

хвилі, відбитої (коефіцієнт відбиття 0,05) вертикальною поверхнею, віддаленою від свердловини на 300 м (амплітудний коефіцієнт розходження і поглинання порівняно з умовами експерименту приблизно 15), амплітуда має бути в 300 раз меншою. В стільки ж разів зменшиться відношення сигнал-завада і становитиме приблизно 5 одиниць, що достатньо для виділення відбитої хвилі. На основі проведених експериментів є підстави для проведення дослідних робіт у глибоких нафтогазових свердловинах з метою прямого підтвердження можливостей свердловинного сейсмокомплексу у вирішенні завдань дальнього зондування навколосвердловинного середовища.

Висновки. Виконані у дослідних свердловинах випробування дають підстави для позитивних розрахункових оцінок можливості дальнього зондування навколо-

свердловинного простору в радіусі перших сотень метрів. Зроблені оцінки потребують підтвердження шляхом проведення спостережень у глибоких свердловинах та експериментального виділення відбитих хвиль.

1. Андрущенко В.О., Улітко А.Ф. Розробка, виготовлення і випробування приймальної системи комп'ютеризованого свердловинного сейсмокомплексу / Звіт про НДР. – К., 2001. 2. Аппаратура АМЦ-ВСП-3-48, ее особенности, опыт применения и перспективы использования / Мамлеев Т.С., Даниленко В.Н., Дмитриев В.В. и др. // Гальперинские чтения: Матер. конф. – М., 2001. – С.14-17. 3. Воронина Т.А., Черверда В.А. Оптимизационный подход к обработке данных метода вертикального сейсмического профилирования // Геология и геофизика. – 1994. – №5. – С.127-139. 4. Роман В.И., Пігастій С.С., Сиротенко П.Т. та ін. Створення експериментальних зразків технічних і програмних засобів польової і свердловинної сейсморозвідки / Звіт про НДР. – К., 2003. 5. Шехтман Г.А. Состояние и перспективы развития модификаций метода ВСП // Гальперинские чтения: Матер. конф. – М., 2001. – С.2-7.

Надійшла до редколегії 15.09.08

УДК 550.344

Д. Малицький, канд. фіз.-мат. наук, Е. Козловський, пров. інж., О. Хитряк, асп.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ СЕЙСМОГРАМ

Автори пропонують програмне забезпечення для розрахунку сейсмічних полів у горизонтально-шаруватому середовищі на базі матричного методу Томпсона-Хаскела та матриць шостого порядку. Джерело сейсмічних хвиль розміщене в одному із шарів і представлене тензором сейсмічного моменту. Одержані результати математичного моделювання є простими у використанні і можуть застосовуватися для інтерпретації сейсмічних записів. На прикладі землетрусу 11.07.2001 р (m=2,3) показана можливість використання програмного забезпечення для вирішення оберненої задачі сейсмології з визначення компонент тензора сейсмічного моменту за даними однієї станції.

The software for the seismic wave field modeling on a free surface of a layered half-space using the Thompson-Haskell method and 6-th order matrices is suggested. The seismic-wave source is located in the homogeneous isotropic layer and is represented by seismic moment tensor. The results of mathematical modeling are sufficiently simple for utilization and can be used for interpretation of seismic records. On the example of the 11.07.2001 earthquake with m=2,3 the possibility of applying of the software for solving of seismology inverse problem of the seismic moment tensor's components determination with one station data using was shown.

Вступ. Математичне моделювання хвильових процесів у неоднорідних середовищах має важливе значення для вирішення як прямих, так і обернених динамічних задач сейсміки. Розв'язуючи пряму динамічну задачу ми отримуємо компоненти поля переміщення на вільній поверхні шаруватого півпростору. Іншими словами, розв'язок прямої задачі дає нам зміщення ґрунту під час землетрусу, спричинене деяким сейсмічним джерелом, розташованим на певній глибині і збуджуваним пружні хвилі. Для математичного моделювання такого процесу необхідно мати наступні вхідні дані: швидкісну модель середовища та модель сейсмічного джерела. Середовище моделюють по-різному: системою плоско-паралельних однорідних ізотропних шарів, системою тих же шарів, але розділених криволінійними границями. Часто всередині шарів задають деякі неоднорідні включення. Джерело сейсмічних хвиль, з одного боку, можна задавати у вигляді однонаправленої сили або тензора сейсмічного моменту, а з іншого боку – у вигляді стрибка переміщень-напружень. При цьому джерело розглядається як ефективно-точкове.

Слід відзначити, що методи розрахунку теоретичних сейсмограм являються ефективним інструментом для вивчення структури досліджуваного середовища та фізичних процесів у вогнищі землетрусу. Існує безліч методів вирішення прямої динамічної задачі сейсміки, найвідомішими із них є матричний, рефлексивний та променевий методи, а також такі числові методи, як метод скінчених елементів та метод скінчених різниць [1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 14]. Незважаючи на різноманіття постановок математичних задач та методів їх розв'язування, всі вони мають на меті знайти поле переміщення на вільній поверхні. У цьому аспекті важливим є використання декількох методик для побудови сейсміч-

них полів, їх порівняння між собою і реальними записами з метою інтерпретації характеристик джерела.

Геофізичні спостереження, зазвичай, інтерпретуються через вирішення прямої динамічної задачі сейсміки. Для цього створюється спрощена модель середовища, проводяться теоретичні та практичні модельні розрахунки, а отримані величини хвильових полів порівнюють із даними, спостережуваними в ході польового експерименту.

Метою роботи була розробка програмного комплексу для розрахунку сейсмічних полів на основі матричного методу та порівняльний аналіз одержаних з його допомогою результатів з результатами програми ISOSYN [13] і реальними записами конкретної події 11.07.2001 р в районі РГС "Королеве" для вирішення оберненої задачі визначення компонент тензора сейсмічного моменту. На основі теоретичних розрахунків поля переміщень для горизонтально-шаруватого середовища нами розроблено програмний пакет у системі Matlab. У комп'ютерних обчисленнях ми використали реально відому швидкісну модель середовища в районі станції Королеве району Закарпаття [4] та сейсмограму землетрусу, зареєстрованого на РГС "Королеве" (11.07.2001 р, m=2,3). На наш погляд, розв'язання такої проблеми за сейсмічними записами на одній станції є актуальною задачею, що цікавить багатьох сейсмологів [3, 12].

У своїх дослідженнях для пошуку розв'язку прямої динамічної задачі сейсміки ми використовуємо підхід, розроблений нами на базі класичного матричного методу Томсона-Хаскела та його модифікації [1, 2, 7, 9, 10], для випадку коли середовище задане системою однорідних ізотропних плоско-паралельних шарів (рис. 1).

Постановка задачі. Точкове джерело в даній роботі задається у вигляді тензора сейсмічного M_{ij} і розміщу-

ється всередині одного із однорідних ізотропних шарів на s -тій уявній границі.

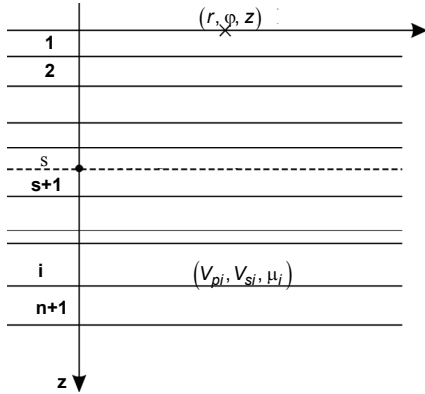


Рис. 1. Модель шаруватого середовища

Середовище моделюється системою, що складається з n однорідних ізотропних плоско-паралельних шарів на $(n+1)$ однорідному півпросторі з вільною поверхнею

(рис. 1). Поле переміщень шукаємо в циліндричній системі координат. Кожний i -тий шар характеризується товщиною шару h , модулем зсуву μ і швидкостями поширення поздовжніх V_{pi} і поперечних V_{si} хвиль. На всіх границях між шарами, крім границі, на якій розміщене джерело, виконуються умови жорсткого контакту, тобто умова неперервності переміщень і напружень.

Поле переміщення описується рівнянням руху. Здаються початкові та граничні умови. Вважається, що напруження на вільній поверхні відсутнє, а у нижньому півпросторі задана умова випромінювання, тобто вважається, що хвилі з півпростору не повертаються.

Для побудови хвильових полів, збуджених ефективно-точковим джерелом, використовується представлення для поля переміщень-напружень через скалярний і векторний потенціали, а також інтегральні перетворення Фур'є-Бесселя-Мелліна.

Використовуючи матричний метод можна показати, що поле переміщення у дальній зоні має наступний вигляд [6-8]:

$$\begin{aligned} u_z^{(0)}(r, \varphi_a, t) &= \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_1(k, \eta, \varphi_a) g_{1z} \cdot e^{k\eta\eta} d\eta + \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_2(k, \eta, \varphi_a) g_{2z} e^{k\eta\eta} d\eta + \\ &+ \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_3(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{3z} \cdot e^{k\eta\eta} d\eta; \\ u_r^{(0)}(r, \varphi_a, t) &= \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_1(k, \eta, \varphi_a) g_{1r} \cdot e^{k\eta\eta} d\eta + \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_2(k, \eta, \varphi_a) g_{2r} e^{k\eta\eta} d\eta + \\ &+ \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_3(k, \eta, \varphi_a) \cdot g_{3r} \cdot e^{k\eta\eta} d\eta; \\ u_\varphi^{(0)}(r, \varphi_a, t) &= \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_5(k, \eta, \varphi_a) g_{5\varphi} \cdot e^{k\eta\eta} d\eta + \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} dk \int_{\delta-j\infty}^{\delta+j\infty} M_6(k, \eta, \varphi_a) g_{6\varphi} e^{k\eta\eta} d\eta, \end{aligned} \quad (1)$$

де J_0, J_1 — функції Бесселя.

Компоненти тензора сейсмічного моменту $M_{xx}, M_{xy}, M_{xz}, M_{yy}, M_{yz}, M_{zz}$ входять у наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} M_1 &= M_{xz} \cos \varphi_a + M_{yz} \sin \varphi_a, \quad M_2 = M_{zz}, \\ M_3 &= \cos^2 \varphi_a \cdot M_{xx} + \sin^2 \varphi_a \cdot M_{yy} + \sin 2\varphi_a \cdot M_{xy} \quad M_5 = \cos \varphi_a M_{yz} - \sin \varphi_a M_{xz}, \\ M_6 &= \sin 2\varphi_a \cdot M_{xx} - \sin 2\varphi_a \cdot M_{yy} - 2 \cos 2\varphi_a \cdot M_{xy}. \end{aligned} \quad (2)$$

Підінтегральні вирази мають такий вигляд [8]:

$$\begin{aligned} g_{1z} &= \frac{d'_{11} d_{31} - d'_{31} d_{11}}{\Delta} \cdot \frac{1}{2\pi\mu_s}, \quad g_{3z} = \frac{d'_{13} d_{31} - d'_{33} d_{11}}{\Delta} \cdot \frac{1}{2\pi}, \\ g_{2z} &= \left\{ \frac{d'_{12} d_{31} - d'_{32} d_{11}}{\Delta} \cdot \frac{1}{\rho_s V_{pi}^2} + \frac{d'_{13} d_{31} - d'_{33} d_{11}}{\Delta} \cdot \left(\frac{2V_{si}^2}{V_{pi}^2} - 1 \right) \right\} \cdot \frac{1}{2\pi}, \\ g_{1r} &= \frac{d'_{31} d_{12} - d'_{11} d_{32}}{\Delta} \cdot \frac{1}{2\pi\mu_s}, \quad g_{3r} = \frac{d'_{33} d_{12} - d'_{13} d_{32}}{\Delta} \cdot \frac{1}{2\pi}, \\ g_{2r} &= \left\{ \frac{d'_{32} d_{12} - d'_{12} d_{32}}{\Delta} \cdot \frac{1}{\rho_s V_{pi}^2} + \frac{d'_{33} d_{12} - d'_{13} d_{32}}{\Delta} \cdot \left(\frac{2V_{si}^2}{V_{pi}^2} - 1 \right) \right\} \cdot \frac{1}{2\pi}, \\ g_{5\varphi} &= -\frac{d_{12}^*}{d_{11}^*} \cdot \frac{1}{2\pi\mu_s}, \quad g_{6\varphi} = -\frac{d_{11}^*}{d_{11}^*} \cdot \frac{1}{4\pi}. \end{aligned} \quad (3)$$

$D = (d_{ij})_{i,j=\overline{1,4}}$, та $D^* = (d_{ij}^*)_{i,j=\overline{1,2}}$ — характеристичні матриці n -шаруватого середовища на $(n+1)$ -півпросторі ($P-SV$ та SH задачі відповідно).

$D' = (d'_{ij})_{i,j=\overline{1,4}}$, та $D'^* = (d'_{ij}^*)_{i,j=\overline{1,2}}$ — характеристичні матриці середовища під джерелом ($P-SV$ та SH задачі відповідно).

Елементи вищенаведених матриць визначаються фізичними параметрами моделі середовища в i -му шарі: μ_i , ρ_i , V_{Pi} , V_{Si} . У формулах (3) значення фізичних параметрів V_P , V_S , μ , ρ визначені для s -го шару, в якому розміщене вогнище землетрусу.

Знаменник Δ є мінором другого порядку характеристичної матриці всього середовища [8]:

$$\Delta = d_{11} d_{12} - d_{13} d_{12}. \quad (4)$$

Характеристична матриця всього середовища $D \in C^{4 \times 4}$ має вигляд (P -SV задача):

$$D = (d_{ij})_{i,j=1,4} = A_{n+1}^{-1} A_n L_n A_{n-1} \dots A_2^{-1} A_1 A_1^{-1}. \quad (5)$$

Кожен множник (5) є матрицею четвертого порядку і їх вигляд наведений у роботі [8]. Від матриць четвертого порядку ми перейшли до матриць шостого порядку, щоб позбутися невизначеностей в мінорах типу (4). Поле переміщення для SH -задачі не потребує використання матриць вищого порядку. Для переходу ми скористалися роботами професора Л.А. Молоткова [9, 10], в яких здійснюється перехід від матриць 4×4 до мат-

риць 6×6 . Кожній матриці $F \in C^{4 \times 4}$ ставиться у відповідність матриця $\tilde{F} \in C^{6 \times 6}$.

Елементами матриці $\tilde{F}$ є мінори другого порядку матриці F , тобто

$$F_{lm}^{ik} = \begin{vmatrix} f_{il} & f_{im} \\ f_{kl} & f_{km} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

$\tilde{D} \in C^{6 \times 6}$ – характеристична матриця всього середовища 6×6 .

Детальніше такий перехід описаний у роботі [8].

Чисельні експерименти. Для розрахунку хвильового поля на вільній поверхні шаруватого півпростору використовуємо формули для поля переміщення на вільній поверхні (1)–(3). Для порівняння з реальними даними використовуємо швидкісну модель району Закарпаття біля станції "Королеве" (табл. 1), побудовану на основі розрізу земної кори [4], та сейсмічні записи землетрусу (рис. 2) з магнітудою $M=2,3$, зареєстрованого на цій станції 11.07.2001 р (Закарпаття, р-н Н. Селище). Епіцентрально відстань $r = 19 \text{ км}$.

Таблиця 1. Модель середовища: сім шарів на півпросторі

Номер шару	V_P	V_S	h	ρ
1	5000	3000	3500	$2,3 \cdot 10^3$
2	5300	3120	1500	$2,5 \cdot 10^3$
3	6300	3700	1000	$2,65 \cdot 10^3$
4	6300	3700	1000	$2,65 \cdot 10^3$
5	6400	3760	1500	$2,96 \cdot 10^3$
Півпростір	6850	4020	∞	$3,35 \cdot 10^3$

В табл.1 представлені параметри моделі з п'яти шарів на півпросторі, яка використовується в розрахунках. Джерело розміщене у третьому шарі на глибині 6 км. Третій шар уявною границею розбитий на дві частини з однаковими параметрами. В цій моделі часи вступів P та S хвиль співпадають для реальної та синтетичних сейсмограм.

Для того, щоб порівняти результати, отримані розробленою нами програмою Matlab та програмою ISOSYN із сейсмічним записом реального землетрусу, ми добивалися подібності величини та форми амплітуд методом підбору параметрів тензора сейсмічного моменту.

В результаті перебору параметрів тензора сейсмічного моменту у вогнищі землетрусу (орієнтацію площини розриву за допомогою відповідних кутів), були встановлені оптимальні значення вищезгаданих величин у рамках даної моделі джерела і середовища. Визначе-

ний тензор сейсмічного моменту характеризується наступними параметрами:

$$M = \begin{pmatrix} 5.687 \cdot 10^{16} & 7.805 \cdot 10^{16} & 1.498 \cdot 10^{16} \\ 7.805 \cdot 10^{16} & 2.046 \cdot 10^{16} & 9.594 \cdot 10^{16} \\ 1.498 \cdot 10^{16} & -9.594 \cdot 10^{16} & 7.733 \cdot 10^{16} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

Використовуючи розроблений програмний пакет MATLAB, одержуємо чисельні розрахунки хвильового поля, згідно з формулами (1)–(3), (7) і таблицею 1. Результати програмних обчислень наведені на рисунку 3 б. На ньому приводяться результати розрахунку поля сейсмічних хвиль з використанням формул (1). Зміщення приведені до декартової системи координат для порівняння результатів із реальними записами (рис. 2) та аналогічними результатами, одержаними за допомогою програми ISOSYN (рис. 3 а).

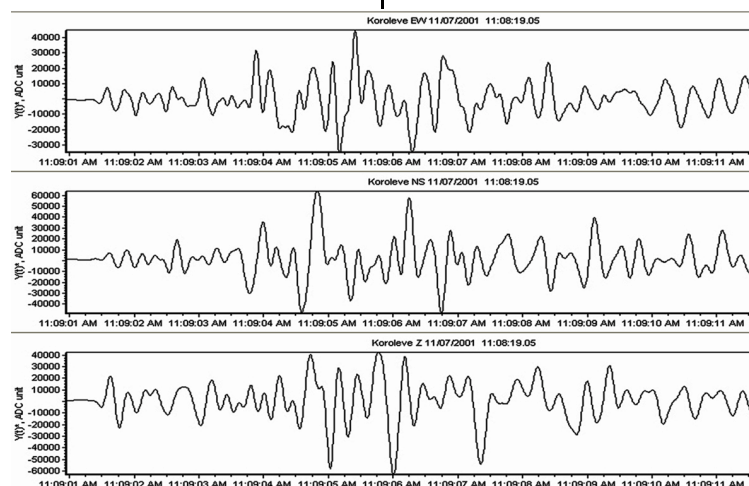


Рис. 2. Компоненти $u_x^{(0)}$, $u_y^{(0)}$, $u_z^{(0)}$ поля переміщень на вільній поверхні при $r = 19 \text{ км}$.

Землетрус зареєстрований станцією "Королеве" 11.07.2001 р. Закарпаття, р-н Н. Селища

Порівнюючи три рисунки, ми бачимо, що часи вступу P та S -хвиль співпадають, тобто $t_p = 3,7$ і $t_s = 5,9$. Різниця $t_p - t_s = 2,2$, що відповідає реальному запису.

Амплітудні значення для зміщень P та S -хвиль, порохованих матричним методом, програмою ISOSYN та на реальних записах співрозмірні і форми сигналів подібні.

Висновок. Порівнюючи результати програми, розробленої авторами на основі матричного методу, з результатами, отриманими програмою ISOSYN, та з реальними записами сейсмічних подій, можемо стверджувати, що теоретичні розрахунки дають значення сейсмічних полів, близькі до реальних.

Використовуючи метод підбору параметрів тензора сейсмічного моменту у запропонованому пакеті програм, розробленому у системі Matlab, та змінюючи кут нахилу

площини розриву у програмі ISOSYN, можна добитися схожості форм основних типів хвиль, знаків вступів перших хвиль та різниці між часами вступів P та S хвиль на реальних записах та на теоретичних сейсмограмах. Отже, порівнюючи результати розрахунків за двома програмами із параметрами записів реальних землетрусів, можна методом підбору визначати тензор сейсмічного моменту реальних землетрусів, що є важливим для вивчення механізму вогнища. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку більш досконалої, ніж метод підбору, методики вирішення оберненої динамічної задачі сейсмології з визначення параметрів вогнища землетрусу за сейсмічними записами на основі представленої в статті методики вирішення прямої задачі.

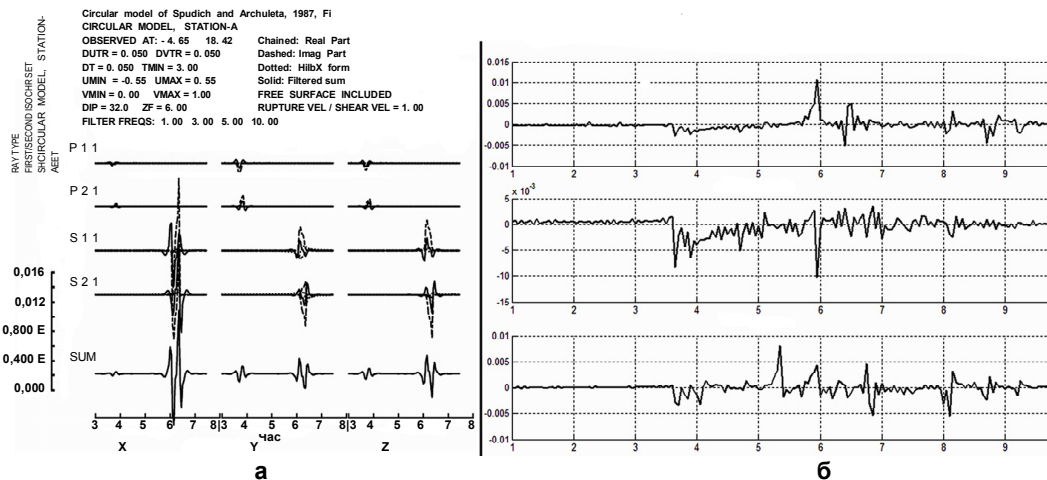


Рис. 3. Компоненти $u_x^{(0)}, u_y^{(0)}, u_z^{(0)}$ поля переміщень на вільній поверхні при $r = 19\text{ км}$, пороховані за допомогою програми ISOSYN (а) та за допомогою Matlab (б)

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. – М., 1983. – Т. 1, 2. 2. Dunkin J.W. Computation of modal solutions in layered elastic media at high frequencies. // Bul. Seismol. Soc. Amer. – 1965. – Vol. 55. – N 2. – P. 335–358. 3. Guangwei Fan, Terry Wallace. The determination of source parameters for small earthquakes from a single, very broadband seismic station // Geophysical research letters. – 1991. – Vol. 18. – N 8. – P. 1385–1388. 4. Карпатський геодинамічний полігон / Под ред. Я.С. Подстригача і А.В. Чекунова. – М., 1978. 5. Kennet B.L.N. The seismic wavefield // University Press. – Cambridge, 2001. 6. Малицький Д.В. Основні принципи розв'язання динамічної задачі сейсмології на основі рекурентного підходу // Геофіз. журн. – 1998. – N 5. – С. 96–98. 7. Малицький Д.В., Муїла О.О. Про застосування матричного методу і його модифікацій для дослідження поширення сейсмічних хвиль у шаруватому середовищі // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – 2007. – С. 124–136. 8. Малицький Д.В., Хитряк О.І. Математичне моделювання хвильових процесів у шаруватому півпросторі з використан-

ням матриць шостого порядку // Геоінформатика. – 2008. – N 4 (в друці). 9. Молотов Л.А. Исследование распространения волн в пористых и трещиноватых средах на основе эффективных моделей Био и слоистых сред. – М., 2001. 10. Молотов Л.А. Матричный метод в теории распространения волн в слоистых, упругих и жидких средах. – М., 1984. 11. Müller G. The reflectivity method: a tutorial // Geophys. J. – 1985. – N 58. – P. 153–174. 12. So Gu Kim, Kraeva N. Source parameter determination of local earthquakes in Korea using moment tensor inversion of single station data // Bul. Seismol. Soc. Amer. – 1999. – Vol. 89. – N 4. – P. 1077–1080. 13. Spudich P., Frazer L.N. Use of ray theory to calculate high frequency radiation from earthquake sources having spatially variable rupture velocity and stress drop // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1984. – Vol. 74. – P. 2061–2082. 14. Червень В. Расчет синтетических сейсмограмм для одномерных и двумерных сред. Численные методы в сейсмических исследованиях. – Новосибирск, 1983. – С. 41–53.

Надійшла до редколегії 25.09.08

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.83:622,275

В. Курганський, д-р геол.-мінералог. наук, В. Колісніченко, канд. геол.-мінералог. наук, В. Маляр, асп.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ "МОНТЕ-КАРЛО" ПРИ ІМОВІРНІСНИХ РОЗРАХУНКАХ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ОЦІНКОЮ ЗАПАСІВ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ СИРОВИНИ

Показано доцільність застосування розрахункових параметрів та їх результатуючих значень у вигляді імовірнісних функцій для вирішення задачі підрахунку запасів вуглеводнів. Продемонстровані можливості методу "Монте-Карло" при вирішенні поставленої задачі. Коротко наведений алгоритм розрахунків та продемонстровані як кінцеві, так і поточні результати досліджень.

It is describing the application of the probability functions for determination calculation parameters. Application of "Monte Carlo" method for estimation of hydrocarbonic reserves is shown. Algorithm of calculations and research results are described.

Вступ. Підрахунок запасів нафти, газу та газоконденсату – складна, трудомістка і досить важлива задача,

правильне вирішення якої визначає подальшу раціональну розвідку і ефективну розробку родовища.