УДК 550.34 DOI: https://doi.org/10.24028/gzh.v43i2.230201

Визначення енергетичних параметрів сейсмічних подій Закарпатського прогину з урахуванням добротності земної кори

Ю.А. Андрущенко, В.І. Осадчий, О.І. Лящук, І.В. Корнієнко, М.І. Халабуда, 2021

Головний центр спеціального контролю Національного центру управління та випробувань космічних засобів ДКА України, смт Городок, Україна

Надійшла 12 січня 2020 р.

Закарпаття характеризується значними відмінностями будови і геодинаміки літосфери порівняно з іншими сейсмоактивними районами України, що зумовлює низку особливостей сейсмотектонічного процесу цього регіону. Просторовий розподіл сейсмічності Закарпатського прогину тісно пов'язаний з розломно-блоковою структурою фундаменту. Важливими характеристиками сейсмічного процесу в Закарпатті є енергетичні параметри місцевих землетрусів — магнітуда, інтенсивність, енергетичний клас. Саме ці величини покладено в основу сейсмічного районування. Методики, за допомогою яких визначають енергетичні параметри місцевих землетрусів, не повною мірою враховують впливи глибин гіпоцентрів і регіональні особливості шляхів поширення сейсмічних хвиль. Таким чином, актуальним є питання визначення кількісних показників добротності Q земної кори досліджуваного регіону та розробки підходів до визначення калібрувальної функції для оцінювання локальних магнітуд.

Наведено результати дослідження, спрямовані на визначення калібрувальної функції для розрахунку енергетичних характеристик землетрусів Закарпатського прогину з урахуванням параметрів згасання коливань в земній корі. За цифровими записами сейсмічних сигналів із району Закарпатського прогину, отриманими на елементах Української сейсмічної групи, а також сейсмічних станціях «Кам'яний Брід», «Підлуби», «Зеленица» та «Любар», визначено кількісні показники добротності земної кори та розроблено підходи до визначення калібрувальної функції з метою оцінювання локальної магнітуди та її перевірки на реальних сигналах.

Ключові слова: сейсмічні джерела, енергетичний клас, кода-хвилі, добротність, коефіцієнт згасання, максимальна амплітуда, магнітуда, локальна магнітуда.

Вступ. Сучасна тектонічна будова Закарпатського прогину характеризується інтенсивною дислокованістю, наявністю розривних порушень поздовжнього та поперечного напрямків. Характерними особливостями Закарпаття є розчленованість земної кори численними розломами на дрібні блоки, активні вертикальні та горизонтальні рухи, значна сейсмічність з неглибоким заляганням гіпоцентрів землетрусів. Складна геологічна будова і геодинаміка літосфери Закарпаття зумовлюють особливості сейсмотектонічного процесу регіону [Карпатський ..., 1978]. Важливими характеристиками цього є енергетичні параметри місцевих землетрусів — магнітуда, інтенсивність, енергетичний клас. Саме ці величини покладені в основу сейсмічного районування. Методики, за допомогою яких визначають енергетичні параметри місцевих землетрусів, неповною мірою враховують впливи глибин гіпоцентрів і регіональні особливості шляхів поширення сейсмічних хвиль. З огляду на це ак-

туальним є питання визначення кількісних показників добротності земної кори досліджуваного регіону та розробки підходів до визначення калібрувальної функції для оцінювання локальних магнітуд.

Визначення добротності для Закарпатського прогину. Непружні властивості геологічного середовища, що зумовлюють згасання коливань у часі і просторі, характеризуються добротністю Q — параметром, що визначається оберненою величиною тієї частини енергії деформацій, яка розсіюється за один період коливань. Цей параметр особливо чутливий до наявності в речовині рідкої фази і за її наявності змінюється значно помітніше, ніж швидкість поширення хвиль. Значення параметра різні для різних об'ємних і поверхневих хвиль (а також власних сфероїдальних і крутильних коливань), але, як і швидкості, взаємопов'язані. За P-хвилями добротність літосфери становить 800—1000, в астеносфері вона зменшується до 100—200, а нижче, на глибинах до 1000 км, підвищується до 2000 і більше [Геотектоника ..., 1990].

Існує кілька методів розрахунку Q, які докладно описані у статті [Aki, 1981]. Визначення параметра Q за кода-хвилею — один з найпопулярніших методів, оскільки для розрахунку достатньо вибрати одну сейсмічну станцію і немає потреби залучати калібрувальні дані.

Модель однократного розсіювання [Aki, Chouet, 1975] розглядає кода-хвилі як суперпозиції об'ємних хвиль, відбитих від випадково розподілених у середовищі неоднорідностей. Зменшення амплітуди кода-хвилі з часом відбувається внаслідок згасання енергії і геометричного розходження й не залежить від характеристик вогнища землетрусу. Добротність переважно збільшується з частотою, згідно з [Mitchell, 1981]:

$$Q_c(f) = Q_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^n, \qquad (1)$$

де $Q_c(f)$ — добротність середовища за кодою; Q_0 — добротність на деякій референтній частоті f_0 (зазвичай 1 Гц); n — частотний параметр, близький до одиниці, який змінюється від регіону до регіону залежно від неоднорідності середовища [Aki, Chouet, 1975]. Співвідношення (1) показує, що згасання сейсмічних хвиль з часом (відстанню від джерела) змінюється зі зміною частоти. Амплітуда сигналу в міру поширення від джерела зменшується внаслідок згасання і геометричної розбіжності. Амплітуда кода-хвилі в момент часу t від часу в джерелі для сейсмограми, відфільтрованої на центральній частоті f, пов'язується з добротністю співвідношенням [Aki, Chouet, 1975]

$$A(f, t) = W(f)\, t^{-\alpha} \exp\left[\frac{-\pi f t}{Q_c(f)} \right], \qquad (2)$$

де α — показник степеневої функції (для об'ємних хвиль $\alpha = 1{,}0$) [Sato, Fehler, 1998]; $W(f)$ — часова функція джерела.

Прологарифмувавши і перетворивши вираз (2), отримаємо

$$\ln(A(f, t)\, t) = \ln(W(f)) - \frac{\pi f t}{Q_c(f)}.$$

Для визначення добротності використано записи сейсмічних сигналів з району Закарпатського прогину, отримані на елементах Української сейсмічної групи, а також сейсмічних станціях «Кам'яний Брід», «Підлуби», «Зеленица» та «Любар», які входять до складу сейсмологічної мережі Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) Державного космічного агентства (ДКА) України.

Значення добротності розраховували на п'яти центральних частотах: $0{,}75 \pm 0{,}25$; $1{,}5 \pm \pm 0{,}5$; 3 ± 1; 6 ± 2 і 12 ± 4 Гц. Початок вікна для обробки кода-хвилі взято з моменту, що дорівнює подвоєному значенню часу пробігу S-хвилі (рис. 1), згідно з [Rautian, Khalturin, 1978], а довжину вікна W — рівною 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 і 100 с. Приклад запису кода-хвилі ілюструє рис. 2.

У статтях [Abubakirov, Gusev, 1990; Hoshiba, 1991; Mayeda et al., 1992] показано, що теорія одноразового розсіювання добре працює на малих значеннях довжини вікна обробки коди ($W < 100$ с), тому що для таких значень W розсіяне хвильове поле занадто слабке і не дає вторинного розсію-

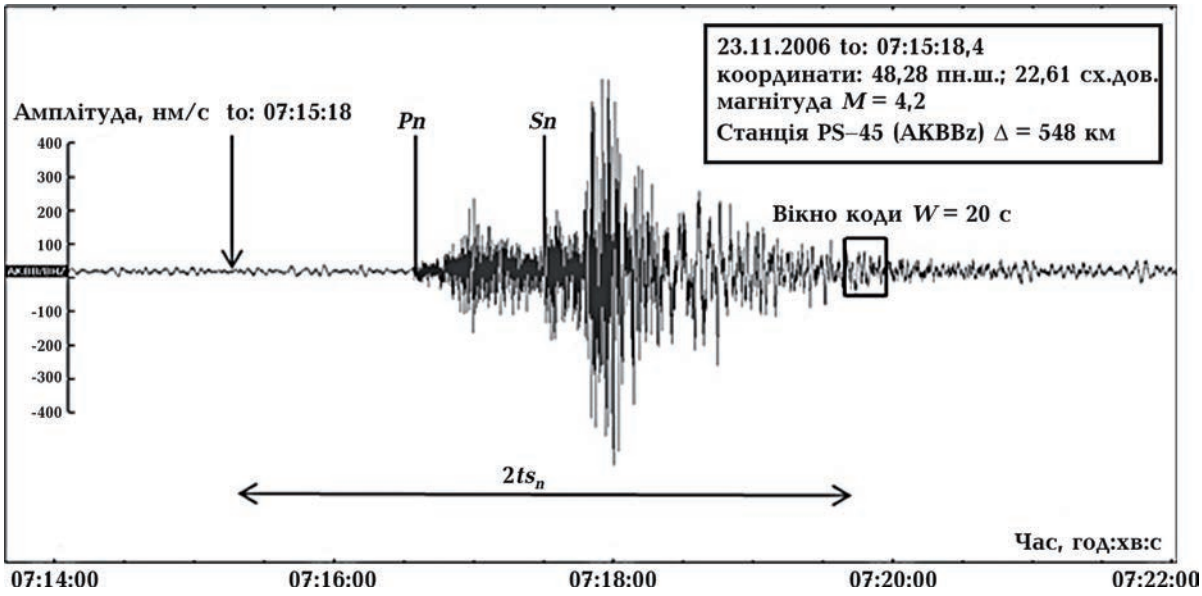

Рис. 1. Вихідний (нефільтрований) запис землетрусу 23 листопада 2006 р. (час у джерелі: t_0 = 07:15:18,4; магнітуда M = 4,2), отриманий на станції PS-45AKBBz, Δ = 548 км (м. Малин).

Fig. 1. Outgoing (non-filtered) record of the earthquake on 23 November 2006 (time in the source t_0 = = 07.15:18.4, magnitude M = 4.2), obtained at the AKBB station (c. Malyn).

вання на неоднорідностях [Aki, Chouet, 1975; Rautian, Khalturin, 1978; Копничев, 1991].

Використавши значення тривалості довжини вікна обробки кода-хвилі $W < 100$ с, ми застосували для інтерпретації отрима-

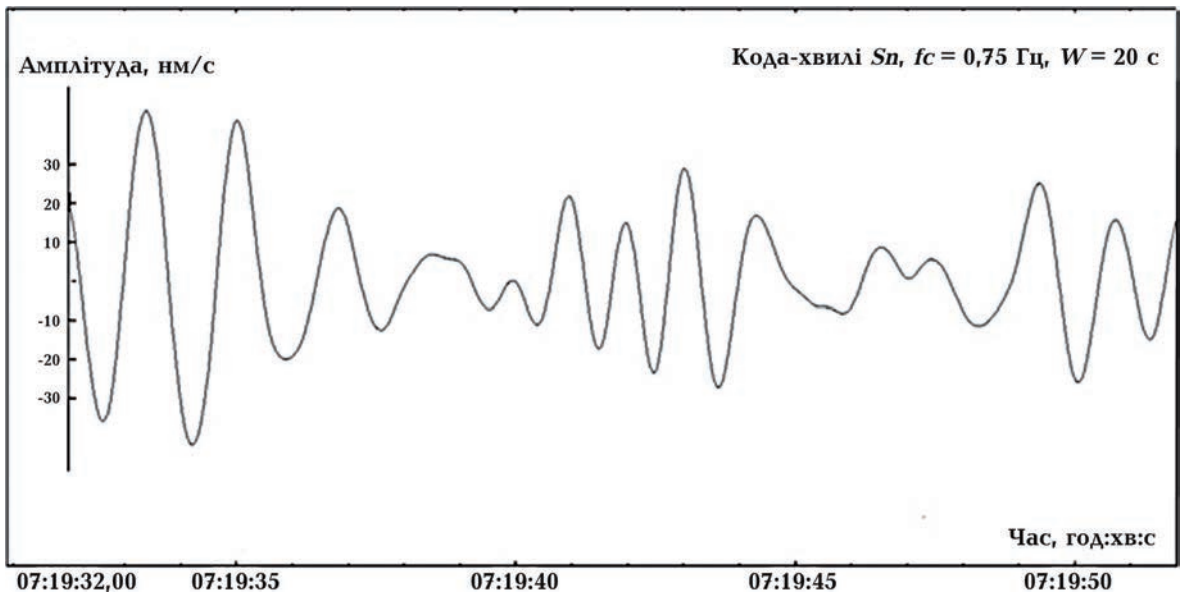

Рис. 2. Ділянка фільтрованого запису коди (смуга пропускання 0,5—1,0 Гц), вибрана для розрахунку Q_c (довжина вікна W = 20 с).

Fig. 2. A section of filtered record of the code (a band of transmissivity 0.5—1.0 Hz), chosen for calculation Q_c (the length of the window W = 20 s).

них результатів модель однократного розсіювання.

Порядок розрахунку добротності був такий:

– фільтрація за вибраною частотою;
– виділення кода-хвилі;
– конвертування і згладжування (побудова обвідної);
– побудова регресії;
– визначення кутового коефіцієнта;
– перерахунок кутового коефіцієнта в добротність.

Конвертувавши значення амплітуд кода-хвилі та використавши спосіб найменших квадратів, отримали регресійну пряму та розрахували значення сейсмічної добротності Q [Андрущенко та ін., 2016].

В таблиці наведено розраховані значення сейсмічної добротності Q_0, частотного параметра n і коефіцієнта згасання δ для різних значень довжини вікна.

При зіставленні характеристик згасання сейсмічних хвиль для різних регіонів [Mak, 2004] було зроблено такий висновок: низькі значення добротності ($Q < 200$) спостерігаються для тектонічно активних регіонів світу; високі ($Q > 600$) — для стабільних областей; проміжні значення ($Q \approx 200$—600) — для районів з помірною тектонічною активністю.

Отримані значення Q_0 змінюються від 104 до 291, а частотного параметра — від 0,91 до 0,95 залежно від довжини вікна W (див. таблицю). Такі значення параметрів Q_0 і n характерні для районів з високою тектонічною активністю [Mak et al., 2004].

Визначення калібрувальної функції для оцінювання локальної магнітуди землетрусів Закарпатського прогину. Характер згасання сейсмічних хвиль залежить від особливостей швидкісної будови земної кори, геологічних особливостей регіону, теплового потоку, глибини залягання джерел землетрусів та ін. Це не дає змоги створити міжнародну стандартизовану калібрувальну функцію локальної магнітуди для визначення енергетичних параметрів землетрусів. Однак за початковим визначенням шкали ML [Hutton, Boore, 1987] можна уніфікувати процедуру розрахунку калібрувальної функції з урахуванням місцевих умов.

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 дає змогу отримати єдину оцінку величини регіональних зем-

Сейсмічна добротність Q_0, частотний параметр n і коефіцієнт згасання δ для різних значень довжини вікна

Вікно кода-хвилі W_c	Добротність Q_0	Частотний параметр n	Коефіцієнт згасання δ, км$^{-1}$
20	104	0,95	0,007
30	116	0,95	0,006
40	143	0,94	0,005
50	168	0,94	0,004
60	193	0,93	0,004
70	218	0,93	0,003
80	244	0,92	0,003
90	268	0,92	0,003
100	291	0,91	0,003

летрусів у різних регіонах, що спростить зіставлення різних каталогів в зонах відповідності, параметри подій для яких визначають за різними мережами цифрових станцій [Землетрясения ..., 2007].

Для місцевого землетрусу амплітуду A хвилі S на гіпоцентральній відстані r визначають за співвідношенням

$$A(r) = A_0\, r^{-\alpha} \exp\left[\frac{-\pi f r}{Q_s(f)_v}\right], \qquad (3)$$

де A_0 — амплітуда в джерелі; $Q_s(f)$ — добротність середовища на частоті f; v — швидкість поширення поперечної хвилі [Havskov, Ottemoller, 2010].

Прологарифмувавши і перетворивши вираз (3), отримаємо

$$\lg(A(r)) = -\alpha \lg(r) - \\ - 0{,}43\left[\frac{-\pi f r}{Q_s(f)_v}\right] + \lg(A_0). \qquad (4)$$

Якщо величини f, v і Q вважати сталими, то з виразу (4) отримаємо

$$-\lg(A_0) = \alpha \lg(r) + br + c, \qquad (5)$$

де a, b і c — калібрувальні константи.

Співвідношення для оцінювання магнітуди MLv має загальний вигляд:

$$MLv = d \lg(A) + \alpha \lg(r) + br + c, \qquad (6)$$

де MLv — локальна магнітуда землетрусу; A — максимальна амплітуда зміщення S-хвилі на вертикальній складовій, нм; a, b, c і d — калібрувальні константи.

З рівнянь (5) та (6) константа b пов'язана з добротністю Q через рівняння

$$b \approx 0{,}43\,\frac{\pi f}{Q(f)_v}.$$

У зоні низьких частот значення добротності для прямих S-хвиль і кода-хвиль добре відповідають одні одним. Узгодженість значень добротності прямих поперечних і кода-хвиль може бути додатковим доказом того, що кода-хвилі це розсіяні та відбиті від неоднорідностей літосфери поперечні хвилі [Aki, Chouet, 1975].

Для Закарпатського прогину з урахуванням розрахованого значення добротності $b \approx 0{,}0011$.

Значення калібрувальних констант a, c і d розраховано з використанням аналізу параметрів множинної лінійної регресії. Вимірювання проведено за подіями з магнітудами $M = 3 \div 4{,}2$.

Для Закарпатського прогину формула розрахунку локальної магнітуди MLv має вигляд

$$MLv = 0{,}56 \lg(A) + 1{,}72 \lg(r) + \\ + 0{,}0011\, r - 2{,}85. \qquad (7)$$

Висновки. На підставі аналізу кода-хвиль записів землетрусів у районі Закарпатського прогину розраховані параметри згасання: сейсмічна добротність (Q), частотний параметр (n) і коефіцієнт згасання (δ) сейсмічних хвиль. Отримана функціональна залежність добротності від частоти: $Q_c(f) = 104 \pm 11\, f^{\,0{,}95 \pm 0{,}06}$.

Розраховане значення добротності геологічного середовища ($Q = 104 \pm 11$) підтверджує, що Закарпатський сейсмоактивний прогин належить до категорії тектонічно активних регіонів.

Отримана емпірична залежність $Q_c(f)$ для Закарпатського сейсмоактивного прогину була використана для уточнення формули розрахунку локальної магнітуди сейсмічних подій за об'ємною S-хвилею.

Список літератури

Андрущенко Ю.А., Лящук О.І., Осадчий В.І., Грабченко В.В. Сейсмічна добротність земної кори північної частини Українського щита. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 4. С. 146—152.

Геотектоника Волыно-Подолии. Отв. ред. И.И. Чебаненко. Киев: Наук. думка, 1990. 244 с.

Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск: Изд. КрНЦ РАН, 2007. 381 с.

Карпатский геодинамический полигон. Под ред. Я.С. Подстригача, А.В. Чекунова. Москва: Сов. радио, 1978. 127 с.

Копничев Ю.Ф. Новые данные о строении верхней мантии Байкальской рифтовой системы. Докл. АН СССР. 1991. Т. 325. № 5. С. 944—949.

Abubakirov, I.R., & Gusev, A.A. (1990). Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte Carlo simulation of record envelope of a near earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors, 64*(1), 52—67. https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90005-I.

Aki, K. (1981). Source and scattering effects on the spectra of small local earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America, 71*(6), 1687—1700.

Aki, K., & Chouet, B. (1975). Origin of coda-waves: source, attenuation and scattering effects. *Journal of Geophysical Research, 80*(23), 3322—3342. https://doi.org/10.1029/JB080i023p03322.

Havskov, J., & Ottemoller, L. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology: With Sample Data, Exercises and Software*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 347 p.

Hoshiba, M. (1991). Simulation of multiple scattered coda wave excitation based on the energy conservation law. *Physics of the Earth and Planetary Interiors, 67*(1-2), 123—136. https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90066-Q.

Hutton, L.K., & Boore, D.M. (1987). The ML scale in Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America, 77*(6), 2074—2094.

Mak, S., Chan, L.S., Chandler, A.M., Koo, R. 2004. Coda Q estimates in the Hong Kong region. *Journal of Asian Earth Sciences, 24*(1), 127—136.

Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiba, M., Aki, K., & Zeng, Y. (1992). A comparative study of scattering, intrinsic, and coda Q-1 for Hawaii, Long Valley, and central California between 1.5 and 15.0 Hz. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97*(B5), 6643—6659. https://doi.org/10.1029/91JB03094.

Mitchell, B. (1981). Regional variation and frequency dependence of Qb in the crust of the United States. *Bulletin of the Seismological Society of America, 71*, 1531—1538.

Rautian, T.G., & Khalturin, V.I. (1978). The use of coda for determination of the earthquake source spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America, 68*, 923—948.

Sato H., & Fehler M. (1998). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth*. Berlin: Springer, 308 p.

Determination of energy parameters of seismic events of the Transcarpathian trough taking into account the quality factor of the Earth's crust

Yu.A. Andrushchenko, V.I. Osadchy, O.I. Lyashchuk, I.V. Kornienko, M.I. Halabuda, 2021

Main Center for Special Control of the National Center for Space Management and Testing of the State Space Agency of Ukraine, Gorodok, Ukraine

Transcarpathia is characterized by significant differences in the structure and geodynamics of the lithosphere in comparison with other seismically active regions of Ukraine, which causes a number of features of the seismotectonic process of this region. The spatial distribution of the seismicity of the Transcarpathian Depression is closely related to the fault-block structure of the foundation. Important characteristics of the seismic process in Transcarpathia are the energy parameters of local earthquakes — magnitude, intensity, energy class. It is these values that form the basis of seismic zoning. The methods used to determine the energy parameters of local earthquakes do not fully take into account the effects of hypocenter depths and regional features of seismic wave propagation paths. Thus, the issue of determining the quantitative indicators of the quality factor of the Earth's crust of the studied region and the development of approaches to determining the calibration function for estimating local magnitudes is relevant. The article presents the results of the study, which are aimed at determining the calibration function for calculating the energy characteristics of earthquakes in the Transcarpathian Depression, taking into account the parameters of attenuation of the Earth's crust. Using digital records of seismic signals from the Transcarpathian Depression, obtained on the elements of the Ukrainian seismic group, as well as seismic stations «Stone Bridge», «Pidluby», «Zelenytsia» and «Lyubar» were determined quantitative indicators of the quality of the Earth's crust and developed approaches to determination of the calibration function for estimation of local magnitude and its check on real signals.

Key words: seismic sources, energy class, code-waves, quality factor, attenuation coefficient, maximum amplitude, magnitude, local magnitude.

References

Andrushchenko, Yu.A., Lyashchuk, O.I., Osadchy, V.I., & Grabchenko, V.V. (2016). Seismic good quality of the Earth's crust of the northern part of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal, 38*(4), 146—152. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107812 (in Ukrainian).

Chebanenko, I.I. (1990). *Geotectonics of Volyn-Podolia*. Kiev: Naukova Dumka, 244 p. (in Russian).

Sharov, N.V., Malovichko A.A., & Shchukin, Yu.K. (Eds.). (2007). *Earthquakes and microseismicity in the problems of modern geodynamics of the East European platform. Book. 1: Earthquakes*. Petrozavodsk: Published by the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 381 p. (in Russian).

Podstrigach, Ya.S., & Chekunov, A.V. (Eds.). (1978). *Carpathian geodynamic landfill*. Moscow: Sovetskoye radio, 127 p. (in Russian).

Kopnichev, Y.F. (1991). New data on the structure of the upper mantle of the Baikal Rift System. *Doklady AN SSSR, 325*(5), 944—949 (in Russian).

Abubakirov, I.R., & Gusev, A.A. (1990). Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte Carlo simulation of record envelope of a near earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors, 64*(1),

52—67. https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90005-I.

Aki, K. (1981). Source and scattering effects on the spectra of small local earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America, 71*(6), 1687—1700.

Aki, K., & Chouet, B. (1975). Origin of coda-waves: source, attenuation and scattering effects. *Journal of Geophysical Research, 80*(23), 3322—3342. https://doi.org/10.1029/JB080i023p03322.

Havskov, J., & Ottemoller, L. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology: With Sample Data, Exercises and Software*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 347 p.

Hoshiba, M. (1991). Simulation of multiple scattered coda wave excitation based on the energy conservation law. *Physics of the Earth and Planetary Interiors, 67*(1-2), 123—136. https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90066-Q.

Hutton, L.K., & Boore, D.M. (1987). The ML scale in Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America, 77*(6), 2074—2094.

Mak, S., Chan, L.S., Chandler, A.M., Koo, R. 2004. Coda Q estimates in the Hong Kong region. *Journal of Asian Earth Sciences, 24*(1), 127—136.

Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiba, M., Aki, K., & Zeng, Y. (1992). A comparative study of scattering, intrinsic, and coda Q-1 for Hawaii, Long Valley, and central California between 1.5 and 15.0 Hz. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97*(B5), 6643—6659. https://doi.org/10.1029/91JB03094.

Mitchell, B. (1981). Regional variation and frequency dependence of Qb in the crust of the United States. *Bulletin of the Seismological Society of America, 71*, 1531—1538.

Rautian, T.G., & Khalturin, V.I. (1978). The use of coda for determination of the earthquake source spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America, 68*, 923—948.

Sato H., & Fehler M. (1998). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous Earth*. Berlin: Springer, 308 p.

Определение энергетических параметров сейсмических событий Закарпатского прогиба с учетом добротности земной коры

Ю.А. Андрущенко, В.И. Осадчий, А.И. Лящук, И.В. Корниенко, М.И. Халабуда, 2021

Главный центр специального контроля Национального центра управления и испытаний космических средств ГКА Украины, смт Городок, Украина

Закарпатье характеризуется значительными различиями в строении и геодинамике литосферы по сравнению с другими сейсмоактивных районами Украины, что обусловливает особенности сейсмотектонического процесса данного региона. Пространственное распределение сейсмичности Закарпатского прогиба тесно связано с разломно-блоковой структурой фундамента. Важными характеристиками сейсмического процесса в Закарпатье являются энергетические параметры местных землетрясений — магнитуда, интенсивность, энергетический класс. Именно эти величины положены в основу сейсмического районирования. Методики, с помощью которых определяются энергетические параметры местных землетрясений, не в полной мере учитывают влияние глубин гипоцентров и региональные особенности путей распространения сейсмических волн. Таким образом, актуален вопрос

определения количественных показателей добротности земной коры исследуемого региона и разработки подходов к определению калибровочной функции для оценки локальных магнитуд.

Представлены результаты исследования, направленные на определение калибровочной функции для расчета энергетических характеристик землетрясений Закарпатского прогиба с учетом параметров затухания колебаний в земной коре. С использованием цифровых записей сейсмических сигналов из района Закарпатской прогиба, полученных на элементах Украинской сейсмической группы, а также сейсмических станциях «Каменный Брод», «Подлубы», «Зеленица» и «Любар», определены количественные показатели добротности земной коры и разработаны подходы к определению калибровочной функции для оценки локальной магнитуды и ее проверки на реальных сигналах.

Ключевые слова: сейсмические источники, энергетический класс, кода-волны, добротность, коэффициент затухания, максимальная амплитуда, магнитуда, локальная магнитуда.