хвиль змінюються залежно від мінерального складу та структурно-текстурних

особливостей порід: максимальні значення швидкості поздовжньої хвилі становлять 7661 м/с, мінімальні – 5046 м/с, швидкості поперечної хвилі – відповідно 4232 м/с та 2648 м/с.

Для аналізу зміни швидкостей пружних хвиль у зразках було проведено усереднення даних за дев'ятьма напрямками. На рис. 1 наведено розподіл усереднених швидкостей хвиль (квазіпоздовжньої та двох квазіпоперечних).

Загалом, для кожного із зразків притаманні суттєві розбіжності у величині швидкостей хвиль, виміряних на кожній із дев'яти граней зразків. Діапазон зміни значень швидкостей поздовжніх хвиль (ΔV_p) між напрямками вимірювання змінюється від 100 до 800 м/с та від 0 до 500 м/с – для швидкостей поперечних хвиль (ΔV_s). Така суттєва різниця пов'язана, на думку авторів, як з текстурними, так і зі структурними особливостями кожного зі зразків, а також їхнім мінеральним складом. Так, більшість зразків мають сланцювату та смугасто-сланцювату текстуру із частим чергуванням прошарків з різним розміром мінеральних зерен.

Рис. 1. Усереднені значення вимірюваних швидкостей пружних хвиль у зразках

Слід зазначити, що великий діапазон вмісту магнетиту в породах (від 0 до 40 %) слабо корелюється ($R^2 = 0,453$) із середньозваженими швидкостями акустичних хвиль.

За значеннями швидкостей пружних хвиль авторами розраховано параметри акустичного тензора зразків μ_{ij} . Дані параметри дають можливість установити типи акустичної симетрії зразків. Аналіз розрахованих параметрів акустичного тензора показав (рис. 2), що більшість зразків

(23) мають поперечно-ізоотропний тип симетрії. Даний тип симетрії притаманний більшості зразків групи кварц-магнетит-піроксенових кристалосланців, а також частині магнетит-піроксенових пісковиків, найбільше вона виявляється у частині зразків з інтервалів глибин 175–227 м та 268–271 м (ПС-30 – ПС-32). Це пояснюється їхньою сланцюватою та смугасто-сланцюватою текстурами, зокрема наявністю чітко виражених груп видовжених зерен мінералів з виразною орієнтацією в певних напрямках.

Рис. 2. Аналіз параметрів акустичного тензора зразків та їхніх типів симетрії

Ромбічний тип симетрії мають біотит-амфіболові та третина магнетит-піроксенових кристалосланців і лише два зразки (ПС-2 та ПС-27) кварц-магнетит-піроксенових кристалосланців. Зокрема, зразки ПС-2 та ПС-27 хоч і мають нечітко виражену смугасто-сланцювату текстуру, проте їхні прошарки суттєво різняться за мінеральним складом і розміром зерен. Наявність ромбічного типу симетрії говорить про суттєву структурну неоднорідність зразків, що підтверджується петрографічними даними (наявність зерен різної форми та розміру: від дрібнозернистих до крупнозернистих).

Деякі інтервали свердловини характеризуються чергуванням обох типів симетрії зразків, що можна пояснити складними тектонічними умовами, спричиненими чергуванням різнобічних термодинамічних умов. Цей факт характеризує складні умови утворення порід і дещо різні їхні деформаційні перетворення на різних глибинах. Проте більша частина зразків Піщанської структури сформована при переважанні однобічного тиску.

Структурно-текстурні особливості знайшли своє відображення і в розрахованих параметрах акустичного еліпсоїда. При порівнянні значень S_μ та L_μ ($\Delta_\mu = |S_\mu - L_\mu|$) установлено, що найбільші їхні розбіжності притаманні групі біотит-амфіболових сланців і варіюються вони від 0,75 до 0,108. Подібне значення Δ_μ має і магнетит-піроксеновий кристалосланець ПС-22 (0,83). Зразки ПС-7-9, ПС-25 та ПС-30, що належать до різних петрографічних груп, характеризуються Δ_μ близько 0,05. Для решти зразків значення Δ_μ становлять менше 0,04.

Отримані значення S_μ та L_μ дають можливість розділити досліджені зразки на чотири групи. При аналізі графіку залежності $L_\mu = f(S_\mu)$ (рис. 3) частина точок розташована вище бісектриси – такі зразки мають аксіальну текстуру. Частина, що нижче – планальну. Окремо є значення $L_\mu = f(S_\mu)$, що розташовані близько до бісектриси чи на ній – таким зразкам притаманна ромбічна текстура.

Спираючись на розподіл швидкостей у зразках, було розраховано коефіцієнти акустичної анізотропії за двома методиками (рис. 4).

Рис. 3. Розподіл зразків за параметрами акустичного еліпсоїда

Рис. 4. Співвідношення коефіцієнтів акустичної анізотропії

Діапазон зміни величин інтегрального акустичного середньоквадратичного коефіцієнта анізотропії становить 2–14 %. На основі цих даних нами виділено три групи зразків:

- низькоанізотропні, де $A_\mu < 5\%$;
- середньоанізотропні, де $5\% < A_\mu < 10\%$;
- високоанізотропні, де $A_\mu > 10\%$.

Серед трьох петрографічних груп зразків, біотит-амфіболові кристалосланці є повністю високоанізотропними, інші дві групи мають величину коефіцієнта анізотропії від 1 до 7 %, що характеризує їх як низько- та середньоанізотропні. Попри те, що за аналізом шліфів у групі біотит-амфіболових сланців чітко вираженої структурно-текстурної анізотропії не спостерігається, за результатами петроакустичних досліджень анізотропія в ній є дуже високою. Це може бути ознакою того, що шліфи були зроблені у площині сланцюватості порід.

Здійснено розрахунок коефіцієнтів анізотропії поздовжніх хвиль (рис. 4). За результатами аналізу встановлено, що їхній діапазон зміни значно більший (4–22 %), ніж акустичного середньоквадратичного коефіцієнта анізотропії (2–14 %).

Слід відмітити, що для більшості зразків простежується кореляція між цими двома показниками, але є й такі, де спостерігаються суттєві розбіжності (зразки ПС-11, ПС-14 та ПС-30), що говорить про суттєву анізотропію поперечних хвиль, величини яких використовуються при розрахунку середньоквадратичного коефіцієнта.

Висновки. Проведені авторами дослідження акустичних властивостей порід Піщанської залізородної структури та аналіз розрахованих параметрів акустичної анізотропії дозволили зробити низку висновків.

Петроакустичні дослідження показали досить суттєву різницю (до 800 м/с) між швидкостями, що вимірювались за різними напрямками одного і того ж зразка

(9 граней). Це обумовлено як мінеральним складом порід, так і їхнім структурно-текстурними особливостями.

На основі вимірювань швидкостей пружних хвиль, авторами було розраховано коефіцієнти акустичної анізотропії, за величиною яких породи були розподілені на три групи. Розраховані за акустополаризаційним методом коефіцієнти анізотропії поздовжніх хвиль показали досить високу кореляцію з величиною інтегрального акустичного коефіцієнта анізотропії.

На основі аналізу отриманих даних до слабо- та середньоанізотропних груп автори відносять більшу частину зразків (31) зі значенням коефіцієнта анізотропії (A_{μ}) від 2 до 7 %. Більшість цих порід є сланцюватими та смугасто-сланцюватими. Особливо виділяються біотит-амфіболові кристалосланці, що є високоанізотропними породами ($A_{\mu} = 10 \pm 14$ %).

Здійснено поділ зразків за параметрами акустичного еліпсоїда. Виділено зразки з планальною, аксіальною, ромбічною текстурами. Щодо акустичної текстури, то на основі розрахованих параметрів акустичного тензора встановлено, що 75 % зразків мають поперечно-ізотропну текстуру, решта – ромбічну. За акустичною текстурою виділено три інтервали глибин свердловини, що сформовані в умовах однобічного тиску. Решта інтервалів свердловини характеризується частим чергуванням пластів, які зазнали різнобічних термодинамічних впливів, що вказує на суттєві зміни палеотектонічних умов у процесі формування Піщанської структури.

За результатами аналізу встановлено, що петрографічний опис шліфів не дав змоги чітко визначити причини таких великих значень коефіцієнтів анізотропії. Авторами планується детальніше вивчити особливості біотит-амфіболових кристалосланців, зокрема, з оцінкою їхніх пружних властивостей, а також провести дослідження електричної та магнітної анізотропії.

Список використаних джерел

- Александров, К.С., Продайвода, Г.Т. (2000). Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. Новосибирск. Изд.-во СО РАН.
- Безродний, Д., Ткачов, Л., Безродна, І. (2014). Вивчення характеру пружної анізотропії плагіомігматитів Криворізької надглибокої свердловини за даними петроакустичних досліджень. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 4(67), 49-54.
- Безродний, Д.А. (2008). Пружна анізотропія метаморфічних порід Крибасу і її використання для вирішення задач тектонофаціального аналізу. *Дис. ... канд. геолог. наук*. Київ.
- Вихва, С., Безродна, І., Безродний, Д., Попов, С. (2018). Анізотропія акустичних та пружних параметрів теригенних порід-колекторів за даними лабораторних ультразвукових досліджень. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*, 1(2), 34-49. DOI: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.034>
- Горбачевич, Ф.Ф. (2002). Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: Кольский научный центр РАН, ГИ.
- Горбачевич, Ф.Ф., Тришина, О.М., Ковалевский, М.В. (2017). Некоторые петрофизические свойства основных пород архейской части разреза кольской сверхглубокой скважины СГ-3. *Горные науки и технологии. Свойства горных пород. Геомеханика и геофизика*, 2, 28-42. DOI: [10.17073/2500-0632-2017-2-28-40](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-2-28-40)
- Ентін, В.А. (2012). Геофизические феномены Украины. *Мінеральні ресурси України*, 4, 18-25.
- Иванкина, Т.И., Никитин, А.Н., Замятина, Н.В., Казанский, В.И., Лобанов, К.В., Жариков, А.В. (2004). Анизотропия архейских амфиболитов и гнейсов из разреза Кольской сверхглубокой скважины по данным нейтроннографического текстурного анализа. *Физика Земли*, 4, 74-87.
- Ковалевский, М.В., Горбачевич, Ф.Ф., Хармс, У., Дальхайм, Х.-А. (2012). Акустополаризационные измерения упругоанизотропных свойств метаморфизованных пород по разрезу немецкой сверхглубокой скважины КТВ. *Геофизический журнал*, 2 (34), 36-48.
- Лысенко, П. Ю. (2013). Методика оценки анизотропии и поврежденности геоматериалов методом лазерной ультразвуковой спектроскопии с использованием установки "Геоискан-02МУ". *Горный информационно-аналитический бюллетень. Спецвыпуск*, 7.
- Приходько, В. Л. (1998). Результаты работ по подготовке геофизической и геохимической основы для ГДП-200 платформенного чехла и ГТК-200 кристаллического основания на площади листа М-35-XXXVI (Гайворон). *Отчет Правобережной геофизической партии за 1991-1998 г.г.* ГРГП "Північгеологія".
- Продайвода, Г.Т., Вихва, С.А., Безродний, Д.А., Безродна, І.М. (2011). Акустичний текстурний аналіз тектонофацій метаморфічних порід Криворізької. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".

Соболев, Г.А., Никитин, А.Н. (2001). Нейтроннография в геофизике. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 32, 6, 1359-1404.

Тришина, О.М., Горбачевич, Ф.Ф., Ковалевский, М.В. (2007). Сравнительные характеристики упругих свойств образцов горных пород по разрезу финской скважины Оутукумпу. *Вестник МГТУ*, 10, 2, 296-303.

Черепецкая, Е.Б. (2005). Разработка лазерного ультразвукового метода диагностики структуры и свойств горных пород на образцах. *Автоматизация процессов в горной промышленности*. Москва.

Bezrodnyi, D., Svystov, V., Bezrodna, I., Petrokushyn, R. (2018). Results analysis of complex magnetic surveillance of Pishchanska iron-ore structure samples. *Abstracts of the 11th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 Nov., 2018, Kyiv, Ukraine.

Grishchenko, A.I., Semenov, A.S., Tretyakov, D.A., Shtukin, L.V. (2017). Relationship between the acoustic anisotropy parameter and measures of the stress-strain state for a specimen with a stress concentrator. *Proceedings of the International Conference DAYS on DIFFRACTION 2017*. 154-158. <https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2017.02.005>

Ivankina, T.I., Kern, H.M., Nikitin, A.N. (2005). Directional dependence of P- and S-wave propagation and polarization in foliated rocks from the Kola superdeep well: evidence from laboratory measurements and calculations based on TOF neutron diffraction. *Tectonophysics*, 407(1-2), 25-42.

Kern, H., Liu, B., Popp, T. (1997). Relationship between anisotropy of P- and S-wave velocity and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite. *J. Geophys. Res.*, 102, 3051-3065.

Lokajicek, T., Kern, H., Svitek, T., Ivankina, T. (2014). 3D velocity distribution of P- and S-waves in a biotite gneiss, measure in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data. *Elsevier. Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 231, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.04.002>

Pros, Z., Babuska, V. (1967). Method for investigating the elastic anisotropy on spherical rock samples. *Zhur. Geophys.*, 83, 298-316.

Svitek, T., Vavryčuk, V., Lokajicek, T., Petružálek, M. (2014). Determination of elastic anisotropy of rocks from P- and S-wave velocities: numerical modelling and lab measurements. *Geophys. J. Int.*, 199, 1682-1697. DOI: [10.1093/gji/ggu332](https://doi.org/10.1093/gji/ggu332)

References

- Aleksandrov, K.S., Prodaivoda, G.T. (2000). Anisotropy of elastic properties of minerals and rocks. Novosibirsk. SO RAN. [in Russian]
- Bezrodnyi, D., Tkachov, L., Bezrodna, I. (2014). Elastic anisotropy of plagiomigmatite core samples from Kryvoriz'ka ultradeep well: a petroacoustic investigation. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (67), 49-54. [in Ukrainian]
- Bezrodnyi, D.A. (2008). Elastic anisotropy of metamorphic rocks of Kryvbass and its use for solving the problems of tectonofacial analysis. *Diss. ... Cand. Geol. Sciences*. Kyiv [in Ukrainian]
- Bezrodnyi, D., Svystov, V., Bezrodna, I., Petrokushyn, R. (2018). Results analysis of complex magnetic surveillance of Pishchanska iron-ore structure samples. *Abstracts of the 11th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13-16 Nov., 2018, Kyiv, Ukraine.
- Cherepetskaya, E.B. (2005). Development of a laser ultrasound method for diagnosing the structure and properties of rocks on samples. *Extended abstract ... Doctor's thesis: Technical Sciences*. Moscow. [in Russian]
- Entin, V. A., (2012). Natural geophysical phenomena in Ukraine. Kiev: Publ. UkrGGRI. [in English, Russian]
- Gorbatsevich, F.F. (2002). Acoustopolariscopy of rock-forming minerals and crystalline rocks. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, GI. [in Russian]
- Gorbatsevich, F.F., Trishina, O. M., Kovalevsky, M.V. (2017). Some petrophysical properties of the main rocks from the Archean section of the Kola superdeep borehole SG-3. *Mining science and technology*, 2, 28-40. [in Russian] DOI: [10.17073/2500-0632-2017-2-28-40](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-2-28-40)
- Grishchenko, A.I., Semenov, A.S., Tretyakov, D.A., Shtukin, L.V. (2017). Relationship between the acoustic anisotropy parameter and measures of the stress-strain state for a specimen with a stress concentrator. *Proceedings of the International Conference Days on Diffraction*, 154-158. <https://doi.org/10.1016/j.spjpm.2017.02.005>
- Ivankina, T.I., Kern, H.M., Nikitin, A.N., (2005). Directional dependence of P- and S-wave propagation and polarization in foliated rocks from the Kola superdeep well: evidence from laboratory measurements and calculations based on TOF neutron diffraction. *Tectonophysics*, 407(1-2), 25-42.
- Ivankina, T.I., Nikitin, A.N., Zamyatina, N.V., Kazansky, V.I., Lobanov, K.V., Zhariikov, A.V. (2004). Anisotropy of Archean amphibolites and gneisses from the section of the Kola ultradeep borehole according to neutron diffraction texture analysis. *Fizika Zemli*, 4, 74-87. [in Russian]
- Kern, H., Liu, B., Popp, T. (1997). Relationship between anisotropy of P- and S-wave velocity and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite. *J. Geophys. Res.*, 102, 3051-3065.
- Kovalevskiy, M.V., Gorbatsevich, F.F., Khams, W., Dahlheim, H.A. (2012). Acoustic polarization measurements of elastic anisotropic properties of metamorphosed rocks along the section of german ultradeep well KTB. *Geofizicheskiy zhurnal*, 2, (34), 36-48. [in Russian]
- Lokajicek, T., Kern, H., Svitek, T., Ivankina, T. (2014). 3D velocity distribution of P- and S-waves in a biotite gneiss, measure in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data. *Elsevier. Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 231, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.04.002>

Lysenko, P. Yu. (2013). Methods for assessing anisotropy and damage to geomaterials using laser ultrasound spectroscopy using the Geoscan-02MU equipment. *Mining information and analytical bulletin. Special issue*, 7. [in Russian]
Prikhodko, V.L. (1998). The results of the robot on the preparation of the geophysical and geochemical basis for the GDP-200 platform cover and the GKG-200 crystalline base on the area of the sheet M-35-XXXVI (Gaivoron). *Report of the Right Bank Geophysical Party for 1991-1998*. GRGP "Pivnichgeologiya". [in Russian]

Prodvoda, G.T., Vizhva, S.A., Bezrodnyi, D.A., Bezrodna, I.M. (2011). Acoustical texture analysis of metamorphic rocks Krivorizhzhya. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Pros, Z., Babuska, V. (1967). Method for investigating the elastic anisotropy on spherical rock samples. *Zhur. Geophys.*, 83, 298-316.

Sobolev, G.A., Nikitin, A.N. (2001). Neutronography in geophysics. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*. 32 (6), 1359-1404. [in Russian]

Svitek, T., Vavryčuk, V., Lokajčiek, T., Petružálek, M. (2014). Determination of elastic anisotropy of rocks from P- and S-wave velocities: numerical modelling and lab measurements. *Geophys. J. Int.*, 199, 1682-1697.

Trishina, O.M., Gorbatshevich, F.F., Kovalevsky, M.V. (2007). Comparative characteristics of the elastic properties of rock samples in the section of the Finnish well Outokumpu. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 10 (2), 296-303. [in Russian]

Vizhva, S.A., Bezrodnyi, D.A., Bezrodna, I.M., Popov, S.A. (2018). Anisotropy of acoustic and elastic parameters of terrigenous reservoir rocks according to the ultrasonic explorations. *Problems and prospects of oil and gas industry*, 1(2), 34-49. <https://doi.org/10.32822/naftogazscience>. 2018.02.034 [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.07.19

I. Bezrodna, PhD (Geol.), Senior Researcher,

E-mail: bezin3@ukr.net;

V. Svystov, PhD student,

E-mail: wladsvyst@ukr.net;

D. Bezrodny, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,

E-mail: manific2@ukr.net;

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ANALYSIS OF ACOUSTIC ANISOTROPY PARAMETERS OF PYROXENE-MAGNETITE ROCKS OF THE PISCHANKA STRUCTURE

The analysis of the results of acoustic properties of rocks study of Pischans'ka iron-ore structure is presented.

The aim of the work is to establish the features of the distribution of acoustic properties and parameters of acoustic anisotropy in samples of core rocks selected from the well No. 3 of the Pischans'ka structure to determine the nature of its occurrence.

A sample of 35 samples from the depth range 144-273 m is divided into 3 groups of rocks, namely: magnetite-pyroxene, quartz-magnetite-pyroxene and biotite-amphibole crystalline shales.

Based on an invariant polarization method, a number of acoustic laboratory measurements have been carried out. The values of the measured phase velocities "quasi-longitudinal" and two "quasi-transverse" waves at the stage of measurements showed significant acoustic anisotropy of the rocks. The ranges of the measured speeds of the collection samples are 7661 ± 5046 m/s for longitudinal waves and 4232 ± 2648 m/s for transverse ones. The difference in values measured for each of the sides of the cubic rhombic dodecahedron is from 100 to 800 m/s and from 0 to 500 m/s for V_p and V_s , respectively.

The parameters of an acoustic ellipsoid were calculated, on the basis of which the division of samples into 3 main groups has been performed, according to the acoustic texture: acoustically linear, shale and rhombic. Separately, a group of samples with a more complex texture was discovered.

The analysis of coefficients of anisotropy by different methods is carried out: longitudinal, transverse and relative acoustic anisotropy. Most of the samples are characterized by low or average acoustic anisotropy (from 2 to 7 %). A group of highly anisotropic rocks (11-14 %), represented by samples of biotite-amphibole crystalline silicates, is singled out.

According to the parameters of the acoustic tensor of most samples, the transverse isotropic type of symmetry inherent to samples from the depth intervals 174-220 m and 222-232 m, while the smaller part is rhombic, is inherent. Differences in the parameters of anisotropy of samples can be explained by the significant heterogeneity of their textures, namely: micro cracks, minerals of various sizes, shapes and orientations.

The results of the research show that the acoustic properties of the samples are quite heterogeneously distributed along the investigated depth range. This indicates the difficult conditions for the formation of rocks at different depths and the presence of different types of deformations, which accompanied the formation of the Pischans'ka structure.

Keywords: acoustic anisotropy, texture, symmetry, tensor.

И. Безродная, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,

E-mail: bezin3@ukr.net;

В. Свистов, асп.,

E-mail: wladsvyst@ukr.net;

Д. Безродный, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: manific2@ukr.net;

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПИРОКСЕН-МАГНЕТИТОВЫХ ПОРОД ПЕСЧАНСКОЙ СТРУКТУРЫ

Представлен анализ результатов исследования акустических свойств пород Песчанской железорудной структуры.

Целью работы является установление особенностей распределения акустических свойств и параметров акустической анизотропии в образцах пород керна, отобранного из скважины № 3 Песчанской структуры, для определения природы ее возникновения.

Выборка из 35 образцов из интервала глубин 144-273 м разделена на три группы пород, а именно: магнетит-пироксеновые, кварц-магнетит-пироксеновые и биотит-амфиболовые кристаллические сланцы.

На основании инвариантно-поляризационного метода осуществлен ряд петроакустических лабораторных измерений на образцах пород в форме куборомбододекаэдра. Значения измеренных фазовых скоростей "квазипродольной" и двух "квазипоперечных" волн еще на этапе измерений показали существенную акустическую анизотропию пород. Диапазоны измеренных скоростей образцов коллекции составляют 7661 ± 5046 м/с для продольных волн и 4232 ± 2648 м/с для поперечных. Разница значений, измеренных для каждой из пар граней куборомбододекаэдра составляет от 100 до 800 м/с для V_p и от 0 до 500 м/с - для V_s .

Рассчитаны параметры акустического эллипсоида, по соотношениям которых осуществлено разделение образцов на три основные группы по акустической текстуре: акустически линейная, сланцеватая и ромбическая.

Проведен анализ коэффициентов анизотропии по результатам измерения скоростей волн: продольной и относительной акустической анизотропии. Большинство образцов присущ низкий или средний уровень акустической анизотропии (от 2 до 7 %). Выделены группы высокоанизотропных пород (11-14 %), представленных образцами биотит-амфиболовых кристаллосланцев.

По параметрам акустического тензора большинства образцов присущ поперечно-изотропный тип симметрии, который характерен для образцов из интервалов глубин 174-220 м и 222-232 м, меньшей части - ромбический. Разногласия по параметрам анизотропии образцов можно объяснить существенной неоднородностью их текстур, а именно: микротрещинами, минералами разного размера, формы и ориентации.

Результаты исследований показывают, что акустические свойства образцов отличаются вдоль интервала глубин. Это связано с различным минералогическим составом пород, а также свидетельствует о сложных условиях образования пород на разных глубинах и присутствием различных типов деформаций, сопровождавших формирование Песчанской структуры.

Ключевые слова: акустическая анизотропия, текстура, симметрия, тензор.