

УДК 623.4.011

А.Л. Мельник, пом. нач.  
О.О. Петровський, ст. пом. нач.  
О.Ю. Тофанчук, н.с.

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

## ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРІВ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

(Представлено к.т.н., с.н.с. І.М. Сацуком)

Показано можливість використання інтегральних характеристик спектрів сейсмічних хвиль для дослідження їх енергетичних властивостей. Вводяться інтегральні параметри  $\Phi_i$ , які дозволяють кількісно оцінити структуру сейсмічного сигналу.

**Постановка проблеми.** Відомо [1], що визначення основних динамічних параметрів осередків сейсмічних явищ (сейсмічної енергії; сейсмічного моменту; повних, звільнених й ефективних напружень; деформації в області осередку тощо), які дозволяють оцінити інтенсивність цих процесів, – досить складне завдання. Однією з найбільш важливих і разом з тим простих величин, що характеризують ці динамічні процеси, є енергія сейсмічної хвилі.

Найбільш поширеним у сейсмологічній практиці є оцінювання енергії сейсмічних явищ за їх величиною відповідно до шкали магнітуд.

Визначення магнітуди здійснюється за відношенням, яке введено Гутенбергом, Ріхтером [1]:

$$M = \lg\left(\frac{A}{T}\right)_{max} + \sigma(\Delta), \quad (1)$$

де  $M$  – магнітуда сейсмічної хвилі;  $\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$  – відношення, що відповідає максимальній коливальній швидкості вертикальної компоненти сейсмічної хвилі;  $\sigma(\Delta)$  – калібрувальна функція.

Вираз (1) набув широкого розповсюдження завдяки відносно простій можливості визначення магнітуди шляхом розрахунку параметрів сейсмічних сигналів за сигналами, які реєструються в пункті спостереження.

Разом з цим дана методика має деякі недоліки, які значно впливають на отримання стійкої оцінки магнітуди і, відповідно, класифікацію сейсмічних явищ за їх енергетичними властивостями. До основних недоліків можна віднести наступні [1, 2]:

- розходження в отриманих оцінках магнітуд сейсмічного явища, розрахованих за різними типами сейсмічних хвиль (об'ємними  $P$ - та  $S$ -хвилями, поверхневими хвилями  $L_g$ ,  $L_r$  тощо);
- складність узгодження отриманих оцінок магнітуд сейсмічного явища, розрахованих за різними типами сейсмічних хвиль, та необхідність врахування багатьох чинників (типу апаратури реєстрації, властивості осередку та середовища розповсюдження сейсмічного сигналу);
- наявність суб'єктивних та об'єктивних факторів, що впливають на оцінку магнітуди [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Відомо [1], що фізичній сутності магнітуди найбільше відповідає параметр  $\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$ , який визначає максимальну коливальну швидкість сигналу. Обчислення параметра

$\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$  за сигналограмою сейсмічного явища (рис. 1) є досить суб'єктивним процесом і у багатьох випадках викликає певні труднощі [1, 2]. На практиці під час первинної обробки сигналограми оператор схильний вимірювати  $\frac{A_{max}}{T}$ , а не  $\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$ , що призводить до похибок в оцінюванні магнітуди.

Оцінювання інформативності параметрів сейсмічних сигналів ( $A_{max}$ ,  $T$ ,  $\frac{A_{max}}{T}$ ,  $\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$ ,  $\lg(A_{max})$ ,  $\lg\left(\frac{A_{max}}{T}\right)$ ), розрахованих за сигналами з погляду визначення магнітуди, проводилось у роботі [2].

Отримані коефіцієнти кореляції свідчать про те, що найбільш стійкий статистичний зв'язок спостерігається між значеннями амплітуди  $A_{max}$  (а не  $\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$ ) і магнітудою.

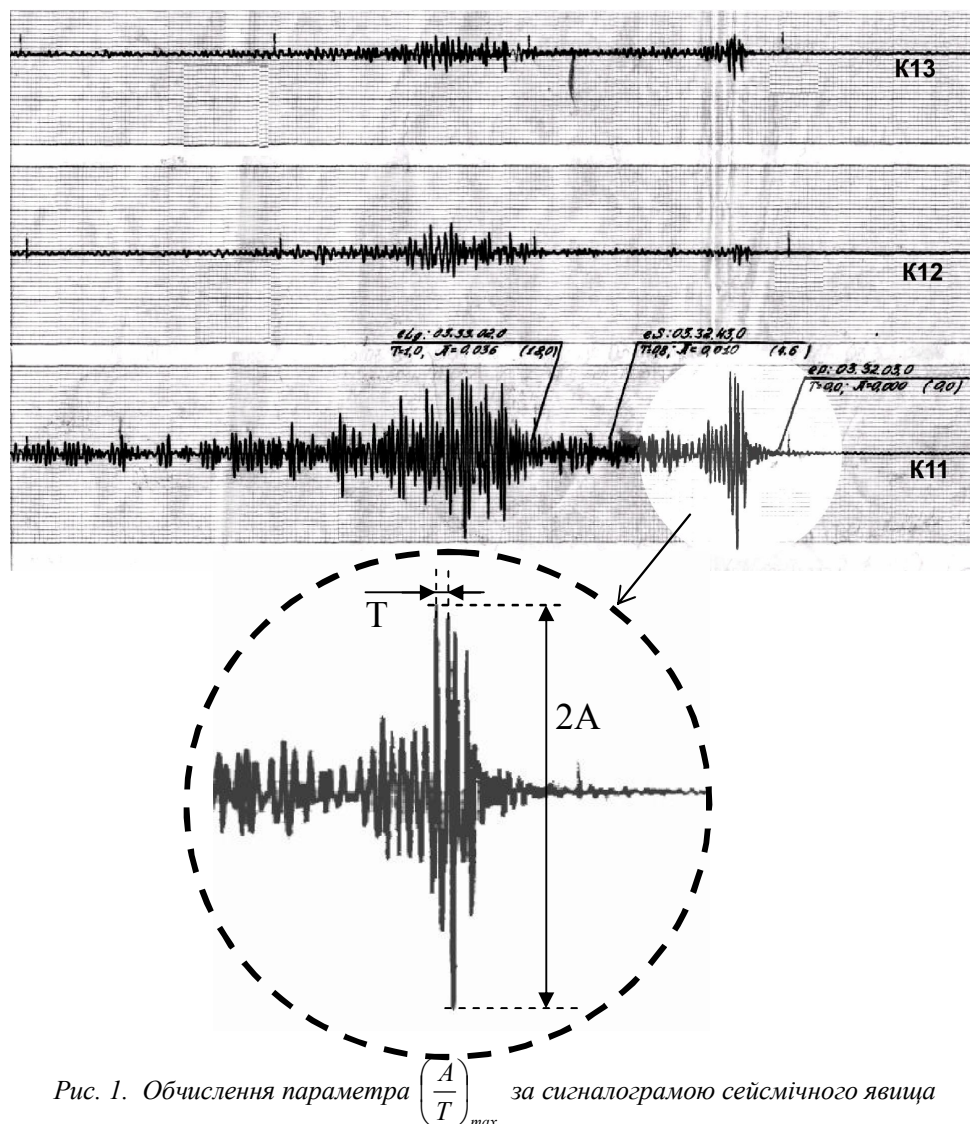


Рис. 1. Обчислення параметра  $\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$  за сигналограмою сейсмічного явища

Досить низька кореляція магнітуди сейсмічних сигналів і параметра  $\left(\frac{A}{T}\right)_{max}$ , за яким згідно з виразом (1) визначається магнітуда, дозволяє зробити припущення про необхідність пошуку нових методів визначення магнітуди, які б застосовувались при обробці сигналів.

Можливість застосування інтегральних параметрів спектрів сейсмічних хвиль для визначення магнітуди сейсмічних явищ досліджувалась у роботі [1]. Показано, що найбільш суттєвою перевагою інтегральних параметрів спектра є їх інваріантність відносно довжини обраної ділянки запису сейсмічної хвилі.

Аналіз багатьох робіт [3–6] показує, що на сучасному етапі розвитку сейсмології для отримання найкращих результатів при розрахунку основних кінематичних і динамічних параметрів сейсмічних явищ найбільш перспективним є дослідження амплітудних і фазових спектрів сейсмічних хвиль. У даних роботах для розв'язання задач оцінювання магнітуди сейсмічних явищ найбільш дієвим вбачається дослідження енергетичних властивостей спектрів сейсмічних хвиль, а саме їх інтегральних характеристик.

**Метою** статті є обґрунтування можливості застосування інтегральних параметрів спектрів сейсмічних хвиль для визначення енергетичних характеристик сейсмічних явищ і, зокрема, магнітуди.

**Актуальність проблеми, що вирішується.** Визначено [3], що за допомогою спектрального аналізу можуть бути вирішені такі завдання:

1. Вивчення спектрального складу корисних сигналів і перешкод (мікросейсмів). Знання спектрів корисного сигналу і перешкод дозволяє покращити умови реєстрації корисних хвиль (підвищити

відношення сигнал/шум, здійснити оптимізацію групи сейсмографів з метою селекції коливань як за частотною ознакою, так і за ознакою спрямованості або за їх швидкісними характеристиками).

2. Визначення основних параметрів спектрів корисного сигналу (періоду максимуму сейсмічних хвиль, ширини смуги спектра та крутизни спадання його схилів, співвідношення амплітуд різних спектральних складових) для подальшого використання при ідентифікації сейсмічних хвиль.

3. Визначення спектрів простих хвиль, які утворюють інтерференційне коливання, за умови відмінностей у переважаючих періодах спектрів простих хвиль.

4. Визначення корисних сигналів, зареєстрованих широкосмуговою апаратурою, на фоні інтенсивних перешкод.

5. Визначення відмінностей у спектрах сейсмічних явищ техногенного походження (включаючи також ядерні вибухи) і землетрусів, які виникають у тому самому районі та реєструються системою одних і тих же станцій.

6. Вивчення спектрів основного поштовху землетрусу й наступних афтершоків з метою їх ідентифікації.

7. Оцінювання поглинаючих властивостей середовища й визначення залежності коефіцієнта поглинання від частоти сейсмічного сигналу.

8. Побудова спектральних калібрувальних кривих для енергетичної класифікації сейсмічних явищ.

Про актуальність побудови глобальної системи енергетичної класифікації, що ґрунтується на спектрально-часових характеристиках сейсмічних коливань і є аналогічною системі годографів Джеффрікса - Булена або системі магнітуд, говориться і в роботі [5].

**Викладення основного матеріалу.** Відомо [7], що енергія сигналу на часовому інтервалі довжиною  $\Delta t$  навколо  $t_0$  розраховується згідно з виразом:

$$E(t_0, \Delta t) = \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} |x(t)|^2 dt, \quad (2)$$

де  $x(t)$  – часовий опис сигналу (в нашому випадку під ним будемо розуміти сигнал сейсмічної хвилі).

Тоді повна енергія сигналу задається виразом:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt. \quad (3)$$

Згідно з теоремою Парсеваля [7] відомо, що повна енергія сигналу не залежить від обраного опису. Значення повної енергії, розрахованої із часового і частотного опису сигналу, співпадають, тоді

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df, \quad (4)$$

де  $X(f)$  – фур'є-образ сигналу  $x(t)$ .

Виходячи з (2)...(4), запишемо вираз для енергії сигналу в смузі частот  $\Delta f$  навколо  $f_0$ :

$$E(f_0, \Delta f) = \int_{f_0 - \frac{\Delta f}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta f}{2}} |X(f)|^2 df. \quad (5)$$

Подамо вираз (5) у вигляді:

$$E_x(f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} S_x(f) df, \quad (6)$$

де  $S_x(f) = |X(f)|^2$  – спектральна щільність потужності сигналу [7];  $f_1 = \frac{f_0 - \Delta f}{2}$  – нижня межа

інтегрування смуги частот;  $f_2 = \frac{f_0 + \Delta f}{2}$  – верхня межа інтегрування смуги частот.

З огляду на вищесказане в загальному вигляді введемо інтегральні параметри спектра  $\Phi_i$ , які характеризують енергію сигналу в заданих смугах частот  $\Delta f_i = f_k - f_j$ . Тоді вираз (6) набуває вигляду:

$$\Phi_i = \int_{f_j}^{f_k} S_x(f) df, \quad (7)$$

де  $S_x(f)$  – спектральна щільність потужності сигналу  $x(t)$ ;  $f_k, f_j$  – межі інтегрування на осі частот для  $\Phi_i$ -го параметра.

Для того, щоб вираз (7) відповідав вищезначеним умовам, визначимо наступні обмеження:

- 1) ділянка запису сигналу повинна включати максимальну амплітуду сейсмічної хвилі;
- 2) межі інтегрування обираються таким чином, щоб спектр у цьому діапазоні частот мав хоча б два екстремуми.

Тобто інтегральні параметри спектра є спектральними аналогами амплітуд, причому розрахунок інтегралів у різних частотних інтервалах дозволяє кількісно оцінити структуру коливання.

Фізичне трактування інтегральних параметрів  $\Phi_i$ , розрахованих при дотриманні цих умов, таке: інтеграл від спектра в смузі частот, що включає основний низькочастотний максимум, є спектральним аналогом максимальної видимої на записі амплітуди сейсмічної хвилі. Інтеграл у високочастотному діапазоні визначає сумарний внесок в амплітудний спектр, пов'язаний з особливостями коливання, таким, як крутизна вступу хвилі, високочастотні ускладнення на фоні основної гармоніки.

Така фізична інтерпретація, а також мала критичність інтегральних параметрів спектрів до похибок аналізу дозволяє зробити припущення про корисність застосування цих параметрів при визначенні основних характеристик осередку сейсмічного явища і, безпосередньо, магнітуди.

**Висновки.** Складність розрахунку магнітуди сейсмічного явища за сигналограмою зумовлює необхідність переходу до частотного опису сейсмічного сигналу. Такий перехід дозволяє позбутися багатьох факторів, які негативно впливають на отримання стійкої оцінки як магнітуди, так й інших параметрів сейсмічних сигналів, які характеризують їх енергію.

Введення інтегральних параметрів  $\Phi_i$  дозволяє кількісно оцінити структуру коливання з точки зору енергетичних властивостей та трансформацію енергії у різних діапазонах частот сейсмічного сигналу.

**Напрямки подальших досліджень.** Очевидно, що для обґрунтування можливості застосування інтегральних параметрів спектрів сейсмічних хвиль для визначення магнітуди сейсмічних явищ необхідно окреслити ряд питань, які потребують практичного вирішення.

Серед них доцільно виділити такі:

- вибір типу сейсмічної хвилі для розрахунку інтегральних параметрів;
- аналіз впливу осередку і середовища розповсюдження хвилі на формування сигналограми;
- аналіз спектрів обраних хвиль для визначення основних закономірностей їх зміни при зміні магнітуди;
- вибір типу апаратури, що забезпечує реєстрацію обраної сейсмічної хвилі в необхідному частотному діапазоні;
- вибір ділянки запису обраної хвилі;
- обґрунтування вибору меж інтегрування для визначення інтегральних параметрів;
- дослідження інформативності розрахованих інтегральних параметрів з погляду забезпечення отримання стійкої оцінки енергетичних властивостей сейсмічних явищ.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 1: Сб. ст. // Межведомственный совет по сейсмологии и строительству при Президиуме АН СССР. – М., 1974.
2. Петровський О.О., Кирилюк В.А., Петрук М.Д. Оцінювання інформативності параметрів сейсмічних сигналів дальньої зони з погляду визначення магнітуди // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем / Технічні науки: Зб. наук. пр. / Житомир. військ. ін-т радіоелектроніки. – Житомир, 2004. – № 7.
3. Пасечник И.В. Характеристика сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. – М.: Наука, 1970. – 193 с.
4. Машков О.А., Кирилюк В.А. Методика ідентифікаційного виявлення сейсмічних сигналів // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. / Ін-т проблем моделювання в енергетиці. – К., 2003. – Вип. 19. – С. 31–41.
5. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Распознавание промышленных взрывов и слабых землетрясений по их сейсмической энергии // Физика Земли. – 2001. – № 2. – С. 69–74.
6. Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 2: Сб. ст. // Межведомственный совет по сейсмологии и строительству при Президиуме АН СССР. – М., 1974.
7. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 1. – М.: Мир, 1983. – С. 41–47.

МЕЛЬНИК Антон Леонідович – помічник начальника науково-організаційного відділу Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка сигналів;

– математичне моделювання складних систем.

ПЕТРОВСЬКИЙ Олександр Олексійович – старший помічник начальника науково-організаційного відділу Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інформаційні системи прийняття рішень;
- цифрова обробка геофізичних сигналів.

ТОФАНЧУК Олександр Юрійович – науковий співробітник Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- оцінка ефективності складних геоінформаційних систем;
- методи та алгоритми обробки геофізичних сигналів.

Подано 28.03.2007