

Д. МАЛИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, А. ГНИП<sup>1</sup>, О. ГРИЦАЙ<sup>1</sup>, А. МУРОВСЬКА<sup>2</sup>, С. КРАВЕЦЬ<sup>1</sup>,  
Е. КОЗЛОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, А. МИКИТА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3б, тел. +38(032)2648563, ел. пошта dmalytskyu@gmail.com, grycaj.oksana@gmail.com

<sup>2</sup>Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, 03680, м. Київ, пр. Палладіна, 32, Україна, тел. +38(044)4240112

## МЕХАНІЗМ ВОГНИЩА І ТЕКТОНІЧНИЙ КОНТЕКСТ ЗЕМЛЕТРУСУ 29.09.2017 р. ПОБЛИЗУ м. СТЕБНИК

<https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.100>

**Мета.** Метою роботи є визначення механізму вогнища землетрусу, який відбувся 29.09.2017 р. поблизу м. Стебник ( $21^{\text{h}}46^{\text{m}}8,4^{\text{s}}$ ,  $\varphi = 49,34^{\circ}$ ,  $\lambda = 23,49^{\circ}$ ,  $h = 1,9$  км,  $MD = 2,9$ ) двома методами – за знаками вступів Р-хвиль та методом інверсії хвильових форм за даними обмеженої кількості станцій. **Методика.** Моделювання сейсмічних хвиль у неоднорідному середовищі, представленому у вигляді горизонтально-шаруватої пружної структури, здійснюється матричним методом. Співвідношення, отримані для полів переміщень на вільній поверхні півпростору, використано для визначення тензора сейсмічного моменту як функції часу шляхом виділення тільки прямих Р-хвиль. У роботі використано також метод визначення механізму вогнища землетрусу за знаками вступів Р-хвиль на станціях. **Результати.** У роботі представлено розв'язання оберненої задачі щодо визначення механізму вогнища землетрусу методом інверсії хвильових форм у випадку обмеженої кількості станцій та за знаками вступів Р-хвиль на станціях. Показано, що фокальний механізм, визначений за вступами Р-хвиль надійніший. Зіставлення характеристик землетрусу, механізму його вогнища з тектонічною будовою регіону дає змогу пов'язати землетрус з насумом другого порядку в межах аллохтонної частини Самбірського покриття. **Наукова новизна.** Обернення хвильових форм лише прямих Р-хвиль, запропоноване в роботі, дає змогу визначити механізм вогнища землетрусу за даними малої кількості станцій, що особливо актуально у регіонах з порівняно невисоким рівнем місцевої сейсмічної активності, до яких належить Передкарпаття. Механізм стебницького землетрусу 29.09.2017 р є одним з перших, визначених у межах Передкарпатського прогину; зіставлення механізму з даними про геологічну будову регіону дало змогу з'ясувати ймовірні тектонічні передумови землетрусу і пов'язати його зі зсувом ґрунту поблизу м. Стебник. **Практична значущість.** Одна із нодальних площин, визначеного в роботі механізму вогнища, є площиною розриву землетрусу, який найімовірніше став причиною екологічної катастрофи – зсуву ґрунту поблизу м. Стебник приблизно о  $21^{\text{h}}47^{\text{m}}0,0^{\text{s}}$  GMT 29.09.2017 р.

*Ключові слова:* землетрус, сейсмічні хвилі, матричний метод, механізм вогнища, тензор сейсмічного моменту, часова функція вогнища, осадові відклади, Самбірський покрив.

### Вступ

29.09.2017 р. поблизу м. Стебник, на території Стебницького ВО «Полімінерал», де протягом декількох десятиліть відбувалося видобування калійних солей, приблизно о  $21^{\text{h}}47^{\text{m}}0,0^{\text{s}}$  GMT сталася екологічна катастрофа – зсув ґрунту, внаслідок якого утворилося провалля діаметром більше ніж 200 м і глибиною понад 50 м. Зсув ґрунту найімовірніше був пов'язаний із землетрусом, який відбувся за декілька десятків секунд перед ним – о  $21^{\text{h}}46^{\text{m}}8,4^{\text{s}}$  GMT, на глибині  $h = 1,9$  км, з магнітудою  $MSH = 2,6$  і з координатами епіцентру  $\varphi = 49,34^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda = 23,49^{\circ}\text{E}$  (за даними Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України).

Відстань від епіцентра землетрусу до місця зсуву становила приблизно 5 км. Поштовхи, спричинені землетрусом, могли призвести до обвалу порожнин, що утворилися під час

видобування калійних солей підземним способом і подальшого розвитку неконтрольованих фільтраційно-суфозійних і карстових процесів. Усебічне з'ясування причин катастрофічного зсуву 29.09.2017 р., характеру і ступеня небезпеки, пов'язаної з місцевими землетрусами в майбутньому, постає як важливе й актуальне завдання. Однією з її складових є виявлення можливих тектонічних передумов землетрусу 29.09.2017 р., що зокрема передбачає і визначення механізму його вогнища.

Основною кількісною характеристикою вогнища землетрусу є тензор сейсмічного моменту, який визначають за допомогою різних методів: з використанням амплітуд сейсмічних хвиль [Godano та ін., 2011, Vavrychuk, Kuhn, 2012], співвідношення амплітуд S- і Р-хвиль [Hardebeck, Shearer, 2003, Miller та ін., 1998] та повних хвильових форм [Малицький, 2010, Dziewonski та ін., 1981, Kikuchi, Kanamori, 1991, Sileny та ін., 1992, Sipkin, 1986]. Усі ці методи передбачають

розв'язування прямих та обернених задач. Підходи з використанням горизонтально-шаруватої моделі Землі – найпоширеніші, як під час вивчення вогнищ землетрусів, так і будови земної кори. Основні методи моделювання сейсмічних хвиль, розв'язання прямих та обернених задач викладено в книгах та монографіях: [Aki, Richards, 2002], [Ben-Menahem, Singh 1981], [Kennet, 1972, 2002] та [Fuchs, Muller 1971, Muller, 1985] (рефлективний метод); [Wiggins, Helmberger, 1974] (узагальнений променевий метод); [Cormier, Richards, 1977] (повна хвильова теорія); [Chapman, 1957] (WKBJ теорія); [Alekseev, Mikhailenko, 1980], [Bouchon, 1981], [Молотков, 1984, 2001], [Малицький, 2016] (матричний метод).

У роботі [Малицький, 2016] запропоновано удосконалену версію матричного методу моделювання поширення сейсмічних хвиль у шаруватому середовищі. Вирази, отримані для поля переміщень на вільній поверхні, зумовлених лише прямими Р- і S-хвилями, використано для обчислення тензора сейсмічного моменту як функції часу. Визначення механізмів вогнищ землетрусів у Карпатському регіоні України є однією з найактуальніших задач сейсмологічних досліджень. За умов порівняно невисокого рівня місцевої сейсмічної активності та недостатньої кількості сейсмічних станцій у регіоні виникає необхідність розробляти нові та удосконалювати вже наявні методи визначення механізму вогнища [Малицький, 2010, 2016, D'Amico, 2014, Malyskyu, Kozlovskyu, 2014].

### Мета

Метою роботи є визначення механізму вогнища землетрусу, який відбувся 29.09.2017 р. поблизу м. Стебник ( $21^{\text{h}}46^{\text{m}}8,4^{\text{s}}$ ,  $\varphi = 49,34^{\circ}$ ,  $\lambda = 23,49^{\circ}$ ,  $h = 1,9$  км,  $MD = 2,9$ ) двома методами – за знаками вступів Р-хвиль та методом інверсії хвильових форм за даними обмеженої кількості станцій.

### Методика

#### Визначення механізму вогнища за знаками вступів Р-хвиль

Найчастіше (і традиційно) механізм вогнища землетрусу визначають за знаками перших вступів Р- і S-хвиль на станціях. На стереографічній сітці, що є проекцією нижньої півкулі фокальної сфери з центром у вогнищі, у точках з координатами, що відповідають азимуту станції і кутові виходу променя Р-хвилі з вогнища на станцію, зображують знаки перших вступів Р-хвиль на станціях [Малицький, Грицай, 2017]. Відтак визначають оптимальне розташування нодальних площин, які відділяють сектори розтягу і стиску.

Утім, доволі часто через недостатню кількість станцій з чіткими вступами однозначно визначити площини неможливо. Аби цьому зарадити

запропоновано використати додаткову інформацію через врахування зокрема і нечітких вступів [Малицький та ін., 2017], якими раніше зазвичай нехтували. Оскільки нечіткі вступу, як правило, відповідають Р-хвилям, випроміненим у напрямку між секторами розтягу і стиску, на фокальній сфері, вони мали б опинитися близько до нодальних площин. Врахування нечітких вступів може, таким чином, зменшити ступінь невизначеності площин і підвищити їхню точність. З іншого боку, значення логарифму співвідношення між амплітудами вступів S- і Р-хвиль на станціях з нечіткими вступами, як правило, значно більше ніж на інших станціях. Порівнювання цього співвідношення на різних станціях теж може зменшити невизначеність площин. У разі ж коли за знаками перших вступів – навіть з урахуванням нечітких вступів і співвідношення амплітуд S- і Р-хвиль – однозначно визначити фокальний механізм неможливо, автори роботи запропонували метод обернення хвильових форм, зареєстрованих на обмеженій кількості станцій [Малицький, 2010, 2016].

### Метод обернення хвильових форм

Якщо вогнище землетрусу моделюється як точкове, метою методів обернення хвильових форм є визначення тензора сейсмічного моменту за переміщеннями, зареєстрованими сейсмічними станціями на поверхні. Достовірність результатів обернення хвильових форм залежить від виконання двох основних умов: по-перше, передбачено, що точкова модель вогнища чинна, і тензор сейсмічного моменту є його адекватним представленням; по-друге, що швидкісна модель середовища між вогнищем і станцією близька до дійсності.

Поширення сейсмічних хвиль від точкового вогнища зумовлює поле переміщень на вільній поверхні горизонтально-шаруватого середовища, яке у циліндричній системі координат записується як:

$$\begin{pmatrix} u_z^{(0)} \\ u_r^{(0)} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^3 \int_0^{\infty} k^2 \mathbf{I}_i L^{-1} [m_i g_i] dk, \\ u_j^{(0)} = \sum_{i=5}^6 \int_0^{\infty} k^2 J_i L^{-1} [m_i g_{j i}] dk, \quad (1)$$

де  $u_z^{(0)}(t, r, j)$ ,  $u_r^{(0)}(t, r, j)$  та  $u_j^{(0)}(t, r, j)$  – складові переміщень у циліндричній системі координат,

$$\begin{aligned} m_1 &= M_{xz} \cos j + M_{yz} \sin j, \quad m_2 = M_{zz}, \\ m_3 &= \cos^2 j \cdot M_{xx} + \sin^2 j \cdot M_{yy} + \sin 2j \cdot M_{xy}, \\ m_4 &= -\cos 2j \cdot M_{xx} + \cos 2j \cdot M_{yy} - 2 \sin 2j \cdot M_{xy}, \\ m_5 &= M_{yz} \cos j - M_{xz} \sin j, \\ m_6 &= \sin 2j \cdot M_{xx} - \sin 2j \cdot M_{yy} - \\ &\quad - 2 \cos 2j \cdot M_{xy}, \end{aligned} \quad (2)$$

$M_{xx}, M_{xy}, \dots, M_{zz}$  – частотні спектри декартових складових тензора моменту  $\mathbf{M}$ , який представляє вогнище в  $r = 0$ , вісь  $x$  спрямована на північ, а  $y$  – на схід,  $j$  – кут азимуту станції,  $k$  – горизонтальне хвильове число, функції  $\mathbf{g}_i = (g_{zi}, g_{ri})^T$  і  $g_{ji}$  описують поширення хвиль між вогнищем і станцією,  $\mathbf{I}_1 = \begin{pmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_0 \end{pmatrix}$ ,

$\mathbf{I}_2 = \begin{pmatrix} J_0 & 0 \\ 0 & J_1 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_2$ ,  $J_5 = J_0$ ,  $J_6 = J_1$ , – функції

Бесселя аргумента  $kr$ , і  $L^{-1}$  – обернене перетворення Лапласа, з ділянки частот у часову [Малицький, 2010, 2016].

Рівняння (1) у матричній формі лише для прямих P- і S-хвиль на вільній поверхні півпростору у ділянці частот і хвильових чисел ( $\omega$ ,  $k$ ) матиме вигляд [Малицький, 2010]:

$$\mathbf{U}^{(0)} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{M}, \quad (3)$$

де вектор

$$\mathbf{U}^{(0)} = (U_x^{(0)P}, U_x^{(0)S}, U_y^{(0)P}, U_y^{(0)S}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S})^T$$

містить шість декартових складових переміщень лише прямих P- і S-хвиль, вектор  $\mathbf{M} = (M_{xz}, M_{yz}, M_{zz}, M_{xx}, M_{yy}, M_{xy})^T$  містить шість незалежних декартових складових тензора моменту  $\mathbf{M}$ , а матриця

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{11}^P & K_{12}^P & K_{13}^P & K_{14}^P & K_{15}^P & K_{16}^P \\ K_{21}^S & K_{22}^S & K_{23}^S & K_{24}^S & K_{25}^S & K_{26}^S \\ K_{31}^P & K_{32}^P & K_{33}^P & K_{34}^P & K_{35}^P & K_{36}^P \\ K_{41}^S & K_{42}^S & K_{43}^S & K_{44}^S & K_{45}^S & K_{46}^S \\ K_{51}^P & K_{52}^P & K_{53}^P & K_{54}^P & K_{55}^P & K_{56}^P \\ K_{61}^S & K_{62}^S & K_{63}^S & K_{64}^S & K_{65}^S & K_{66}^S \end{pmatrix}$$

описує поширення хвиль між вогнищем і станцією і переходи між циліндричними координатами і декартовими.

Якщо розглядають лише прямі P-хвилі, матриця  $\mathbf{K}$  зводиться до вигляду

$$\mathbf{K}^P = \begin{pmatrix} K_{11}^P & K_{12}^P & K_{13}^P & K_{14}^P & K_{15}^P & K_{16}^P \\ K_{21}^P & K_{22}^P & K_{23}^P & K_{24}^P & K_{25}^P & K_{26}^P \\ K_{31}^P & K_{32}^P & K_{33}^P & K_{34}^P & K_{35}^P & K_{36}^P \end{pmatrix}.$$

Таким чином рівняння (3) можна записати лише для прямих P-хвиль у матричній формі:

$$\mathbf{U}^{(0)P} = \mathbf{K}^P \cdot \mathbf{M}, \quad (4)$$

де компоненти вектора

$$\mathbf{U}^{(0)P} = (U_x^{(0)P}, U_y^{(0)P}, U_z^{(0)P})^T$$

відповідають лише прямим P-хвилям.

Мінімально-квадратичний розв'язок перевизначеної системи (4) щодо  $\mathbf{M}$  (оскільки маємо  $3 \times k \times w$  рівнянь для  $6 \times w$  невідомих) можна отримати шляхом узагальненого обернення [Aki, Richards, 2002]:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{K}^P \mathbf{K}^P)^{-1} \mathbf{K}^P \mathbf{U}^{(0)P}, \quad (5)$$

де хвилька означає комплексне спряження і транспозицію,  $-1$  – обернення, а  $(\mathbf{K}^P \mathbf{K}^P)^{-1} \mathbf{K}^P$  – узагальнене обернене до  $\mathbf{K}^P$ .

Тензор сейсмічного моменту (5) обчислюється для всіх частот  $\omega$  і хвильових чисел  $k$ . Частотна функція вектора складових тензора моменту  $\mathbf{M}_{lm}(\omega)$  обчислюється в рівнянні (5), а застосувавши перетворення Фур'є, отримуємо часову функцію вектора складових тензора сейсмічного моменту  $\mathbf{M}_{lm}(t)$ :

$$\mathbf{M}_{lm}(t) = \mathbf{M}_{lm} \cdot STF(t), \quad (6)$$

де  $\mathbf{M}_{lm}$  – вектор складових тензора сейсмічного моменту  $\mathbf{M}$ ,  $STF(t)$  – часова функція джерела. У представленні (6) фокальний механізм не залежить від часу. Попри те, що насправді часто може виникати залежність механізму від частотного діапазону досліджуваних хвиль [Vavrychuk, Kuhn, 2012], припущення про незалежність механізму від часу є задовільним наближенням у частотному діапазоні лише прямих P- і S-хвиль. Треба зазначити, що розв'язок (5) щодо тензора сейсмічного моменту отримано з використанням хвильових форм прямих P-хвиль, зареєстрованих лише на одній станції. Початкову систему (4) можна однак переформулювати і для більшої кількості станцій [Малицький, 2016], що може лише підвищити ступінь обумовленості задачі, а відповідно і точність отриманого розв'язку.

### Результати

#### Механізм вогнища землетрусу

Механізм вогнища землетрусу 29.09.2017 р. поблизу м. Стебник ( $21^{\circ}46'8,4''$ ,  $\phi = 49,34^{\circ}$ N,  $\lambda = 23,49^{\circ}$ E,  $h = 1,9$  км,  $MSH = 2,6$ ) визначали у роботі двома способами: за знаками вступів P-хвиль і методом обернення хвильових форм. Під час визначення фокального механізму за знаками вступів P-хвиль використано горизонтально-шарувату модель середовища з параметрами, наведеними у табл. 1, на основі якої обчислювали кути виходу P-хвилі з вогнища на станції (табл. 2).

Таблиця 1

#### Швидкісна модель

Table 1

#### Velocity model

Глибина, км	$V_p$ , км/год	$V_s$ , км/год
0–3	3,2	1,88
3–5	4,5	2,65
5–6,5	5,5	3,24
6,5–8	6,3	3,71
8–12	6,2	3,65
12–17,5	6,7	3,94
17,5–21	6,85	4,03
21–26,5	6,4	3,76
26,5	8,1	4,76

Таблиця 2

Дані для визначення механізму вогнища за знаками вступів Р-хвиль

Table 2

Data for determining the source mechanism from polarities of first P-waves

Станція	Знак	Епіцентральна відстань, км	Азимут, град	Кут виходу, град
SHIU	-	15,6	216	59
MORS	+	37	128	48
LVV	-	66,4	36	48
MEZ	-	91,4	179	44
STNU	+	101,4	133	44
MUKU	-	114,3	211	44
BRIU	-	116,2	197	44
UZH	-	117,6	228	44
HOLU	-	120,8	222	44
NSLU	-	126,6	181	44
KORU	+	134	191	35
BERU	-	137,2	207	35
TRSU	-	143,4	196	35
RAKU	+	153,9	161	35
KSV	+	161,9	134	35
HORU	-	213,3	93	35
KMPU	+	233,3	111	35

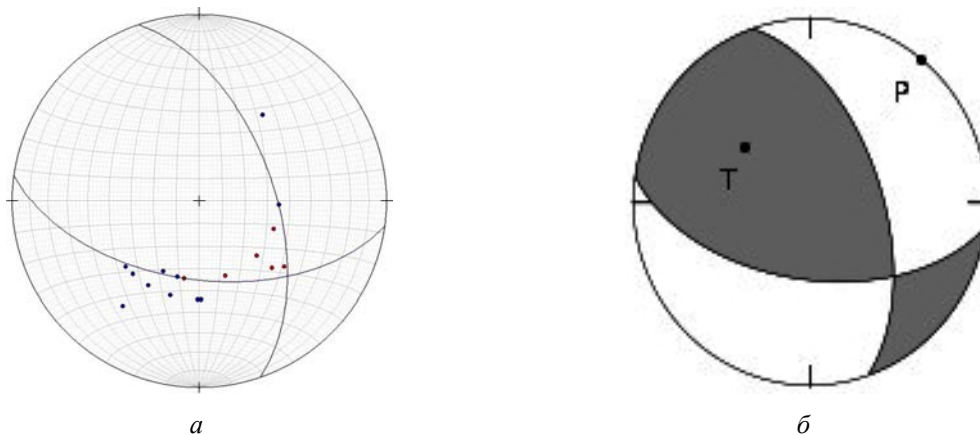


Рис. 1. а – визначення нодальних площин для землетрусу 29.09.2017

за знаками вступів Р-хвиль на 17 станціях; б – відповідний фокальний механізм з квадрантами стиску (темний) і розтягу (світлий) та осями стиску Р і розтягу Т. Параметри механізму наведено в табл. 3 і табл. 4

Fig. 1. a – Determining of nodal planes for the earthquake 29.09.2017 from polarities of first arrivals of P-waves at 17 stations; b – The corresponding focal mechanism solution with compression quadrants (black) and tension quadrants (light) and axes of compression P and tension T. The parameters of solution are listed in Tables 3 and 4

Механізм вогнища, зображений на рис. 1, визначено за знаками вступів Р-хвиль на 17 станціях Карпатської мережі (дані Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України). Параметри механізму та осей стиску і розтягу наведено в табл. 3 і 4.

На рис. 2 зображено механізм, визначений для землетрусу 29.09.2017 методом обернення хвильових форм, зареєстрованих лише станцією SHIU. Параметри відповідних нодальних площин наведено в табл. 5. Під час обчислення хвильових форм використовувалась та сама горизонтально-шарувата модель середовища, що і під час визначення механізму за знаками вступів (табл. 1).

Таблиця 3

**Параметри фокального механізму, визначеного за знаками вступів Р-хвиль**

Table 3

**The parameters of focal mechanism solution determined from polarities of first P-waves**

Нодальні площини	Кут простягання, град	Кут падіння, град	Кут ковзання, град
NP1	341	57	137
NP2	98	55	42

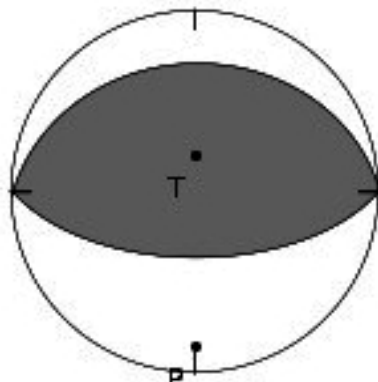
Таблиця 4

**Параметри осей стиску та розтягу механізму за знаками вступів Р-хвиль**

Table 4

**The parameters of compression and tension axes determined from polarities of first P-waves**

Осі стиску/розтягу	Азимут, град	Кут падіння, град
Вісь Р	40	1
Вісь Т	308	52



**Рис. 2.** Механізм вогнища землетрусу поблизу м. Стебник, визначений через обернення хвильових форм, зареєстрованих лише станцією SHIU (епіцентрально відстань  $r = 16$  км, Східниця)

**Fig. 2.** The source mechanism for the Stebnyk earthquake determined by inversion of waveforms registered only at the station SHIU (at epicentral distance  $r = 16$  km, Skhidnytsia)

Як помітно з рис. 1 і 2 і механізми вогнища, визначені для стебницького землетрусу різними способами дещо відрізняються. Механізм, визначений за хвильовими формами, відповідає чистому насуву у майже точно північному або південному напрямку, тоді як визначений за знаками вступів містить невелику компоненту лівостороннього зсуву. Утім, оскільки обидва механізми означають переважно насув і навіть одна з площин розриву в них майже збігається можна вважати, що ця відмінність не докорінна.

Однак те, що під час визначення механізму за знаками вступів використано дані набагато більшої кількості станцій ніж за хвильовими формами, становить вагому причину вважати перший механізм (рис. 1, табл. 2 і 3) обґрунтованішим і зосередити наш подальший аналіз саме на ньому. Визначення механізму вогнища за інверсією хвильових форм планується з використанням більшої кількості станцій, що буде показано в наступних роботах.

Таблиця 5

**Параметри нодальних площин, визначених шляхом обернення хвильових форм**

Table 5

**The parameters of nodal planes determined by inversion of waveforms**

Нодальні площини	Кут простягання, град	Кут падіння, град	Кут ковзання, град
NP1	268	30	88
NP2	90	60	91

**Загальна тектонічна ситуація досліджуваного регіону**

Українські Карпати є частиною Східних Карпат, які формують північне завершення Альпійського складчастого поясу. Вони складаються з тектонічних покривів, що насунуті один на одного та на Східноєвропейську платформу і формують давню акреційну призму [Геологічна..., 2007, Гнилко, 2011, Csontos, Vörös, 2004]. Згідно з тектонічною схемою Українські Карпати поділяються на Передкарпатський передовий прогин, Зовнішні (Флішеві) Карпати та Закарпатський прогин. Передкарпатський прогин складається з Більче-Волицької зони (Зовнішня зона) та Самбірського покриву (Внутрішня зона) [Геологічна..., 2007, Csontos, Vörös, 2004].

Район, де стався стебницький землетрус, у тектонічному відношенні розташований у межах Самбірського покриву (СП) [Геологическое..., 1979, Тектоническая..., 1986], який на північному сході обмежується головним карпатським насувом, за межами якого зберігається корінний порядок залягання порід (рис. 3). Осадові відклади Самбірського покриву нагромаджувались у міоцені на краю платформи у передовому прогині перед фронтом Карпатської насувної споруди і у формаційному відношенні є типовою моласою. Під тиском складчасто-насувної споруди, що продовжувала просуватись, моласові відклади Внутрішньої зони прогину (майбутнього Самбірського покриву) були деформовані, зірвані зі своєї седиментаційної основи та насунуті на Зовнішню (Більче-Волицьку) зону прогину на відстань не менше ніж 55 км [Nakapelukh та ін., 2017]. У сучасній структурі СП формує передовий насувний елемент Карпатської споруди.

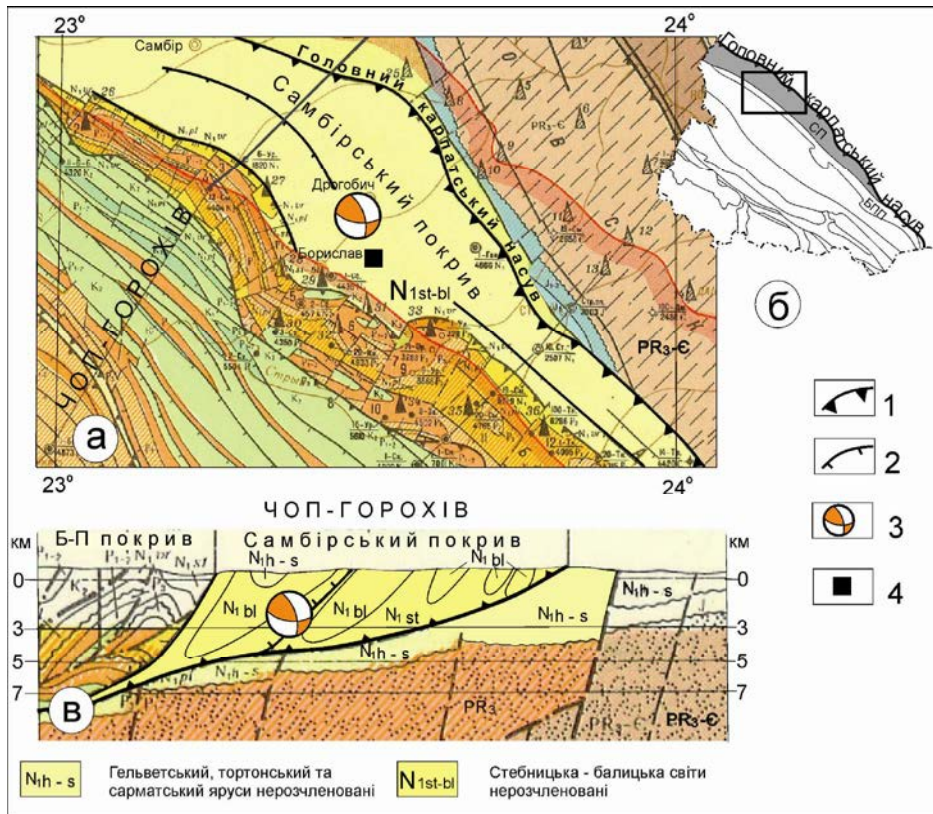
У тектонічному плані СП, подібно до інших покривів, суттєво деформований та складається з групи лусок, які також насунуті одна на одну. Амплітуди насувів між лусками зазвичай на порядок менші ніж амплітуди насувів між покривами. Внутрішня структура СП ще недостатньо вивчена, однією з причин чого є складності в стратифікації моласових відкладів. Моласові утворення неогенового передового прогину представлені міоценовими відкладами знизу вгору: Воротищенської, Стебницької, Балицької та Богородчанської світ [Геологічна..., 2007].

**Склад порід у гіпоцентральної зоні**

Гіпоцентр стебницького землетрусу (на глибині 1,9 км) розташований у межах розвитку нерозчленованих Стебницько-Балицької світ середнього міоцену, що проілюстровано на схематичних геологічних картах та розрізі (рис. 3, а, 3, в).

Стратотип Стебницької світи (N1 st) розташований біля м. Стебник. Тут відклади Стебницької світи залягають на глинах Воротищенської світи та складаються з перешарування строкатих глин і аргілітів, сірих пісковиків та алевролітів і мають загальну потужність 225 м [Геологічна..., 2007]. Вище по розрізу відклади Стебницької світи поступово нарощується глинами Балицької світи.

У районі м. Добромилів Стебницька світа складається з товстошаруватих сірих пісковиків, подекуди – зі скісною шаруватістю, що можуть належати до дельтових фацій палеорічок. Балицька світа (потужність 350–750 м) поступово нарощує стебницьку і загалом представлена зеленувато-сірими масивними та тонкошаруватими, переважно карбонатними глинами з прошарками алевролітів, пісковиків, лінзами кам'яної солі та гіпсу та олістолітами Стебницької світи.



**Рис. 3.** Тектонічна позиція Стебницького землетрусу та його механізм: а – фрагмент геологічної карти на зрізі 3000 метрів за [Геологические..., 1979]; б – тектонічна схема Українських Карпат за [Тектоническая..., 1986] з позначенням району досліджень; БП – Бориславсько-Покутський покрив; в – фрагмент геологічного розрізу Чоп-Горохів за [Геологические..., 1979], горизонтальний та вертикальний масштаби 1:500 000; Умовні позначення: 1 – регіональні насиви, 2 – насиви, 3 – механізм землетрусу, 4 – місце зсуву ґрунту

**Fig. 3.** Tectonic position of the Stebnyk earthquake and its focal mechanism: а – fragment of geological map at the section of 3000 meters according to [Геологические..., 1979]; б – tectonic scheme of the Ukrainian Carpathians according to [Тектоническая..., 1986], with study area indicated; БП – Boryslav-Pokutsky cover; в – fragment of Chop-Horokhiv geological section according to [Геологические..., 1979], horizontal and vertical scales 1:500 000; Legend: 1 – regional thrust-faults, 2 – thrusts, 3 – the focal mechanism of Stebnyk earthquake, 4 – the position of Stebnyk landslide



### Структурна приуроченість землетрусу

Локалізацію епіцентру землетрусу показано на геологічній карті, що моделює розвиток стратиграфічних комплексів на глибині 3000 м. На цій карті, як і на сучасніших [Геологічна..., 2007], вогнище розташоване в межах Самбірського покриву (СП) у полі розвитку міоценових осадових утворень. У зоні СП, що обмежується фронтальним (головним) Карпатським насувом, показано насуп другого порядку, який на глибині відгалужується від основного насупу. Епіцентр та гіпоцентр землетрусу просторово співвідносяться із зазначеним на карті та розрізі насупом другого порядку. Значний зсув ґрунту, який відбувся на західній околиці м. Стебник на відстані 5 км від епіцентру корелює у часі із землетрусом, а просторово локалізується на лінії, що може бути продовженням зазначеного насупу другого порядку на південний схід (рис. 3, а). Треба зазначити, що далі на південний схід на карті показано наступний сегмент насупу, а стебницький зсув ґрунту знаходиться між цими двома сегментами (рис. 3, а). Землетрус та зсув можуть таким чином відображати розвиток насупу в зоні між двома вже наявними сегментами. Відповідно до орієнтування кінематичних осей обидва визначені в роботі механізми належать до насупного типу, а орієнтування нодальних площин механізму за знаками вступів Р-хвиль (рис. 1, б) карпатське, тобто субпаралельне до простягання Українських Карпат. Саме з огляду на це його і винесено на геологічну карту та розріз (рис. 3, а, в).

### Наукова новизна

Обернення хвильових форм лише прямих Р-хвиль, запропоноване в роботі, дає змогу визначати механізм вогнища землетрусу за даними малої кількості станцій, що особливо актуально у регіонах з порівняно невисоким рівнем місцевої сейсмічної активності, до яких належить Передкарпаття. Механізм стебницького землетрусу 29.09.2017 р є одним з перших, визначених у межах Передкарпатського прогину; зіставлення механізму з даними про геологічну будову регіону дало змогу з'ясувати ймовірні тектонічні передумови землетрусу і пов'язати його зі зсувом ґрунту поблизу м. Стебник.

### Практична значущість

Одна із нодальних площин, визначеного в роботі механізму вогнища, є площиною розриву землетрусу, який найімовірніше став причиною екологічної катастрофи – зсуву ґрунту поблизу м. Стебник приблизно о 21<sup>h</sup>47<sup>m</sup>0.0<sup>s</sup> GMT 29.09.2017 р.

### Висновки

У роботі представлено визначення механізму вогнища землетрусу, який відбувся 29.09.2017

поблизу м. Стебник. Цей землетрус імовірно спричинив зсув ґрунту й утворення провалля на території Стебницького ВО «Полімінерал», на відстані 5 км від епіцентра. Визначення механізму двома способами – за знаками вступів Р-хвиль на сейсмічних станціях Карпатської мережі і шляхом обернення хвильових форм – дало переважно збіжний результат. Зіставлення параметрів землетрусу та його механізму, визначеного за знаками вступів Р-хвиль, з тектонічною будовою регіону дозволяє пов'язати землетрус з насупом другого порядку в межах Самбірського покриву, що відноситься до Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Вогнище землетрусу локалізується в міоценових моласових утвореннях на глибині 1,9 км. Орієнтування нодальних площин механізму, з насупною та лівосторонньою зсувною складовими ковзання, майже збігається з орієнтуванням карпатських насупних структур.

### Список літератури

- Геологические карты западных областей Украины на срезях – 3000, – 5000, – 7000 м. / ред. В. В. Глушко. – К. : Мингео УССР. – 1979. – 10 с.
- Геологічна карта Українських Карпат, масштаб 1:100000. Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області України / В. В. Глушко, В. В. Кузовенко, В. Е. Шлапинский / Під ред. Ю. З. Крупського. Звіт ЗАТ “Концерн Надра”. – К. : Фонд ЗАТ “Концерн Надра”. – 2007. – 228 с.
- Гнилко О. М. Тектонічне районування Карпат у світлі терейнової тектоніки. Частина 1. Основні елементи Карпатської споруди // Геодинаміка. – 2011. – 2 (11). – С. 170–172.
- Малицький Д. В. Аналітично-числові підходи до обчислення часової залежності компонент тензора сейсмічного моменту // Геоінформатика. – 2010. – № 1. – С. 79–86.
- Малицький Д. В. Математичне моделювання в задачах сейсмології. – К. : Наук. думка, 2016. – 241 с.
- Малицький Д. В. Застосування динамічних підходів для визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону / Д. В. Малицький, О. Д. Грицай // Наукова конференція-семінар “Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах” присвячена пам'яті Т. З. Вербицького та Ю. Т. Вербицького, Верхнє Синьовидне, 1–2 червня 2017 р., Львів : Сполом, – 2017. – С. 166–168.
- Малицький Д. В. Моделі сейсмічних джерел / Д. В. Малицький, А. Ю. Павлова, О. Д. Грицай, О. А. Асташкіна, О. О. Обідіна, М. Р. Махницький, Е. М. Козловський // Геоінформатика. – 2017. – № 2. – С. 14–23.
- Молотков Л. А. Исследование распространения волн в пористых и трещиноватых средах на основе эффективных моделей Био и слоистых

- серед / Л. А. Молотков. – СПб.: Наука. 2001. – 348 с.
- Молотков Л. А. Матричный метод в теории распространения волн в слоистых упругих и жидких средах / Л. А. Молотков. – Ленинград : Наука, 1984. – 201 с.
- Тектоническая карта Украинских Карпат, масштаб 1: 200000. / Ред. В. В. Глушко, С. С. Круглов. – К. : Мингео УССР. – 1986. – 6 с.
- Aki K., Richards P. G. Quantitative seismology, 2<sup>nd</sup> edn. Sausalito. – California : University Science books, 2002. – 520 p.
- Alekseev A. S. The solution of dynamic problems of elastic wave propagation in inhomogeneous media by a combination of partial separation of variables and finite-difference method / A. S. Alekseev, B. G. Mikhailenko // *J. Geophys.* – 1980. – Vol. 48. – P. 161–172.
- Ben-Menahem A. Seismic Waves and Sources / A. Ben-Menahem, S. J. Singh. – New York : Springer, 1981. – 1108 p.
- Bouchon M. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media / M. Bouchon // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1981. – Vol. 71. – P. 959–971.
- Chapman C. H. A new method for computing synthetic seismograms. // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* – 1957. – Vol. 54. – P. 481–518.
- Cormier V. P. Full wave theory applied to a discontinuous velocity increase: The inner core boundary / V. P. Cormier, P. G. Richards // *J. Geophys.* – 1977. – Vol. 43. – P. 3–31.
- Csontos L. Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region / L. Csontos, A. Vörös // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* – 2004. – Vol. 210 (1). – P. 1–56.
- D'Amico S. Source Parameters Related to a Small Earthquake Swarm Off-Shore of Malta (Central Mediterranean) / S. D'Amico // *Development in Earth Science.* – 2014. – Vol. 2. – P. 8–13.
- Dziewonski A. M, Chou T. A., Woodhouse J. H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. // *J. geophys. Res.* – 1981. – Vol. 86. – P. 2825–2852.
- Fuchs K. Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations / K. Fuchs, G. Muller // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* – 1971. – Vol. 23. – P. 417–433.
- Godano M. Deschamps A. Moment tensor determination by nonlinear inversion of amplitudes / M. Godano, T. Bardainne, M. Regnier // *Bull. seism. Soc. Am.* – 2011. – Vol. 101. – P. 366–378.
- Hardebeck J. L. Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes / J. L. Hardebeck, P. M. Shearer // *Bull. seism. Soc. Am.* – 2003. – Vol. 93. – P. 2432–2444.
- Kennett B. L. N. Seismic waves in laterally inhomogeneous media / B. L. N. Kennett // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* – 1972. – Vol. 27. – P. 301–325.
- Kennett B. L. N. The Seismic Wavefield 1, 2 / B. L. N. Kennett – UK : Cambridge University Press, 2002. – 900 p.
- Kikuchi M. Inversion of complex body waves-III / M. Kikuchi, H. Kanamori // *Bull. seism. Soc. Am.* – 1991. – Vol. 81. – P. 2335–2350.
- Malytskyy D. Seismic waves in layered media / D. Malytskyy, E. Kozlovskyy // *J. of Earth Science and Engineering.* – 2014. – Vol. 4. – P. 311–325.
- Miller A. D. Three- dimensional seismic structure and moment tensors of non-double-couple earthquakes at the Hengill-Grensdalur volcanic complex, Iceland / A. D. Miller, B. R. Julian, G. R. Foulger // *Geophys. J. Int.* – 1998. – Vol. 133 – P. 309–325.
- Muller G. The reflectivity method: A tutorial / G. Muller // *J. Geophys.* – 1985. – Vol. 58. – P. 153–174.
- Nakapelukh M. Balanced geological cross-section of the outer Ukrainian Carpathians along the pancake profile / M. Nakapelukh, I. Bubniak, T. Yegorova, A. Murovskaya, O. Gintov, V. Shlapinskyi, Yu. Vikhot // *Journal of Geodynamics.* – 2017. – Vol. 108. – P. 13–25.
- Sileny J. Waveform inversion for point source moment tensor retrieval with variable hypocentral depth and structural model / J. Sileny, G. F. Panza, P. Campus // *Geophys. J. Int.* – 1992. – Vol. 109. – P. 259–274.
- Sipkin S. A. Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Global seismicity, 1981–1983 / S. A. Sipkin // *Bull. seism. Soc. Am.* – 1986. – Vol. 76. – P. 1515–1541.
- Vavrychuk V. Moment tensor inversion of waveforms: a two- step time frequency approach / V. Vavrychuk, D. Kuhn // *Geophys. J. Int.* – 2012. – Vol. 190. – P. 1761–1776.
- Wiggins R. A. Synthetic seismogram computation by expansion in generalized rays / R. A. Wiggins, D. V. Helmberger // *Geophys. J.* – 1974. – Vol. 37. – P. 73–90.



Д. МАЛИЦКИЙ<sup>1</sup>, А. ГНЬП<sup>1</sup>, О. ГРЫЦАЙ<sup>1</sup>, А. МУРОВСКАЯ<sup>2</sup>, С. КРАВЕЦ<sup>1</sup>, . КОЗЛОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
А. МЫКЫТА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карпатское отделение института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, 79060, г. Львов ул. Научная 3б, тел. +38(032)2648563, эл. почта dmalytskyu@gmail.com, grycaj.oksana@gmail.com

<sup>2</sup>Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, 03680, г. Киев, Проспект Палладина 32, тел. +38(044)4240112

МЕХАНИЗМ ОЧАГА И ТЕКТОНИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29.09.2017 г.  
В ОКРЕСНОСТИ г. СТЕБНИК

**Цель.** Целью работы является определение механизма очага землетрясения, которое произошло 29.09.2017 в окрестности г. Стебник ( $21^{\text{h}}46^{\text{m}}8,4^{\text{s}}$ ,  $\varphi = 49,34^{\circ}$ ,  $\lambda = 23,49^{\circ}$ ,  $h = 1,9$  км,  $MD = 2,9$ ) двумя методами – по знакам вступлений Р-волн и методом инверсии волновых форм по данным ограниченного количества станций. **Методика.** Моделирование сейсмических волн в неоднородной среде, представленной в виде горизонтально-слоистой упругой структуры, осуществляется матричным методом. Соотношения, полученные для полей перемещений на свободной поверхности полупространства, использованы для определения тензора сейсмического момента как функции времени путем выделения только прямых Р-волн. В работе использован также метод определения механизма очага землетрясения по знакам вступлений Р-волн на станциях. **Результаты.** В работе представлены решения обратной задачи определения механизма очага землетрясения методом инверсии волновых форм в случае ограниченного количества станций и по знакам вступлений Р-волн на станциях. Показано, что фокальный механизм, определенный по поступлениям Р-волн надежнее. Сопоставление характеристик землетрясения, механизма его очага с тектоническим строением региона позволяет связать землетрясение с надвигом второго порядка в границах аллохтонной части Самборского покрова. **Научная новизна.** Инверсия волновых форм только прямых Р-волн, предложенная в работе, позволяет определять механизм очага землетрясения по данным малого количества станций, что особенно актуально в регионах с относительно невысоким уровнем местной сейсмической активности, к которым относится Прикарпатье. Механизм стебницкого землетрясения 29.09.2017 г. является одним из первых, определенных в рамках Прикарпатского прогиба; сопоставление механизма с данными о геологическом строении региона позволило выяснить возможные тектонические предпосылки землетрясения и связать его со сдвигом почвы вблизи г. Стебник. **Практическая значимость.** Одна из нодальных плоскостей определенного в работе механизма очага является плоскостью разрыва землетрясения, которое наиболее вероятно стало причиной экологической катастрофы – оползня в окрестности г. Стебник приблизительно в  $21^{\text{h}}47^{\text{m}}0,0^{\text{s}}$  GMT, 29.09.2017.

*Ключевые слова:* землетрясение, сейсмические волны, матричный метод, механизм очага, тензор сейсмического момента, временная функция очага, осадочные отложения, Самборский покров.

D. MALYTSKYI<sup>1</sup>, A. HNYP<sup>1</sup>, O. HRYTSAI<sup>1</sup>, A. MUROVSKA<sup>2</sup>, S. KRAVETS<sup>1</sup>, E. KOZLOVSKYI<sup>1</sup>,  
A. MYKYTA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Carpathian Branch of Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Science of Ukraine, 3b, Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine, tel. +38(032)2648563, e-mail: dmalytskyu@gmail.com, grycaj.oksana@gmail.com

<sup>2</sup>Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Science of Ukraine, 32, Palladin Ave., Kyiv, 03680, Ukraine., tel. +38(044)4240112

SOURCE MECHANISM AND TECTONIC SETTING OF 29.09.2017 EARTHQUAKE NEAR STEBNYK

**Purpose.** The paper's purpose consists in determining the source mechanism of 29.09.2017 earthquake near Stebnyk ( $21^{\text{h}}46^{\text{m}}8,4^{\text{s}}$ ,  $\varphi = 49,34^{\circ}$ ,  $\lambda = 23,49^{\circ}$ ,  $h = 1,9$  km,  $MD = 2,9$ ) using two methods – from polarities of first P-wave arrivals and by inversion of wave forms registered at a limited number of stations. **Methodology.** Seismic waves in the inhomogeneous medium represented by horizontally layered elastic structure are calculated using the matrix method. Expressions derived for the field of displacements on the upper surface are used for the determination of seismic moment tensor rate by isolating only direct P-waves. Also, the source mechanism is determined from polarities of first P-wave arrivals. **Result.** In the paper, a new method is presented for determination of earthquake source mechanism by inversion of only direct P-waveforms registered at only a limited number of stations and from polarities of first P-wave arrivals at seismic station. The conclusion is drawn out that mechanism simultaneously determined from polarities of first P-wave arrivals is more reliable. Correlation hogging of the earthquake characteristics and its source mechanism with tectonic setting of the region enables to associate the earthquake with thrusting of second order within the extent of allochthonous part of the Sambir nappe. **Originality.** The inversion of waveforms of only direct P-wave, proposed in the paper, make it possible to determine the focal mechanism of the earthquake by using the data of a small number of

stations. It is especially important in regions with relatively low levels of local seismic activity, which include Precarpathians. The mechanism of the earthquake near Stebnyk of 29.09.2017 is one of the first, determined within the extent of the Carpathian Foredeep; and comparison of the mechanism with the geological structure data of the region made it possible to ascertain the probable tectonic preconditions of the earthquake and to associate it with landslide near the city of Stebnyk. **Practical significance.** One of the nodal planes of the source mechanism determined in the paper corresponds to rupture plane of the earthquake which supposedly triggered the ecological catastrophe – disastrous landslide near the city of Stebnyk on 29.09.2017 at approximately  $21^{\text{h}}47^{\text{m}}0.0^{\text{s}}$ .

*Key words:* matrix method, graphic method, focal mechanism of the earthquake, seismic wave propagation, seismic moment tensor, source time function, sedimentation, Sambir cover.

## REFERENCES

- Geological maps of the western regions of Ukraine on sections – 3000, – 5000, – 7000 m. (1979). Ed. V.V. Glushko. Kyiv: Mingeo USSR. (in Russian).
- Hlushko, V. V., Kuzovenko, V. V., Shlapynskiy, V. E. (2007). Geological Map of Ukrainian Carpathians, scale 1: 100000. [Transcarpathian, Ivano-Frankivsk, Lviv, Chernivtsi region of Ukraine]. Ed. Yu. Z. Krupskiy. Report of JSC “Nadra Concern”. Kyiv: Fund JSC “Nadra Concern” (in Ukrainian).
- Hnylko, O. M. (2011). Tectonic zoning of the Carpathians in terms of the Terrane tectonics. Sections 1. Main units of the Carpathian building. *Geodynamics*, 2 (11), 170–172 (in Ukrainian).
- Malytskyi, D. (2010). Analytic-Numerical Approaches to the Calculation of Seismic Moment Tensor as a Function of Time. *Geoinformatic*, 1, 79–86 (in Ukrainian).
- Malytskyi, D. V. (2016). *Mathematical Modeling in the problems of seismology*. Kyiv: Naukova dumka Publ., (in Ukrainian).
- Malytskyi, D. V., Hrytsai, O. D. (2017). Application of dynamic approaches for determination of focal mechanisms of earthquake in the Carpathian region. Proceedings of Scientific conference-seminar *Seismological and geophysical research in seismically active regions* is devoted to the memory of T. Z. Verbitsky and Yu. T. Verbitsky, Upper Synovid, June 1–2, 2017. Lviv: Spolom, 166–168 (in Ukrainian).
- Malytskyi, D., Pavlova, A., Grytsai, O., Astashkina, O., Obidina, O. O., Makhnitskyy, M. P., Kozlovskyy, E. (2017). Models of Seismic Sources. *Geoinformatika*, 2, 14–23 (in Ukrainian).
- Molotkov, L. A. (2001). *Investigation of wave propagation in porous and fractured media based on effective models of Bio and layered media*. Sankt-Peterburg: Nauka Publ. (in Russian).
- Molotkov, L. A. (1984). *Matrix method in the theory of wave propagation in layered elastic and liquid media*. Leningrad: Nauka Publ. (in Russian).
- Tectonic map of the Ukrainian Carpathians, scale 1: 200000. (1986). Ed. V. V. Glushko, S. S. Kruglov. Kyiv: Mingeo USSR. (in Russian).
- Aki, K., Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*, 2<sup>nd</sup> edn. Sausalito, California: University Science books.
- Alekseev, A. S., Mikhailenko, B. G. (1980). The solution of dynamic problems of elastic wave propagation in inhomogeneous media by a combination of partial separation of variables and finite-difference method. *J. Geophys.*, 48, 161–172.
- Ben-Menahem, A., Singh, S. J. (1981). *Seismic Waves and Sources*. New York: Springer.
- Bouchon, M. (1981). A simple method to calculate Green’s functions for elastic layered media. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71, 959–971.
- Chapman, C. H. (1957). A new method for computing synthetic seismograms. *Geophysical Journal International*, 54(3), 481–518.
- Cormier, V. P., Richards, P. G. (1977). Full wave theory applied to a discontinuous velocity increase: The inner core boundary. *J. Geophys.*, 43, 3–31.
- Csontos, L., Vörös, A. (2004). Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 210(1), 1–56.
- D’Amico, S. (2014). Source Parameters Related to a Small Earthquake Swarm Off-Shore of Malta (Central Mediterranean). *Development in Earth Science*, 2, 8–13.
- Dziewonski, A. M, Chou, T. A., Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4), 2825–2852.
- Fuchs, K., Muller, G. (1971). Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations. *Geophysical Journal International.*, 23(4), 417–433.
- Godano, M., Bardainne, T., Regnier, M., Deschamps A. (2011). Moment tensor determination by nonlinear inversion of amplitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America.*, 101, 366–378.
- Hardebeck, J. L., Shearer, P. M. (2003). Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2432–2444.

- Kennett, B. L. N. (1972). Seismic waves in laterally inhomogeneous media. *Geophysical Journal International*, 27, 301–325.
- Kennett, B. L. N. (2002). *The Seismic Wavefield 1, 2*. UK: Cambridge University Press.
- Kikuchi, M., Kanamori, H. (1991). Inversion of complex body waves-III. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81, 2335–2350.
- Malyskyy, D., Kozlovskyy, E. (2014). Seismic waves in layered media. *Journal of Earth Science and Engineering*, 4, 311–325.
- Miller, A. D., Julian, B. R., Foulger, G. R. (1998). Three-dimensional seismic structure and moment tensors of non-double-couple earthquakes at the Hengill-Grensdalur volcanic complex, Iceland. *Geophysical Journal International*, 133(2), 309–325.
- Muller, G. (1985). The reflectivity method: A tutorial. *J. Geophys.*, 58, 153–174.
- Nakapelukh, M., Bubniak, I., Yegorova, T., Murovskaya, A., Gintov, O., Shlapinskiy, V., Vikhot, Yu. (2017). Balanced geological cross-section of the outer Ukrainian Carpathians along the pancake profile. *Journal of Geodynamics*, 108, 13–25.
- Sileny, J., Panza, G. F., Campus, P. (1992). Waveform inversion for point source moment tensor retrieval with variable hypocentral depth and structural model. *Geophysical Journal International*, 109(2), 259–274.
- Sipkin, S. A. (1986). Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: Global seismicity, 1981–1983. *Bull. seism. Soc. A Bulletin of the Seismological Society of America*, 76, 1515–1541.
- Vavrychuk, V., Kuhn, D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two- step time frequency approach. *Geophysical Journal International*, 190(3), 1761–1776.
- Wiggins, R. A., Helmberger, D. V. (1974). Synthetic seismogram computation by expansion in generalized rays. *Geophysical Journal International*, 37(1), 73–90.

Надійшла 05.04.2018 р.