

Ю.А. Онанко

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ АНІЗОТРОПІЇ В ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ

Розглянуто програмно-алгоритмічні засоби автоматизованої системи чисельного аналізу даних ультразвукових вимірювань параметрів анізотропії швидкостей в гірських породах для експрес-обробки, які забезпечують урахування впливу неоднорідності складу і будови текстур гірських порід та їх упорядкованості. Одержано пружні сталі C_{mn} пісковиків Волино-Подільського регіону, які свідчать про ромбічну пружну симетрію, а не поперечно-ізотропну. Отримані результати мають важливе значення для побудови сейсмічних моделей реальних геологічних середовищ.

Ключові слова: автоматизована система, колектор, тріщини, ультразвукові хвилі, пружні константи.

Вступ. Анізотропію швидкостей поширення пружних хвиль V у гірських породах (далі – швидкостей V) розглядають як один із найінформативніших параметрів геодинамічних процесів, що відбувається в надрах Землі. Разом з тим експериментальні дослідження і чисельний аналіз параметрів анізотропії швидкостей V істотно утруднений. Під час досліджень гірських порід насамперед слід розрізняти неоднорідність складу і будови текстур гірських порід та їх упорядкованість, що має недосконалість і здебільшого статистичний характер [7, 5]. Поширення ультразвукових (УЗ) пружних хвиль у гірських породах супроводжується розсіюванням і поглинанням, яке залежить від частоти f і спричинює спотворення акустичних імпульсів унаслідок скінченної ширини їх спектра та ускладнює вимірювання фазових швидкостей V [1, 2, 5, 8].

Постановка проблеми. У статті розглянуто автоматизовану систему (АС) чисельного аналізу і візуалізації даних УЗ-вимірювань параметрів анізотропії швидкостей V (рис. 1).

Розроблену АС обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V подано у вигляді блок-схеми (рис. 2). У центрі блок-схеми розташоване “ядро” – сукупність процедур і функцій, які забезпечують дію програми як єдине ціле. “Ядро” фактично реалізує принцип модульності системи, на першому етапі роботи програми відповідні процедури і функції проводять ініціацію програми в цілому. Під час аналізу конфігурації програма переходить до етапу формування працездатного програмного комплексу, виходячи із наявних модулів і встановлених користувачем параметрів. Будова “ядра” зображена на рис. 3.

Модуль ініціації формує оболонку програми і керує роботою програми в процесі завантаження. Спочатку викликають модуль конфігурації, який, аналізуючи параметри конфігурації та зареєстровані компоненти, викликає модуль конструктора,

що приєднує необхідні модулі, формуючи повноцінну автоматизовану систему. У процесі приєднання викликають модуль інтерфейсу, який відповідно до параметрів конфігурації формує візуальну оболонку програми. Після завершення всіх кроків програма переходить у режим очікування команд користувача.

Група модулів під назвою “керування даними” дає змогу формувати звіти, що містять результати проведених розрахунків, використовуючи можливості програми Microsoft Office Word, а також будувати стереопроєкції та діаграми, використовуючи можливості програми Surfer.

Модуль візуалізації дає можливість візуального контролю над ходом розрахунків і має свою систему звукових повідомлень про завершення кожного з етапів розрахунків. Користувач може вивчити результати розрахунків та побудови, виконані за допомогою програми Surfer (стереопроєкції та діаграми) у вікні програми.

Модуль помічника реалізовано з підходом “завжди там, де потрібно”. Втім, незважаючи на дослідника, модуль візуально має вигляд підказок, які повідомляють користувача про дії, які необхідно виконати для проведення розрахунків або аналізу результатів розрахунків, що вже наявні у базі даних результатів обробки.

Найголовнішою є група модулів числових розрахунків, які організують процес розрахунку і забезпечують числові розрахунки та розв’язок задачі обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V . Процес розрахунків реалізовано так, щоб користувач міг на будь-якому етапі роботи програми вносити потрібні зміни в параметри розрахунку або зупиняти процес розрахунку і виводити попередні результати на окремих етапах розрахунків. Користувач через діалог з модулем керування процесами задає необхідні параметри розрахунку і вибирає пакет інформації поточного дослідження, який заван-

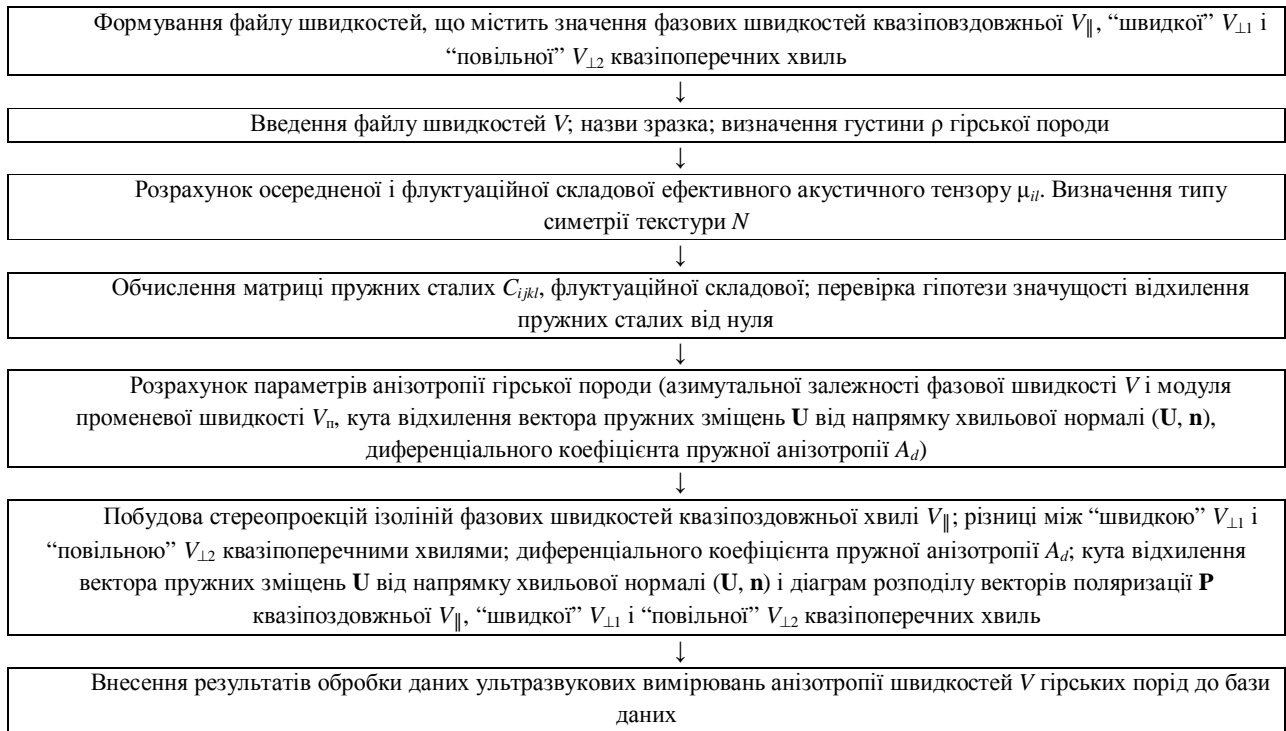


Рис. 1. Принципова схема алгоритму роботи автоматизованої системи чисельного аналізу і візуалізації даних ультразвукових вимірювань параметрів анізотропії швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах



Рис. 2. Загальна блок-схема АС обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей V в гірських породах

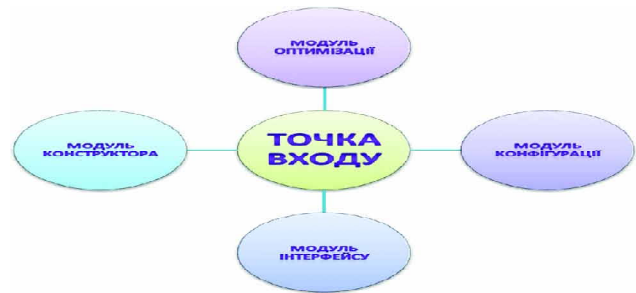


Рис. 3. Блок-схема будови "ядра" АС

тажений до оперативної пам'яті комп'ютера для збільшення продуктивності програми. Після команди "розпочати обчислення" викликають модуль оптимізації, який, взаємодіючи з модулем чисельних розрахунків і візуалізації, розпочинає роботу. Після завершення, припинення або зупинення обчислень результати надходять до модуля керування даними, який, відповідно до команди користувача, передає їх модулю керування пакетами для подальшої роботи з ними.

АС дає змогу створити базу даних результатів обробки та працювати з нею для подальшого аналізу результатів. База даних результатів обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V містить: кількість зразків, що наявні в базі даних, та екстремуми (мінімуми та максимуми) стереопроєкцій ізоліній фазових швидкостей квазіпоздовжньої хвилі V_{\parallel} , різниці між "швид-

кою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями $\Delta V_{\perp} = V_{\perp 1} - V_{\perp 2}$; диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d , кута відхилення вектора пружних зміщень \mathbf{U} від напрямку хвильової нормалі (\mathbf{U}, \mathbf{n}) і діаграм розподілу векторів поляризації квазіпоздовжньої V_{\parallel} , "швидкої" $V_{\perp 1}$ і "повільної" $V_{\perp 2}$ квазіпоперечних хвиль, а також назви папок, в яких зберігають звіти з результатами обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V у гірських породах.

Геолого-петрографічна характеристика досліджуваних зразків гірських порід. Для експериментального вивчення пружних сталей були відібрані зразки гірських порід із Лудинської площі Волино-Подільського регіону. У результаті петрографічних досліджень установлено їх літологічний склад, структурно-текстурні особливості, тип цементу.

Результати досліджень. Із штуфів керна на каменерізальному верстаті були виготовлені зразки у вигляді куборомбододекаедрів, розміром $L = 30 \times 30 \times 30$ мм. Забезпечення паралельності відповідних пар граней не гірше $\parallel \leq \pm 0,015$ мм. Орієнтація напрямків вимірів – з точністю $\Delta\alpha = \pm 1,5^\circ$. Стандартними петрофізичними методами визначали густину ρ і ефективну пористість зразків пісковиків. Фазові швидкості V об'ємних пружних хвиль одержані за допомогою імпульсної установки для УЗ-вимірювань швидкостей V на частоті $f \approx 1670$ кГц. Як п'єзовипромінювач і приймач поздовжніх і поперечних мод використовували п'єзокварци відповідної поляризації. Точність визначення фазових швидкостей поздовжніх і поперечних мод $\Delta V/V \approx 0,5$ %.

Швидкості поширення об'ємних пружних хвиль V , акустичні константи μ_{ij} і пружні сталі C_{mnn} пісковиків змінюються у широких межах. Це пов'язане з варіаціями літологічного складу і складу цементу порід, наявністю пор і мікротріщин. Найвищі значення фазових швидкостей і пружних сталей C_{mnn} відмічено для пісковиків (Лу-9), основна маса якого складається з уламків кварцу білого кольору, що формують цукроподібну масу. Найнижчі значення фазових швидкостей V і пружних сталей C_{ijkl} відмічено для пісковиків (Лу-37), основна маса якого представлена уламково-теригенною фракцією (кварц, магнетит) – 80 %. Пружна анізотропія характерна як для різновидів з макро- і мікросхаруватістю, так і для масивних різновидів пісковиків.

За результатами аналізу параметрів акустичної анізотропії основних петротипів осадових порід – пісковиків Лудинської площі Волино-Подільського регіону, встановлено, що інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії пісковиків змінюється $-7,17\% < A_{\mu} < 13,62\%$, складаючи в середньому $\approx 10,33\%$. За значеннями акустичного тензору μ_{ij} інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_{μ} змінюється за стовбурами свердловин у досить широких межах. Так, в інтервалі глибин H 2850–3100 м $7,17\% < A_{\mu} < 13,62\%$, у середньому для регіону $5\% < A_{\mu} < 15\%$.

Результати геоінформатичної обробки. У результаті числових розрахунків, проведених за схемою (див. рис. 1), отримуємо врівноважені швидкості поширення квазіпоздовжніх V_{\parallel} і квазіпоперечних хвиль V_{\perp} , значення акустичного тензору μ_{ij} в робочій системі координат, власні значення і їх довірчі границі та їх власні напрямки детермінованої складової акустичного тензору μ_{ij} зразків гірських порід, ефективні пружні сталі C_{ijkl} зразків гірських порід, акустичну лінійність L_{μ} та сланцюватість (шаруватість) S_{μ} зразків гірських порід, параметри азимутальної анізотропії пружних хвиль, що представлені стереопроєкціями ізоліній фазових швидкостей квазіпоздовжньої хвилі V_{\parallel} ; різниці

між “швидкою” і “повільною” квазіпоперечними хвилями $\Delta V_{\perp} = V_{\perp 1} - V_{\perp 2}$; диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d ; кута відхилення вектора пружних зміщень U від напрямку хвильової нормалі (U, n) і діаграмами розподілу векторів поляризації квазіпоздовжньої V_{\parallel} ; “швидкої” $V_{\perp 1}$ і “повільної” $V_{\perp 2}$ квазіпоперечних хвиль.

Після кожного етапу обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V результати обробки зберігають у вигляді звіту, форму якого задають заздалегідь. В базу даних вносять: екстремуми (мінімуми та максимуми) стереопроєкцій ізоліній фазових швидкостей квазіпоздовжньої хвилі V_{\parallel} ; різниці між “швидкою” і “повільною” квазіпоперечними хвилями $\Delta V_{\perp} = V_{\perp 1} - V_{\perp 2}$; диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d ; кута відхилення вектора пружних зміщень U від напрямку хвильової нормалі (U, n) і діаграм розподілу векторів поляризації P квазіпоздовжньої V_{\parallel} ; “швидкої” $V_{\perp 1}$ і “повільної” $V_{\perp 2}$ квазіпоперечних хвиль, а також назву папки, в якій зберігають звіти з результатами обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V в гірських породах.

Після введення назви і значення густини ρ досліджуваного зразка гірської породи та вибору режиму роботи програми кнопка “ОК” стає активною. Після натискання кнопки “ОК” у вікні вводу “назви” і “густина” зразка гірської породи та вибору режиму роботи програми, якщо був вибраний “ручний” режим роботи програми, виконується перший етап розрахунків та обробки даних. На рис. 4 показано вікно завершеного першого етапу обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V у гірській породі.

Команда “Етап № 2” запускає послідовне виконання першого та другого етапів розрахунків та обробки даних. Після завершення другого етапу лунає відповідний звуковий сигнал та відкривається вкладка “Етап № 2”, що містить результати другого етапу обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V (рис. 5).

Команда “Етап № 3” запускає послідовне виконання першого, другого і третього етапів розрахунків та обробки даних. Після завершення третього етапу лунає відповідний звуковий сигнал та відкривається вкладка “Етап № 3”, що містить результати третього етапу обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей V (рис. 6, 7).

Команда “Додати в базу даних” запускає послідовне виконання першого, другого і третього етапів розрахунків та обробки даних і додає результати всіх етапів обробки даних УЗ-вимірювань анізотропії швидкостей у гірській породі у базу даних. Далі проводиться перевірка на збіг імен зразків і, якщо задана назва зразка досліджуваної гірської породи вже є в базі даних, то результати всіх етапів обробки даних УЗ-вимірювань анізо-

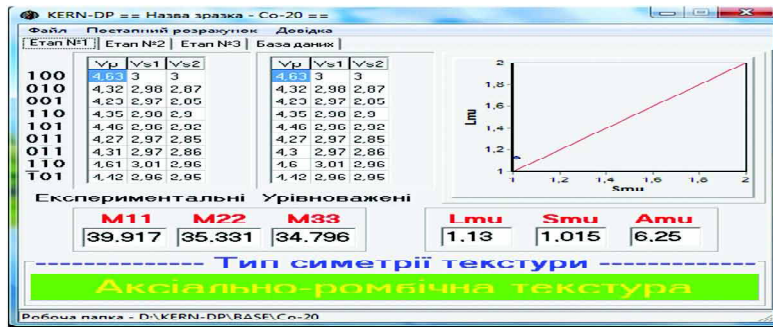


Рис. 4. Вікно завершеного першого етапу обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей V у гірській породі



Рис. 5. Вікно завершеного другого етапу обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей V у гірській породі

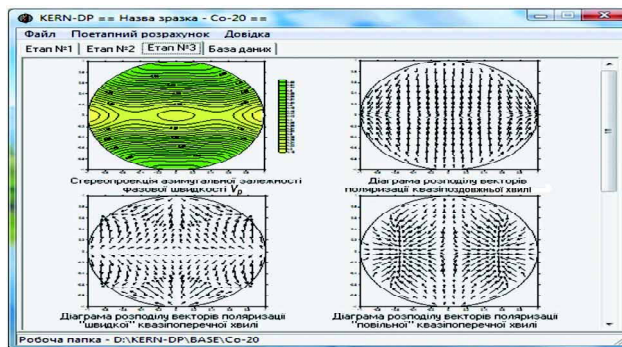


Рис. 6. Верхня частина вікна завершеного третього етапу обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей V у гірській породі

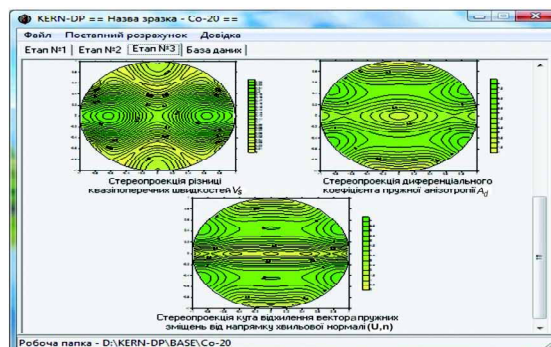


Рис. 7. Нижня частина вікна завершеного третього етапу обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей V у гірській породі

тропії швидкостей V не заносяться до бази даних, про це сповіщає відповідне повідомлення.

Стереопроєкції параметрів пружної анізотропії були розраховані для осадових порід Волино-Подільського регіону. Пружна симетрія середовища накладає досить жорсткі обмеження на характер азимутальної залежності параметрів анізотропії. Пружна анізотропія відображає історію деформації осадових порід. Деформовані осадові породи мають виразну впорядкованість будови, яка призводить до ще більш вираженої анізотропії пружних хвиль. Анізотропія і впорядкованість структурних елементів осадових порід – взаємопов'язані фундаментальні властивості, що відображують деформаційні процеси їх формування і перетворення. Найінформативнішим параметром анізотропії є диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії A_p , який характеризує відхилення текстури гірської породи від найближчого до нього ізотропного середовища. За допомогою цього коефіцієнта можна порівняти анізотропію пружних середовищ різної симетрії. Вказівні поверхні параметрів анізотропії зображують у вигляді стереопроєкцій ізолій. Ця поверхня дає вичерпні уявлення про просторові зміни параметрів анізотропії об'ємних пружних хвиль і відображує вплив на них симетрії.

Експериментально встановлено, що більшість досліджуваних зразків є пружноанізотропними. Коефіцієнт пружної анізотропії A_u змінюється від 7,17 до 13,62 %. Особливо суттєво впливає на коефіцієнт A_u просторовий збіг напрямків орієнтації структурних елементів, насамперед кристалографічної орієнтації і орієнтації зерен за формою разом із орієнтацією мікротріщин. Анізотропія досліджуваних порід зумовлена текстурними особливостями, впорядкованістю структурно-морфологічного парагенезису, який проявляється у смугастості і лінійності, що пов'язана зі сплюснено-лінзоподібним розвитком смугастості і сланцюватості, орієнтуванням шарнірів і осьових площин лінійних складок та з орієнтуванням мінералів за формою і будовою. Ця анізотропія ускладнюється накладеною упорядкованою мікротріщинуватістю, що спричинена сучасним станом гірських порід [3, 4, 6, 9, 10–12].

З огляду на пружні сталі C_{mn} осадових порід Волино-Подільського регіону, можна дійти висновків щодо симетрії їхніх текстур, яка є ромбічною ($9 C_{mn}$). При цьому деякі сталі C_{mn} незначно відрізняються від нуля. Текстури досліджуваних зразків можна віднести до класу планальних (акустично сланцюватих) або аксіальних (акустично лінійних). Поперечно-ізотропна апроксимація пружної анізотропії осадових порід є наближенням. Вибір наближення пружної симетрії накладає жорсткі обмеження на азимутальні залежності всіх без винятку параметрів анізотропії

об'ємних пружних хвиль, розщеплення поперечних хвиль і поляризаційні ефекти.

Висновки. Розроблену автоматизовану систему чисельного аналізу і візуалізації даних УЗ-вимірювань параметрів анізотропії швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах можна використовувати для експрес-обробки експериментальних значень фазових швидкостей квазіпоздовжніх V_p , “швидкої” V_{11} і “повільної” V_{12} квазіпоперечних хвиль та густини ρ порід колекторів. Розглянуто програмно-алгоритмічні засоби автоматизованої системи чисельного аналізу і візуалізації даних УЗ-вимірювань параметрів анізотропії швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах, які забезпечують урахування неоднорідності складу і будови текстур гірських порід та їх упорядкованості.

За пружними сталими C_{mn} пісковиків Волино-Подільського регіону встановлено, що пружна симетрія є ромбічною, а не поперечно-ізотропною. Для пісковиків коефіцієнти пружної і акустичної анізотропії A_u змінюються в широких межах. Показано, що для них також характерні явища акустичного двопронезаломлення, поляризаційні ефекти і сингулярна поведінка векторів пружних зміщень U навколо акустичних осей, які не збігаються з напрямками осей симетрії текстур. Отримані результати мають важливе значення для побудови сейсмічних моделей реальних геологічних середовищ.

1. *Александров К.С.* Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород / К.С. Александров, Г.Т. Продайвода. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 354 с.
2. *Вишва С.А.* Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. – К.: Обрії, 2004. – 236 с.
3. *Вишва С.А.* Сейсмоакустична діагностика процесів руйнування в геологічному середовищі / С.А. Вишва, Г.Т. Продайвода, Ю.А. Онанко // Геоінформатика. – 2011. – № 1. – С. 42–47.
4. *Ипатенко С.П.* Новое о физике Земли (Начала геономии) / С.П. Ипатенко, А.С. Ипатенко. – Киев: НЧП “Корунд”, 2002. – 194 с.
5. *Левашов С.П.* Оперативное решение практических задач приповерхностной геофизики: от применения неклассических геоэлектрических методов до новой парадигмы геофизических исследований / С.П. Левашов, Н.А. Якимчук, И.Н. Корчагин // Геоінформатика. – 2011. – № 1. – С. 22–31.
6. *Лукієнко О.І.* Структурна геологія. – К.: КНТ, 2008. – 350 с.
7. *Маслов Б.П.* Новый метод математического моделирования процессов разрушения в литосфере / Б.П. Маслов, Г.Т. Продайвода, С.А. Вышва // Геоінформатика. – 2006. – № 3. – С. 53–61.

8. *Продайвода Г.Т.* Пружні постійні і анізотропія об'ємних пружних хвиль пісковиків / Г.Т. Продайвода, С.А. Вижва, О.А. Куликов // Вісн. Київ. ун-ту ім. Т. Шевченка. Геологія. — 1995. — №13. — С. 38–54.
9. *Продайвода Г.Т.* Акустопругіе ефекти в микротрещиноватой геологической среде / Г.Т. Продайвода, Б.П. Маслов, С.А. Вижва // Геофиз. журн. — 2001. — Т. 23, № 5. — С. 92–100.
10. *Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу / Г.Т. Продайвода, С.А. Вижва, І.М. Безродна, Т.Г. Продайвода.* — К.: ВПЦ “Київ ун-т”, 2011. — 367 с.
11. *Томилин Н.Г.* Иерархическая модель разрушения горных пород // Науки о Земле: Физика и механика геоматериалов / Н.Г. Томилин, В.С. Куксенко. — М.: Вузов. кн., 2002. — 116 с.
12. *Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання: Довідник-навч. посібник / [М.І. Толстой, Ю.Л. Гасанов, Н.В. Костенко та ін.]* — К.: ВПЦ “Київ ун-т”, 2003. — 329 с.

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

Надійшла до редакції 26.12.2012 р.

Ю.А. Онанко

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АНИЗОТРОПИИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Рассматриваются программно-алгоритмические способы автоматизированной системы численного анализа данных ультразвуковых измерений параметров анизотропии скоростей в горных породах для экспресс-обработки, которые обеспечивают учет влияния неоднородностей состава и строения текстур горных пород и их упорядоченности. Определены упругие постоянные C_{mn} песчаников Волыно-Подольского района, которые свидетельствуют о ромбической упругой симметрии, а не поперечно-изотропной. Полученные результаты актуальны для построения сейсмических моделей реальных геологических сред.

Ключевые слова: автоматизированная система, коллектор, трещины, ультразвуковые волны, упругие постоянные.

Yu.A. Onanko

AUTOMATED SYSTEM OF DATA MEASURING ANALYSIS OF ANISOTROPY IN ROCKS

Discussed here are program-algorithm methods for numerical analysis by an automated system of ultrasound measuring parameters of anisotropy velocity in rocks for express-treatment, where the effect of heterogeneity of rocks composition and texture as well as their ordering are taken into account. The elastic constants C_{mn} of Volyno-Podolskiy region sandstones are determined, suggesting that elastic symmetry is rhombic and not transversal-isotropic. The obtained results are relevant for designing seismic models of a real geological environment.

Keywords: automated system, collector, cracks, ultrasound waves, elastic constants.