

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА “KERN-DP” ОБРОБКИ ДАНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ АНІЗОТРОПІЇ ТА АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ

А. П. ОНАНКО, В. О. АНДРУЩЕНКО, Г. Т. ПРОДАЙВОДА, Ю. А. ОНАНКО,  
А. В. ШАБАТУРА, Р. В. ХОМЕНКО, С. А. ПОПОВ, А. М. ОНЩЕНКО

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна  
onanko@univ.kiev.ua*

Розроблено програма і алгоритм, які дозволяють у автоматизованому режимі проводити аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль. Автоматизована система обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей побудована за віконним принципом. Розроблена структура бази даних на мові MySQL інформації, фізичних властивостей, розроблені спеціальні процедури управління даними. Розроблено методику визначення природи тріщинуватості за даними акустичної емісії. Розроблено методику визначення функції розподілу орієнтації мікротріщин за даними азимутальних спостережень швидкостей об'ємних пружних хвиль.

### ВСТУП

Дослідження анізотропії швидкостей пружних хвиль в гірських породах представляє значний інтерес у зв'язку із розвитком трьохкомпонентних (3С) азимутальних 3D-сейсмічних методів, які забезпечують прогноз і оцінку продуктивності тріщинуватих колекторів нафти і газу. Дана робота присвячена вивченню динаміки неоднорідного термічного впливу створеного потужним наносекундним лазером. Акустична емісія (АЕ) дозволяють отримувати додаткову інформацію про процес тріщиноутворення. Всі результати розрахунків, які проводяться автоматизованою системою “KERN-DP”, записуються у базу даних в автоматичному режимі, при цьому виключається можливість внесення некоректних даних оператором в ручному режимі.

### 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Експериментальні дослідження ультразвуковими (УЗ) методами показують, що анізотропія пружних хвиль  $V$  обумовлена впливом кристалографічної орієнтації, формою зерен, орієнтацією мікротріщин [1-5]. Для обчислення осереднених пружних постійних  $C_{ijkl}$  застосовується інваріантно-поляризаційний метод [6-8]. Автоматизована система (АС) дозволяє проводити аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль.

### 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Використовувалися ультразвукові дослідження, зокрема установка методики акустичної емісії. Загальне підсилення реєструючої апаратури на основі спеціалізованого акустоемісійного приладу АФ-15 було  $\alpha = 60 \div 70$  дБ. Потужність імпульсу рубінового лазера  $I \approx 300$  МВт/см<sup>2</sup>. Тривалість дії імпульсу рубінового лазера  $\tau \approx 20$  нсек з довжиною хвилі  $\lambda = 694$  нм. Площа лазерної плями була  $S_0 \approx 1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Установка і блок-схеми установки I, II методики АЕ на частоті  $f_{\parallel} = 0,2 \div 0,5$  МГц для вимірювання швидкостей пружних хвиль зображена на рис. 1, рис. 2 та рис. 3.



Рис. 1. Установка методики акустичної емісії на частоті  $f_{\parallel} = 0,200 \div 0,500$  МГц  $\alpha = 70$  дБ для вимірювання швидкостей пружних хвиль.

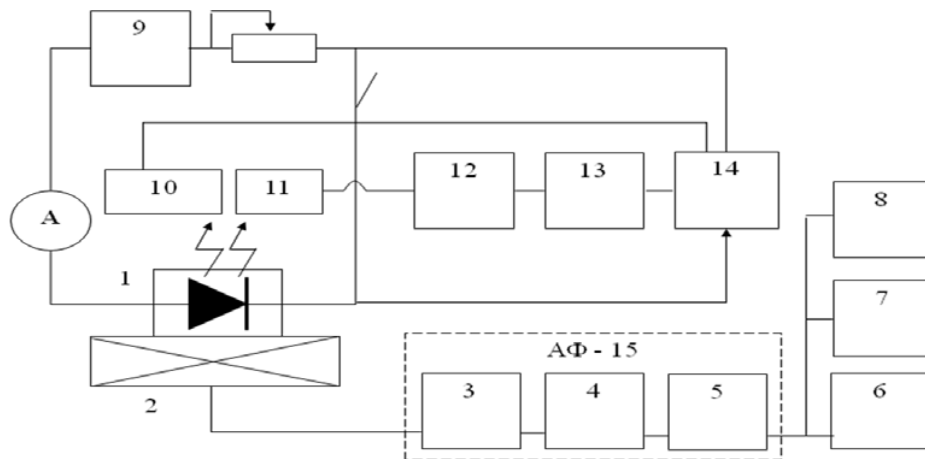


Рис. 2. Блок-схема установки I акустичної емісії.

1 – зразок, 2 – п'єзоелектричний перетворювач (датчик АЕ), 3 – попередній підсилювач, 4 – блок фільтрів, 5 – основний підсилювач, 6 – осцилограф, 7 – 4-и координатний самописець, 8, 14 – комп'ютери. 9 – джерело напруги, 10 – фотодіод, 11 – монохроматор, 12 – ФЕК, 13 – підсилювач.

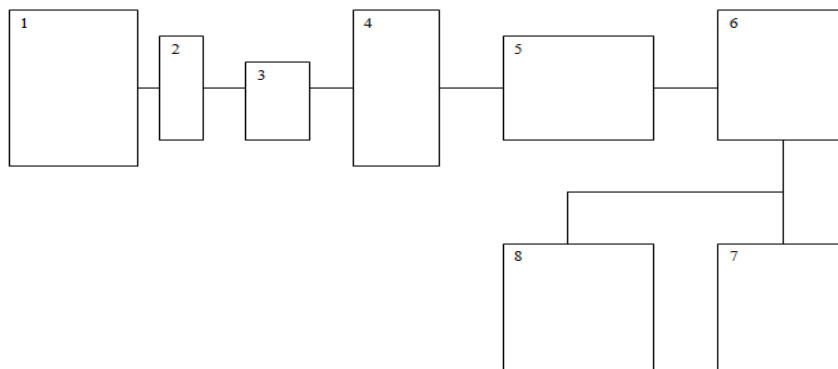


Рис. 3. Блок-схема установки II для реєстрації акустичної емісії.

1 - генератор радіопульсів, 2 - зразок, 3 - датчик акустичної емісії, 4 - загороджувальний фільтр, 5 - підсилювач попереднього підсилення, 6 - пристрій обробки сигналів акустичної емісії АФ-15, 7 - осцилограф, 8 - ЕОМ.

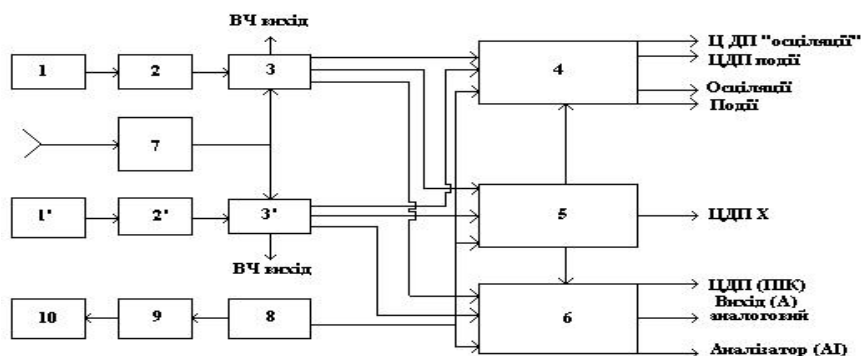


Рис. 4. Блок схема АФ-15.

1-1' – п'єзоелектричний перетворювач 1-го та 2-го каналів, 2-2' – ПП – попередній підсилювач, 3-3' – фільтри – підсилювачі сигналів та формування сигналів осциляцій, подій та пікового значення аналогової амплітуди, 4 – блок суматора, 5 – блок лінійних координат, 6 – блок амплітуди, 7 – блок синхронізації, 8 – генератор управління, 9 – калібратор, 10 – калібруючий перетворювач.

У роботі використовувалися УЗ імпульсно-фазовий метод визначення швидкостей пружних хвиль  $V$  за допомогою установок УЗВШ-ЛЕТІ, модернізованої УЗВШ-КНУ і комп'ютеризованої установки “Керн-4” на рис. 5, УЗ інваріантно-поляризаційний метод визначення ефективних акустичних  $\mu_{il}$  і пружних  $C_{ijkl}$  постійних, методи розв'язку прямих і зворотних задач акустики текстур [7-8].

Методи для вимірювання ВТ и модуля пружності  $E$  складного п'єзоелектричного вібратора на частоті  $f \approx 117$  кГц, оптичні спостереження мікроструктури за допомогою мікроскопа “ЛОМО МВТ”, інвертовного металургійного системного мікроскопа “GX51”, акустичної емісії, скануючої атомно-силової мікроскопії. А також теоретичні методи із застосуванням розробленого алгоритму та програмного забезпечення, автоматизованої системи “KERN-DP” на мові програмування Delphi 7 за допомогою зовнішнього OLE 2.0 – сервера, який використовує програму Surfer 10 для чисельного та графічного аналізу і візуалізації в автоматичному режимі даних УЗ вимірювань параметрів анізотропії швидкостей пружних хвиль гірських порід для експрес-обробки експериментальних значень фазових швидкостей квазіповздовжньої  $V_P$ , “швидкої”  $V_{S1}$  і “повільної”  $V_{S2}$  квазіпоперечних хвиль інваріантно-поляризаційним методом. Ультразвуковий вимірювач швидкостей розповсюдження в функціональних матеріалах комп'ютеризований KERN-4 на рис. 5 складається із вимірювального блока і персонального комп'ютера із операційною системою “Windows XP”.

Програма KERN-4 забезпечує управління основними підсистемами блока вимірювання, відображення сигналу прийому в режимі цифрового осцилографа, що запам'ятовує, а також обчислення швидкості розповсюдження ультразвуку і індикацію її величини на індикаторі. Вимірювальний блок складається із генератора, підсилювача потужності, модуля управління-1, модуля управління-2, приймача, модуля живлення. Блок управління містить схему виділення парних імпульсів, які слідуєть із тактовою частотою, що задається генератором, схему формування еталонних і вимірювальних імпульсів і схему синхронізації розгортки. Діапазон частот  $f = 0,3 \div 2$  МГц.

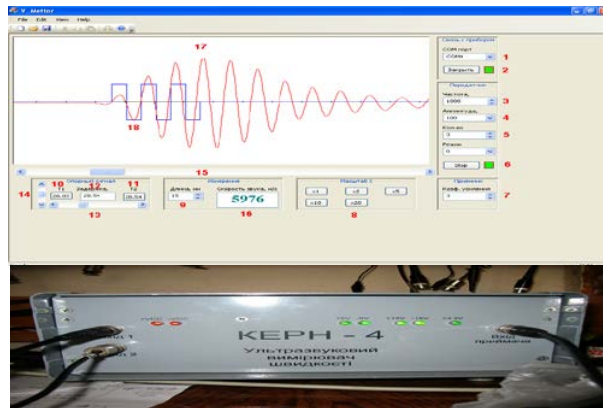


Рис. 5. Ілюстрація вікна обробки даних вимірювань швидкостей пружних хвиль в функціональних матеріалах луна-імпульсної методики на частоті  $f_{\parallel} \approx 1,11$  МГц,  $f_{\perp} \approx 0,43$  МГц і загальний вид комп'ютеризованої установки КЕРН-4.

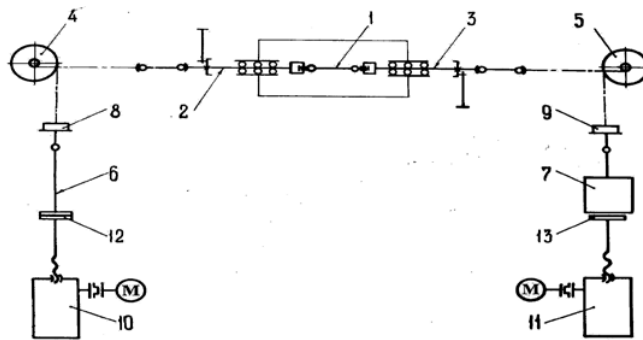


Рис. 6. Принципова схема установки „АЛА-ТОО” (ИМАШ-20-75). 1 – зразок; 2, 3 – тяги; 4, 5 – шківів; 6, 7 – підвіски; 8, 9 – вантажі для компенсації атмосферного тиску; 10, 11 – коробки швидкостей; 12, 13 – опорні підставки; М – електродвигун.

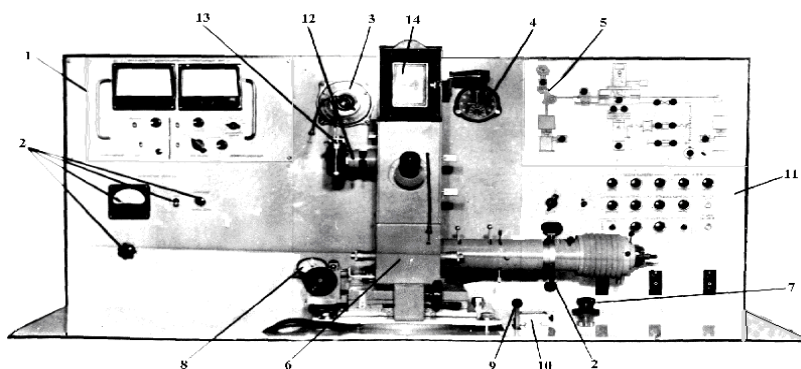


Рис. 7. Передня панель пульта керування установки АЛА-ТОО (ИМАШ-20-75). 1 – вакуумметр, 2 – органи керування і контролю блока живлення ртутно-кварцевої лампи ДРШ-250 освітлювача мікроскопу, 3 – перемикач термопар, 4 – годинник, 5 – панель сигналізації, 6 – мікроскоп, 7 – гніздо для підключення електроду приварки термопар, 8 – пристрій відображення, 9 – рукоятка переміщення захисного скла.

Для визначення характеристик матеріалів, побудови діаграми напруження - деформація  $\sigma$ - $\varepsilon$  при короткочасному одновісному розтягу використовують машини для випробувань. На рис. 6 та 7 показана принципова схема та передня панель пульта керування установки „АЛА-ТОО” (ИМАШ-20-75). Випробування проводять на стандартних зразках спеціальної форми. Зразок, закріплений в захватах, навантажується поступальним переміщенням тягового ланцюга від системи передач електродвигуна. Зусилля розтягу визначається за допомогою тензометричного датчика. Розміри поперечного перерізу зразка  $d \approx 3 \times 3 \text{ мм}^2$ , початкова довжина  $l_0 \approx 37 \text{ мм}$ .

### 3. АЛГОРИТМ ОБРОБКИ ДАНИХ АНІЗОТРОПІЇ АКУСТИЧНИХ ШВИДКОСЕЙ

Обчислення урівноважених швидкостей об’ємних пружних хвиль, значень акустичного тензору  $\mu^*(\vec{n}) = \mu_{ii}^* n_i n_i = (v_1^{*2} + v_2^{*2} + v_3^{*2})$  в робочій системі координат, власних значень і їх довірчих границь та їх власних напрямків детермінованої складової акустичного тензору  $\langle \mu_{ii} \rangle$  зразків, початкових наближень для пружних постійних  $C_{ijkl}$  здійснено за програмою розрахунків акустичних констант "KERN-DP", яка для розрахунків вище зазначених параметрів використовує дані експериментальних вимірювань фазових швидкостей квазіповздовжньої  $V_p$ , "повільної"  $V_{S2}$  і "швидкої"  $V_{S1}$  квазіпоперечних хвиль та щільність зразка  $\rho$ , що вимірюється. За результатами розрахунків було розраховано параметри акустичної лінійності  $L_a$  і сланцюватості  $S_a$ , а також визначено тип симетрії  $N$  текстури акустичного тензора  $\langle \mu_{ii} \rangle$ . Розрахунок пружних постійних  $C_{ijkl}$  було проведено з використанням програми "KERN-DP". В ній в якості вихідних даних використано файли урівноважених швидкостей квазіповздовжньої  $\bar{V}_p$  і квазіпоперечних хвиль  $\bar{V}_{S1}$  і  $\bar{V}_{S2}$ , акустичних констант  $\mu_{ii}$  і початкових наближень пружних постійних  $C_{ijkl}$ .

### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Співставлення акустичного відгуку в кварциті, зображеному на рис. 8а, з часовим терміном дії імпульсу рубінового лазера інтенсивністю  $I \approx 300 \text{ МВт/см}^2$  та розмірами зразка вказують на імовірне формування 2-го та 3-го „максимумів” (накладених в часі імпульсів) через механізм АЕ, оскільки часові затримки їх появи та довжина кінцевого сформованого імпульсу не можуть бути пояснені в рамках фототермопружного механізму. Швидкість розповсюдження поздовжніх хвиль в кварциті була  $v_{11} = 0,028 \text{ м/5.2 мкс} \approx 5390 \text{ м/с}$ . Модуль пружності кварциту  $E = 79,46 \text{ ГПа}$ , абсолютне значення  $E$  найбільше в напрямках, вздовж яких концентрація орієнтованих тріщин є найменшою. На рис. 8б наведена поверхня кварциту після лазерного опромінення. Даний процес за набором часових фаз імітує „виверження вулкану”.

Дефект внутрішнього тертя  $\frac{\Delta Q^{-1}}{Q^{-1}} = \frac{Q^{-1}_{нас} - Q^{-1}_{ск}}{Q^{-1}_{ск}}$  на рис. 10 і коефіцієнт

затухання УЗ  $\alpha = \frac{Q^{-1}}{\lambda} = \frac{Q^{-1}}{V} = \frac{\lg\left(\frac{A_0}{A_1}\right)}{h}$  на рис. 11 визначались з осцилограм імпульсів

відповідної поляризації  $V_{P[001]}$  в  $\text{SiO}_2$  до і після насичення  $V_{P[001]}^H$  з  $\ln$  відношень амплітуд  $A_1, A_2, (A_0 - \text{без зразка})$   $Q^{-1} = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\pi}$ .

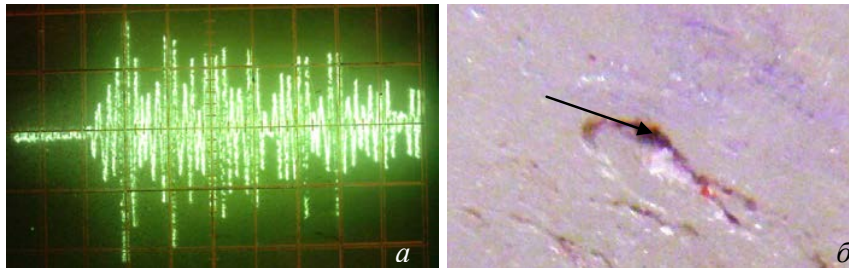


Рис. 8а. Опромінення в кварцит рубіновим лазером; 1 В/под, 10 мкс/под.  
Рис. 8б. Поверхня кварциту після лазерного опромінення (x 250).

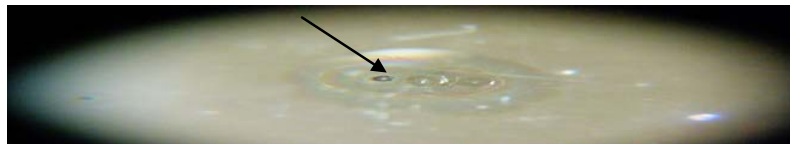


Рис. 9. Поверхня кварциту після лазерного опромінення (x50).

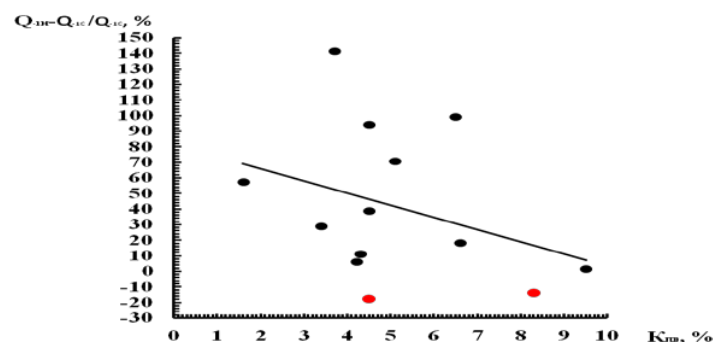


Рис. 10. Кореляційна залежність дефекту внутрішнього тертя  $\Delta Q^{-1} = \frac{Q^{-1}_{нас} - Q^{-1}_{ск}}{Q^{-1}}$

від коефіцієнту відкритої пористості  $K_{пв} = V_{пв}/V$ .

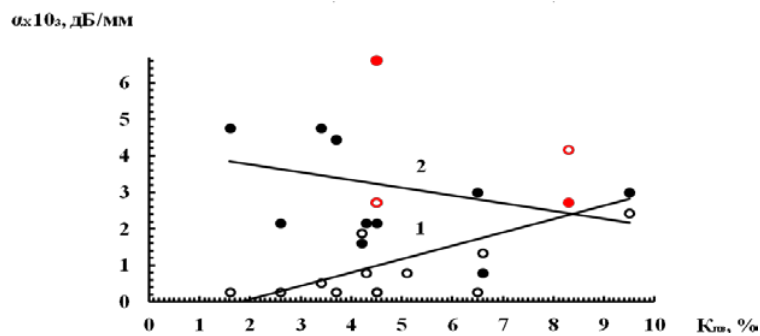


Рис. 11. Кореляційна залежність коефіцієнту затухання ультразвуку  $\alpha$  від коефіцієнту відкритої пористості  $K_{пв} = V_{пв}/V$ : 1 – до, 2 – після насичення  $\rho_{\text{NaCl}} = 180 \text{ кг/м}^3$ .

## ВИСНОВКИ

1. Інтегральний коефіцієнт пружної анізотропії  $\bar{A}_\mu$  і кут поляризації - відхилення вектора пружних зміщень  $\vec{U}$  від напрямку хвильової нормалі  $\vec{n}$   $\varphi_{\vec{P}} = (\vec{U}, \vec{n})$  є найбільш чутливими характеристиками анізотропії і свідчать про неоднорідну деформацію  $\varepsilon$  при гідростатичному стиску  $P$ .
2. Модуль пружності  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{1 - \left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2} \right]$ , внутрішнє тертя  $Q^{-1} = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\pi}$ , коефіцієнт затухання УЗ  $\alpha = \frac{\lg\left(\frac{A_0}{A_1}\right)}{h}$  залежать від колекторської властивості: коефіцієнту відкритої пористості  $K_{ПВ} = V_{ПВ}/V$ , текстури, мікротріщиноутворення, анізотропії.
3. З огляду на велику інформаційну насиченість щодо генезису кварцитів особливості прояву акустичної емісії є важливими для розвитку теорії деформації середовища, утворення і розповсюдження тріщин, тому необхідні для фізичного обґрунтування використання методу АЕ для здійснення неруйнівного контролю текстур.
4. Особливо суттєвий вплив на величину коефіцієнта пружної анізотропії  $A_d$  робить просторовий збіг напрямків орієнтації структурних елементів, тип пустотного простору: пори, мікротріщини.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Мэзон У. Физическая акустика. Т. 1, Ч. А. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
2. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голяминой /. – М.: Сов. энцикл., 1979. – 440 с.
3. Гринченко В. Т., Вовк И. В. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках. – К.: Наук. думка, 1986. – 238 с.
4. Гринченко В. Т., Мацьпура В. Т., Снарский А. А. Введение в нелинейную динамику. – К.: Наук. думка, 2005. – 263 с.
5. Гринченко В. Т., Вовк И. В., Мацьпура В. Т. Волновые задачи акустики. – К.: Интерсервис, 2013. – 572 с.
6. Onanko A. P., Lyashenko O. V., Lyashenko I. O., Onanko Y. A. Acoustic attenuation in silicon and silicon oxide // J. Acoust. Soc. Am. – 2008. - **123**, № 5, Pt. 2. – P. 3701.
7. Вижва С. А., Продайвода Г. Т., Онанко Ю. А. Сейсмоакустична діагностика процесів руйнування в геологічному середовищі // Геоінформатика. – 2011. – № 1. – С. 42–47.
8. Онанко Ю. А. Автоматизована система аналізу даних вимірювань анізотропії в гірських породах // Геоінформатика. – 2013. – № 2(46). – С. 55–60.