

УДК 550.34

Осадчий В.І., Грабченко В.В., Шапка В.М.

Головний центр спеціального контролю НЦУВКЗ, смт. Городок, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ МАГНІТУДИ ДЖЕРЕЛА СЕЙСМІЧНИХ ПОДІЙ НА ЛОКАЛЬНИХ ТА РЕГІОНАЛЬНИХ ВІДСТАНЯХ

Для отримання достовірних даних про енергетичні параметри локальних та регіональних сейсмічних подій їх аналізу та оцінки наслідків на території України, по записах від землетрусів з районів гір Вранча (Румунія), Українських Карпат, Закарпаття, Криму, Східно-Європейської платформи, суміжних з Україною територій уточнені формули розрахунку магнітуди по об'ємній  $S$  та поверхневій  $Lg$  хвилях. На основі отриманих даних внесені доповнення до існуючого програмно-математичного забезпечення для розрахунку енергетичних параметрів сейсмічних подій в зонах установленної відповідальності.

**Ключові слова:** сейсмічна подія, джерело землетрусу, магнітуда, локальна магнітуда, калібрувальна функція.

**Вступ.** Масштаб сейсмічного явища по запису сейсмічних хвиль на деякій відстані від джерела може бути оцінена шляхом розрахунку магнітуди  $M$  або енергії  $E$  [1].

Магнітуда  $M$  – відносна енергетична характеристика землетрусу – представляє собою логарифм максимальної швидкості коливань земної поверхні або логарифм максимальних зміщень в сейсмічних хвилях різного типу, обрахований від деякого умовного рівня, що відповідає слабкому поштовху, магнітуда якого прийнята за 0.

Максимальна магнітуда землетрусу становить близько 9 балів, що відповідає енергії  $10^{19}$  Дж.

Визначення енергетичних параметрів землетрусу ґрунтується на різних методичних підходах і залежить від рівня мережі спостережень і типу вимірювального обладнання. В більшості випадків для оцінки енергетичних параметрів місцевих землетрусів використовується локальна магнітуда  $ML$ , концепція якої була створена Ріхтером [2].

Початкова магнітуда Ріхтера,  $ML$ , ґрунтувалася на записах стандартних короткоперіодних торсіонних сейсмометрів Вуда-Андерсона, з яких складалась мережа спостережень в Південній Каліфорнії [3]. Оцінка магнітуди здійснювалася по логарифму максимальної амплітуди поперечної хвилі з урахуванням поправок на згасання і глибину вогнища, справедливих тільки для Південної Каліфорнії.

Характер згасання сейсмічних хвиль залежить від особливостей швидкісної будови земної кори, геологічних особливостей регіону, теплового потоку, глибини залягання джерел землетрусів і т.п. Це не дозволяє створити міжнародну стандартизовану калібрувальну функцію локальної магнітуди для визначення енергетичних параметрів землетрусів. Однак початкове визначення шкали  $ML$  [4] дозволяє уніфікувати процедуру розрахунку калібрувальної функції з урахуванням місцевих умов.

Величини локальної магнітуди для однієї і тієї ж події, визначені різними станціями, можуть

відрізнятися на  $\pm 0,3$ . Це пов'язано з діаграмою випромінювання джерела, напрямком на станцію і місцевими станційними ефектами.

Перевага цифрового способу реєстрації полягає в тому, що при використанні відповідних процедур обробки можливо симулювати записи типу короткоперіодного крутильного сейсмометра Вуда-Андерсона.

Передбачається, що розрахунок локальної магнітуди дозволить отримати єдину оцінку величини регіональних землетрусів в різних регіонах, що спростить зіставлення різних каталогів в зонах відповідальності, параметри подій для яких визначаються по різним мережам цифрових станцій [5].

**Метод і матеріали.** Розрахунок локальної магнітуди здійснюється за емпіричною залежністю виду:

$$ML_i = \lg(A_{ij}) + a \lg(R_{ij}) + S_j + c \quad (1)$$

де  $ML_i$  – локальна магнітуда  $i$ -го землетрусу;  $A_{ij}$  – максимальна амплітуда зміщення  $S$ -хвилі  $i$ -ї сейсмічної події в нм, виміряна на  $j$ -ій сейсмічній станції;  $R_{ij}$  – гіпоцентральною відстань (в км) від джерела  $i$ -ї події до  $j$ -ої станції;  $S_j$  – станційна поправка до магнітуди для  $j$ -го пункту спостереження;  $a$ ,  $b$  і  $c$  – калібрувальні константи;  $i=1, \dots, n$  і  $j=1, \dots, m$ , де  $n$  і  $m$  – кількість подій і станцій відповідно.

Вільний коефіцієнт  $c$  виражається через еталонні значення магнітуди  $ML_{ref}$ , амплітуди  $A_{ref}$  і відстані  $R_{ref}$ , а також розраховані значення калібрувальних констант  $a$  і  $b$ :

$$c = ML_{ref} - \lg(A_{ref}) - a \lg(R_{ref}) - b R_{ref} \quad (2)$$

Вибір  $R_{ref}$ ,  $A_{ref}$ ,  $R_{ref}$  визначається найкращим наближенням до еталонної калібрувальної функції для Південної Каліфорнії,

а також географічним масштабом завдання.

Для шкали [4] амплітуда зміщення в поперечній хвилі  $A = 408,8 \text{ нм}$  (1 мм для сейсмометра Вуда-Андерсона зі збільшенням сигналу 2080) на гіпоцентральної відстані  $R_{ref} = 100 \text{ км}$  відповідає  $ML_{ref} = 3$ , для  $R_{ref} = 17 \text{ км}$  відповідає  $R_{ref} = 2$ . Місцеві особливості загасання сейсмічних хвиль проявляються при оцінці динамічних характеристик землетрусів на гіпоцентральної відстанях до 100 км, тому вибір  $R_{ref} = 17 \text{ км}$  більш кращий, оскільки на таких масштабах калібрувальних відстаней очікуються менш значні варіації характеристик загасання в різних регіонах. З урахуванням (1) вираз (2) може бути переписано у вигляді:

$$ML_i - \lg(A_{ij}) - a \lg\left(\frac{R_{ij}}{R_{ref}}\right) - b(R_{ij} - R_{ref}) - S_j = ML_{ref} - \lg(A_{ref}) \quad (3)$$

Передбачається медіанне значення калібрувальної функції (1), а отже сума станційних поправок дорівнює нулю

$$\sum_j S_j = 0 \quad (4)$$

Виконання умови (4) має зменшити вплив систематичних помилок в розкиді даних.

Вирази (3) і (4) складають систему рівнянь, яка може бути представлена в матричній формі:

$$Ax = y \quad (5)$$

де вектор  $x = [ML_1, ML_2, \dots, ML_n, a, b, S_1, S_2, \dots, S_m]$  складений з невідомих параметрів, які необхідно визначити; вектор  $y$  складений з правої частини виразів (3) і (4):

$$y = \begin{pmatrix} \lg(A_{11}) + M_{Lref} - \lg(A_{ref}) \\ \lg(A_{21}) + M_{Lref} - \lg(A_{ref}) \\ \dots \dots \dots \\ \lg(A_{n1}) + M_{Lref} - \lg(A_{ref}) \\ \lg(A_{22}) + M_{Lref} - \lg(A_{ref}) \\ \dots \dots \dots \\ \lg(A_{n2}) + M_{Lref} - \lg(A_{ref}) \\ \lg(A_{1m}) + M_{Lref} - \lg(A_{ref}) \\ \lg(A_{12m}) + M_{Lref} - \lg(A_{ref}) \\ \dots \dots \dots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$A$  – відома матриця розмірністю  $n + m + 2$  на  $nm + 1$  виду:

$$A = \begin{pmatrix} 10 \dots 0 - \lg\left(\frac{r_{11}}{r_{ref}}\right) - (r_{11} - r_{ref}) - 10 \dots 0 \\ 01 \dots 0 - \lg\left(\frac{r_{21}}{r_{ref}}\right) - (r_{21} - r_{ref}) - 10 \dots 0 \\ \dots \dots \dots \\ 00 \dots 1 - \lg\left(\frac{r_{n1}}{r_{ref}}\right) - (r_{n1} - r_{ref}) - 10 \dots 0 \\ 10 \dots 0 - \lg\left(\frac{r_{12}}{r_{ref}}\right) - (r_{12} - r_{ref}) 0 - 1 \dots 0 \\ 01 \dots 0 - \lg\left(\frac{r_{22}}{r_{ref}}\right) - (r_{22} - r_{ref}) 0 - 1 \dots 0 \\ 00 \dots 0 - \lg\left(\frac{r_{n2}}{r_{ref}}\right) - (r_{n2} - r_{ref}) 0 - 1 \dots 0 \\ \dots \dots \dots \\ 10 \dots 0 - \lg\left(\frac{r_{1m}}{r_{ref}}\right) - (r_{1m} - r_{ref}) 0 \dots 0 - 1 \\ 01 \dots 0 - \lg\left(\frac{r_{1m}}{r_{ref}}\right) - (r_{1m} - r_{ref}) 00 \dots 0 - 1 \\ \dots \dots \dots \\ 00 \dots 1 - \lg\left(\frac{r_{nm}}{r_{ref}}\right) - (r_{nm} - r_{ref}) 00 \dots - 1 \\ 00 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots 011 \dots 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Завдання (5) вирішується методом LSQR [6], заснованим на процедурі діагоналізації матриці в умовах поганої обумовленості.

**Результати визначення.** Визначення локальної магнітуди землетрусу за допомогою поперечних хвиль з використанням даних вертикальних та горизонтальних сейсмічних каналів цифрових станцій здійснюється на відстанях до 1000 км. На даний момент актуальним є питання щодо точного визначення магнітуди джерела землетрусу на локальних і регіональних відстанях. Визначення локальної магнітуди землетрусу здійснювалося смуговою фільтрацією вихідної хвильової форми в діапазоні частот від 1 до 15 Гц з подальшим синтезом сейсмограми Вуда-Андерсона. У разі мікроземлетрусів використовувалися більш вузькосмугові фільтри для усунення короткоперіодних та довгоперіодних мікросейсм. Пошук максимальної амплітуди запису S-хвилі для розрахунку магнітуди  $ML_V$  здійснювався на вертикальній компоненті, для магнітуди  $ML$  по горизонтальних компонентам відповідно з практичними рекомендаціями Міжнародної комісії з сейсмологічних спостережень та інтерпретації даних IASPEI [7]. Для визначення калібрувальної функції були використані  $R_{ref} = 17 \text{ км}$  і  $ML_{ref} = 2$ , відповідно до методики калібрування еталонною функцією [4], отримано рішення виду: Для гір Вранча (Румунія):

$$ML = 0,5587 \lg(A) + 1,7218 \lg(R) + 0,0004 R - 1,6756 \quad (8)$$

де  $ML$  – локальна магнітуда землетрусу,  $A$  – максимальна амплітуда зміщення  $S$ -хвилі на горизонтальній складовій в нм,  $R$  – гіпоцентрально відстань до джерела в км;

$$ML_v = 0,6605 \lg(A) + 1,8275 \lg(R) + 0,0011 R - 2,5595 \quad (9)$$

де  $ML_v$  – локальна магнітуда землетрусу,  $A$  – максимальна амплітуда зміщення  $S$ -хвилі на вертикальній складовій в нм.

Для Українських Карпат та Закарпаття:

$$ML = 0,6687 \lg(A) + 1,7218 \lg(R) + 0,0004 R - 2,6687 \quad (10)$$

Для Українських Карпат, Закарпаття та Криму:

$$ML_v = 0,6605 \lg(A) + 1,8275 \lg(R) + 0,0011 R - 3,129595 \quad (11)$$

Для території Східно-Європейської платформи [8]:

$$ML = \lg(A) + \sigma(R) \quad (12)$$

де  $\sigma$  – калібрувальна функція.

Калібрувальна функція приведена до рівня шкали локальної магнітуди Ріхтера [7], задається співвідношеннями:

$$\sigma = 1,43 \lg(R) - 2,39 \quad \text{для } R = 5 - 205 \text{ км} \quad (13)$$

$$\sigma = 2,51 \lg(R) - 4,89 \quad \text{для } R = 205 - 1000 \text{ км} \quad (14)$$

**Визначення магнітуди сейсмічних джерел з району Кривого Рогу по поверхневим  $L_g$**

**хвилям.** Амплітуда хвиль  $L_g$  є домінуючою на сейсмічних записах від джерел з району Кривого Рогу. Через стабільності відношень амплітуда/відстань для хвиль  $L_g$  в континентальних районах, ця фаза добре підходить для надійних магнітудних оцінок регіональних подій. Згідно з рекомендаціями робочої групи Міжнародної асоціації сейсмології і фізики надр Землі, магнітуда по поверхневій хвилі  $L_g$  визначається за формулою [7]:

$$m_{b_{lg}} = \lg(A) + 0,833 \lg(R) + 0,4343 \gamma(R-10) - 0,87 \quad (15)$$

де  $A$  – максимальна амплітуда в нм,  $R$  – гіпоцентрально відстань до джерела в км,  $\gamma$  – коефіцієнт затухання в  $\text{км}^{-1}$ , що пов'язаний з добротністю  $Q$  через рівняння:

$$\gamma = \frac{\pi}{QvT} \quad (16)$$

де  $v$  – групова швидкість ( для вибраних станцій  $v = 3,5 \text{ км/с}$  ),  $T$  – період, що відповідає максимальній амплітуді (в діапазоні від 0,7 с до 1,3 с) [7].

Параметр  $\gamma$  залежить від будови земної кори і визначається спеціально для регіону, в якому  $m_{b_{lg}}$

буде використовуватися.

Для регіону Кривого Рогу, з урахуванням розрахованого значення добротності, формула розрахунку магнітуди по поверхневій хвилі  $L_g$  має вигляд [9]:

$$m_{b_{lg}} = \lg(A) + 0,833 \lg(R) + 0,000262 \frac{\pi}{T^{0,47}} (R-10) - 0,87 \quad (17)$$

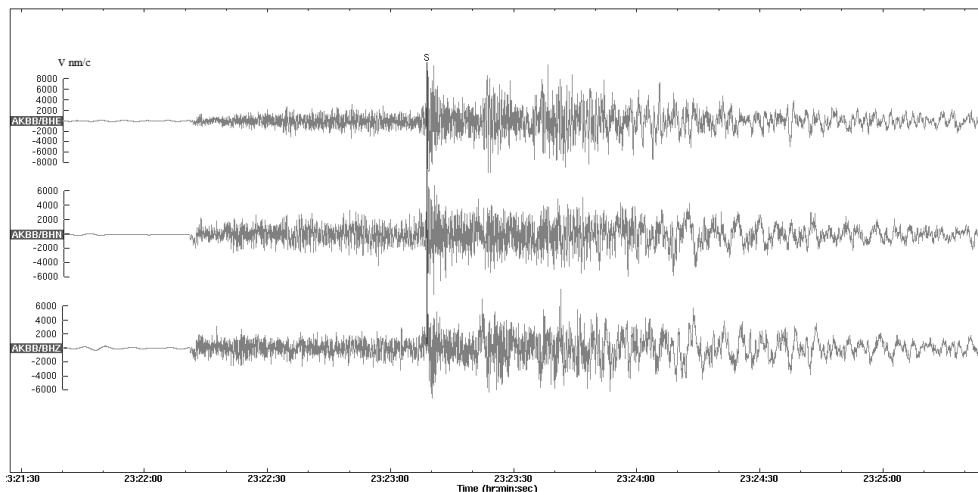


Рис. 1. Запис сейсмічної події 27.12.2016 в районі гір Вранча (Румунія), отриманий з використанням трьохкомпоненти (АКВВ) центрального елемента Української сейсмічної групи.

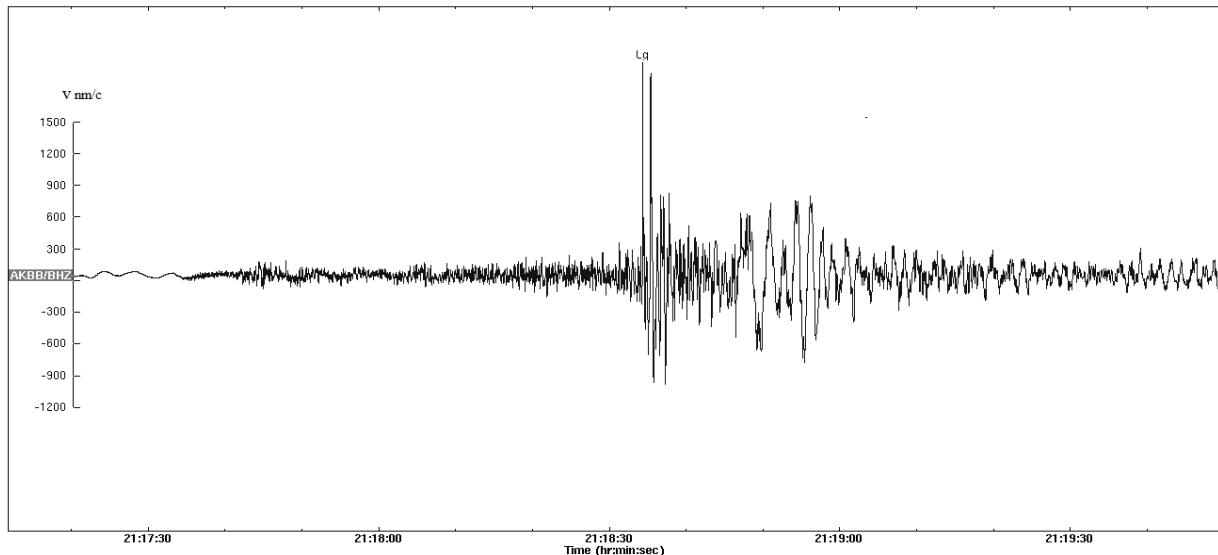


Рис. 2. Запис сейсмічної події 23.06.2013 в районі м. Кривий Ріг, отриманий з використанням вертикальної компоненти (AKBBV/BHZ) центрального елемента Української сейсмічної групи.

**Висновки.** На основі аналізу записів землетрусів з районів гір Вранча (Румунія), Українських Карпат, Закарпаття, Криму, Східно-Європейської платформи, суміжних з Україною територій уточнені формули розрахунку магнітуди локальних та регіональних сейсмічних подій по об'ємній  $S$  – хвилі та поверхневій  $Lg$  – хвилі.

Отримані емпіричні залежності використовуються для розрахунку магнітуди локальних та регіональних сейсмічних подій.

На практиці розраховані значення магнітуд мають високу порівнянність зі значеннями магнітуд, розрахованими основними світовими сейсмологічними службами.

### Список літератури

1. Кедров О.К. Сейсмічні методи контролю ядерних випробувань / О.К. Кедров. Інститут фізики Землі РАН, 2005 р. – С. 40.
2. Richter C. Elementary Seismology / W.H. Freeman, San Francisco, Calif., 1958. – 578 p.
3. Anderson J. Description and theory of the torsion seismometer / J. Anderson, O. Wood // Bull. Seism. Soc. Am. 1925. V. 15. – P. 1–72.
4. Hutton L.K. The ML scale in Southern California / L.K. Hutton, D.M. Boore // Bull. Seism. Soc. Am. 1987. V. 77. № 6. – P. 2074–2094.
5. Шаров Н.В. Землетруси і мікросейсмічність в задачах сучасної геодинаміки Східно-Європейської платформи. Кн. 1: Землетруси. Петрозаводськ / Н.В. Шаров, А.А. Маловічко, Ю.К. Шукін: Карельський науковий центр РАН, 2007. – С. 39.
6. Paige C. An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares / C. Paige, M. Saunders // ACM Trans. Math. Soft. 1982. V. 8. № 2. – P. 195–209.
7. Summary of magnitude working group recommendations on standard procedures for determining earthquake magnitudes from digital data. 2013.
8. Феоділактов В. Д. Калібрувальна функція для розрахунку магнітуди по об'ємним хвилям на відстанях менше  $20^\circ$  / В.Д. Феоділактов. - Обнінськ: Фонди ГС РАН, 2003, – 10 С.
9. Андрущенко Ю.А. Сейсмічна добротність земної кори північної частини Українського щита. Геофізичний журнал / Ю.А. Андрущенко, В.І. Осадчий, О.І. Ляцук., В.В. Грабченко. - № 4. - Т. 38, 2016 – С. 146 – 152.

### References

1. Kedrov O.K. Seismichni metody` kontrolyu yaderny`x vy`probuva`n` / O.K. Kedrov. Insty`t fizy`ky` Zemli RAN, 2005 r. – P. 40.
2. Richter C. Elementary Seismology / W.H. Freeman, San Francisco, Calif., 1958. – 578 p.
3. Anderson J. Description and theory of the torsion seismometer / J. Anderson, O. Wood // Bull. Seism. Soc. Am. 1925. V. 15. – P. 1–72.
4. Hutton L.K. The ML scale in Southern California / L.K. Hutton, D.M. Boore // Bull. Seism. Soc. Am. 1987. V. 77. № 6. – P. 2074–2094.
5. Sharov N.V. Zemletrusy` i mikroseyseichnist` v zadachax suchasnoyi geody`namiky` Sxidno-Yevropejs`koyi platformy`. Kn. 1: Zemletrusy`. Petrozavodsk`k / N.V. Sharov, A.A. Malovichko, Yu.K. Shhukin: Karel`s`ky`j naukovy`j centr RAN, 2007. – S. 39.
6. Paige C. An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares / C. Paige, M. Saunders // ACM Trans. Math. Soft. 1982. V. 8. № 2. – P. 195–209.
7. Summary of magnitude working group recommendations on standard procedures for determining earthquake magnitudes from digital data. 2013.
8. Feofilaktov V. D. Kalibruval`na funkciya dlya rozraxyunku magnitudy` po ob`yemny`m xvy`lyam na vidstanyax menshe  $20^\circ$

---

/ V.D. Feofilaktov. - *Obninsk: Fondy`GS RAN, 2003. – 10 p.*

9. *Andrushhenko Yu.A. Sejsmichna dobrotmist` zemnoyi kory` pivnichnoyi chasty`ny` Ukrayins`kogo shhy`ta. Geofizy`chny`j zhurnal / Yu.A. Andrushhenko, V.I. Osadchy`j, O.I. Lyashhuk., V.V. Grabchenko. - № 4. – T. 38, 2016. – P. 146 – 152.*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТУДЫ ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ЛОКАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЯХ**

Осадчий В.И., Грабченко В.В., Шапка В.Н.

Для получения достоверных данных о энергетических параметрах локальных и региональных сейсмических событий их анализа и оценки последствий на территории Украины, по записям от землетрясений из районов гор Вранча (Румыния), Украинских Карпат, Закарпатья, Крыма, Восточно-Европейской платформы, сопредельных с Украиной территорий уточнены формулы расчета магнитуды по объемной S и поверхностной Lg волнам. На основе полученных данных внесены дополнения к существующему программно-математическому обеспечению для расчета энергетических параметров сейсмических событий в зонах установленной ответственности.

**Ключевые слова:** сейсмическое событие, источник землетрясения, магнитуда, локальная магнитуда, калибровочная функция.

## **DETERMINATION OF THE MAGNITUDE OF THE SOURCE OF SEISMIC EVENTS AT LOCAL AND REGIONAL DISTANCES**

V.I. Osadchiy, V.V. Grabchenko, V.M. Shapka

For reliable data on the energy parameters local and regional seismic events, their analysis and assessment of the effects on the territory of Ukraine, according to the records of earthquakes from the regions of the Vrancea Mountains (Romania), Ukrainian Carpathians, Transcarpathia, Crimea, Eastern European Platform, adjacent to Ukraine Territories have specified the formulas for calculating the magnitude of the bulk S - wave and the surface Lg - wave. On the basis of the received data, supplements to the existing software and mathematical support for calculating the energy parameters of seismic events in the zones of established responsibility were introduced.

**Keywords:** seismic event, source of earthquake, magnitude, local magnitude, gauge function.