

УДК 550.34

В.М. Ващенко<sup>1</sup>, І.В. Толчонов<sup>2</sup>, Ю.О. Гордієнко<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний антарктичний науковий центр, Київ<sup>2</sup>Головний Центр спеціального контролю НКАУ, Макарів-1

## АНАЛІЗ ПЕРШОГО ВСТУПУ СЕЙСМІЧНОГО СИГНАЛУ З МЕТОЮ ОПЕРАТИВНОГО ОПОВІЩЕННЯ ПРО ЗЕМЛЕТРУСИ

В роботі показано актуальність розробки нових підходів до обробки сейсмічної інформації з метою зменшення часу оповіщення користувачів про потужний землетрус у ближній зоні. Розглядаються підходи щодо оперативного викриття сигналів від землетрусів в ближній зоні та оцінки їх параметрів за результатами аналізу першого вступу. Оцінюються переваги використання кореляційного аналізу та апарату вейвлет-перетворень. Запропонований підхід дозволить здійснювати оповіщення користувачів про землетрус, який відбувся в даному районі, до підходу найбільш небезпечних (руйнівних) фаз сейсмічного сигналу.

**Ключові слова:** землетрус, сейсмічний сигнал, вейвлет-перетворення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Землетруси за своїми руйнівними наслідками та кількістю жертв займають одне з перших місць серед інших природних катастроф. Кожен рік на земній кулі відбуваються декілька сотень тисяч землетрусів і понад сто з них руйнівні [1].

Проблема сейсмічного моніторингу є цілком актуальною для України. Аналіз особливостей сейсмічності території України та суміжних держав вказує на наявність трьох найбільш небезпечних сейсмоактивних районів, землетруси з яких являють собою небезпеку для території України: гори Вранча – практично для всієї території України; Кримсько-Чорномоська зона – для південних областей; українська частина Карпат – для західних областей. Моніторинг цих зон з метою викриття ознак підготовки майбутнього землетрусу та своєчасного оповіщення користувачів є дуже важливою задачею.

З метою підвищення безпеки проживання населення та експлуатації виробничих фондів у сейсмо-небезпечних регіонах країни Постановою Кабінету Міністрів України від 11 вересня 1995 року № 728 була утворена Національна система сейсмічних спостережень (НССС).

До НССС входить Національне космічне агентство України (НКАУ), в складі якого задачі пов'язані з контролем геофізичної обстановки виконує Головний центр спеціального контролю (ГЦСК). Одним з головних завдань ГЦСК, в межах функціонування НССС є оперативне визначення місця, часу і параметрів землетрусів, інших геофізичних явищ, та забезпечення органів виконавчої влади інформацією про землетруси та їх можливі наслідки.

На даний час, для виконання покладених завдань в ГЦСК реалізовано моніторинг сейсмічної обстановки засобами спостережень сейсмічного ме-

тоду. Основною метою моніторингу є викриття та оперативне забезпечення відповідних органів інформацією про місце і час землетрусів з інтенсивністю 3 і більше балів на території України та 6 і більше балів за кордоном, з часом надання попередньої інформації користувачам 15 хвилин.

Перехід на цифрову основу обробки та аналізу сейсмічної інформації дає можливість використовувати нові технології обробки, що в свою чергу призводить до зменшення часу прийняття рішення щодо ідентифікації сейсмонебезпечного району (СНР) в якому відбувся землетрус, при однакових вимогах достовірності. Модернізація засобів спостереження, передачі та обробки вимірювальних даних, перехід на цифрову обробку інформації, яка проводиться в ГЦСК в межах національних та міжнародних програм, дозволяє перейти на якісно новий рівень моніторингу сейсмічної обстановки [2]. Однак ці можливості на даний час реалізовані частково, оскільки реалізовані у ГЦСК алгоритми обробки сейсмічних даних засновані на алгоритмах ручної обробки сигналів оператором, більшість яких розроблялись для моніторингу надпотужних вибухів [3].

Таким чином, на даний час задача розробки нових підходів до обробки сейсмічної інформації з метою зменшення часу оповіщення користувачів про потужний землетрус у ближній зоні є **актуальною**.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [4] проводився аналіз можливості використання першого вступу сейсмічного сигналу для прийняття рішення про сейсмічну подію та оцінку його параметрів. Було доведено, що враховуючи особливості розподілу енергії по складовим сейсмічного сигналу від землетрусів у ближній зоні (БЗ), тривалість цих фаз та швидкість їх розповсюдження, час дії, за результатами обробки першого вступу (Р-хвили) сейсмічного сигналу з'являється можливість

здійснювати упередження користувачів про найбільш небезпечні фази від потужних землетрусів з ближньої зони (S- та L-хвилі). Також проведена оцінка часу упередження мережею сейсмічних спостережень ГЦСК НКАУ та ряду сейсмічних станцій Румунії основних адміністративних центрів України та АЕС про землетруси з зони гір Вранча.

В роботі [5] розглянуто можливість застосування апарату вейвлет-перетворення для ідентифікації СНР в ближній зоні. Проведено оцінку рівня розкладу з урахуванням особливостей системи сейсмічних спостережень ГЦСК. Однак на даний час відсутні методологічні підходи щодо ідентифікації СНР, в якому відбувся землетрус за результатами аналізу обмеженої вибірки – у даному випадку першого вступу сейсмічного сигналу (Р-хвилі).

**Формулювання мети статті.** Таким чином, метою статті є розробка методологічних підходів щодо викриття сигналів від землетрусів в ближній зоні та оперативної оцінки їх параметрів за результатами аналізу першого вступу.

### Виклад основного матеріалу дослідження

На даний час ідентифікація СНР БЗ, в якому відбувся землетрус, здійснюється за результатами комплексного аналізу запису трикомпонентної сейсмічної станції першого вступу сейсмічного сигналу Р-хвилі на предмет наявності характерних ознак. Основним критерієм, який використовується для віднесення зареєстрованої сигнальної складової до землетрусу з СНР БЗ, є координатний, суть якого полягає у визначенні кутових характеристик першого вступу сейсмічного сигналу та визначенням відповідності цих характеристик одному з СНР БЗ.

За результатами обробки даних трикомпонентної установки можуть бути обчислені азимут на джерело та кут виходу сейсмічного сигналу на денну поверхню за формулами:

$$\alpha = \arctg \frac{x_1^{(E)}}{x_1^{(N)}}; \quad \gamma = \arctg \frac{x_1^{(Z)}}{\sqrt{(x_1^{(N)})^2 + (x_1^{(E)})^2}}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – азимут на джерело сейсмічної хвилі;  $\gamma$  – кут виходу сейсмічної хвилі на земну поверхню;  $x_1^{(N)}$ ,  $x_1^{(E)}$ ,  $x_1^{(Z)}$  – поточне значення зміщення відповідно каналів Північ-Південь, Схід-Захід та вертикального каналу.

Визначені параметри дають інформацію про весь сейсмічний сигнал та ефективно використовуються для поверхневих джерел. Для сейсмічних подій з осередками на певній глибині пряме використання даного підходу призводить до помилкового визначення місцеположення осередку (рис. 1).

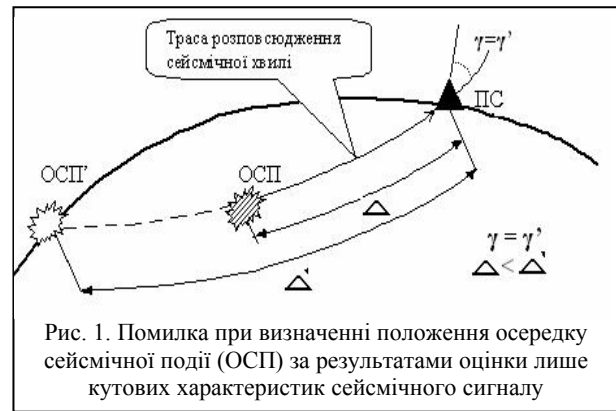


Рис. 1. Помилка при визначенні положення осередку сейсмічної події (ОСП) за результатами оцінки лише кутових характеристик сейсмічного сигналу

Для підвищення ймовірності визначення належності сигналу до певного СНР БЗ необхідно використовувати додаткову інформацію, що характеризує цей СНР. В якості такої інформації пропонується ввести ознаки, що характеризують форму сигналу.

Використовується два підходи до ідентифікації сигналу за формою:

1) непараметричної ідентифікації, ознаки при цьому можуть неповністю характеризувати сигнал. Вибір ознак може здійснюватись за наявними статистичними даними та шляхом експертної оцінки з використанням досвіду інтерпретатора;

2) використання в якості еталонів наявних сигналів, порівняння сигналу, що ідентифікується з еталонним сигналом та комплексування результатів ідентифікації.

Перевагою другого способу є те, що з часом кількість еталонних сигналів буде збільшуватись, що можна використовувати для підвищення якості ідентифікації. В якості міри схожості між вибіркою прийнятого  $x$  та еталонного  $x_e$  сигналів пропонується використовувати статистичний коефіцієнт кореляції:

$$\hat{r}_{xx_e} = \frac{1}{n \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_{x_e}} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{m}_x)(x_{ei} - \hat{m}_{x_e}), \quad (2)$$

де  $n$  – довжина вибірки;  $\hat{\sigma}_x$ ,  $\hat{m}_x$  та  $\hat{\sigma}_{x_e}$ ,  $\hat{m}_{x_e}$  – оцінки середньоквадратичних відхилень та математичних сподівань  $x$  та  $x_e$  відповідно.

Таким чином, суть визначення належності сигналу до заданого СНР за формою сигналу полягає в пошуку максимуму коефіцієнта кореляції  $\max(\hat{r}_{xx_e}(\bar{f}))$  множини  $\bar{f}$  еталонних сигналів та порівнянні його з порогом.

Розрахунок коефіцієнтів кореляції зареєстрованих в ГЦСК сигналів від сейсмічних подій з осередками на різних відстанях від пункту спостереження, показав, що середнє значення коефіцієнта взаємної кореляції Р-хвиль для сигналів з певного СНР складає 0,73÷0,78, при цьому значення взаємної кореляції

ції для сигналів з інших відстаней  $0,55 \div 0,68$  (рис. 2, ряд 1).

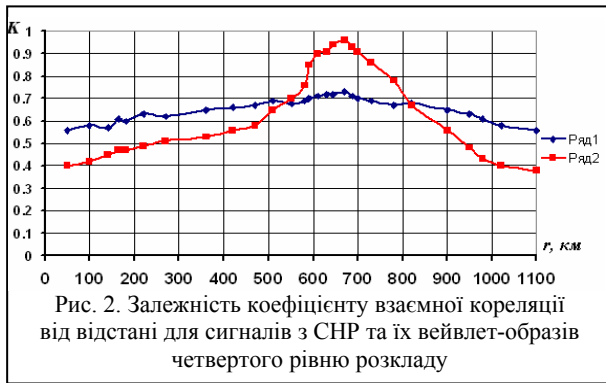


Рис. 2. Залежність коефіцієнту взаємної кореляції від відстані для сигналів з СНР та їх вейвлет-образів четвертого рівню розкладу

Крім того, враховуючи особливості СНР, розподіл осередків землетрусів за глибинами та площею, різний енергетичний клас подій, сигнали від яких беруться за еталон, необхідно значення кореляційної функції обчислювати за кожним еталоном окремо. В зв'язку з тим, що кількість еталонних сигналів досить велика та буде зростати в подальшому, то і обчислювальні затрати для використання даного методу досить значні. Для того, щоб зменшити кількість обчислювальних затрат пропонується використовувати математичний апарат вейвлет-перетворення [5 – 8].

Вейвлет-перетворення одномірного сигналу полягає в його розкладанні за базисом, сконструйованим з функції, що володіє визначеними властивостями, за допомогою масштабних змін і переносів. В якості базису розкладу пропонується використовувати вейвлет Хаара. Перевагами базису Хаара є те, що для нього розроблені швидкі алгоритми виконання дискретного вейвлет-перетворення, що особливо важливо в задачах цифрової обробки сейсмічних сигналів в режимі реального часу [7].

Будь-яку функцію можна подати на деякому заданому рівні розкладу  $j$  в ряд виду

$$y_k = \sum_{k=0}^N a_{j,k} \varphi_{j,k} + \sum_{k=0}^N d_{j,k} \psi_{j,k}, \quad (3)$$

де  $a_{j,k}$  та  $d_{j,k}$  – значення відповідно апроксимуючих та деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів на  $j$ -му рівні;  $\varphi_{j,k} = 2^{j/2} \varphi(2^j x - k)$  – значення скейлінг-функції вейвлета на  $j$ -му рівні;  $\psi_{j,k} = 2^{j/2} \psi(2^j x - k)$  – значення "материнського вейвлета" на  $j$ -му рівні.

Вираз (3) дозволяє описати сейсмічний сигнал за системою базисних функцій  $\varphi_{j,k}$  та  $\psi_{j,k}$ . Пряме вейвлет-перетворення у базисі Хаара для довільного  $j$  описується формулами:

$$a_{j-n,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [y_{j,2k} + y_{j,2k+1}]; \quad (4)$$

$$d_{j-n,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [y_{j,2k} - y_{j,2k+1}]. \quad (5)$$

За результатами оцінки рівня розкладу вейвлет перетворення було визначено, що найбільш важливу інформацію про форму сигналу несуть апроксимуючі коефіцієнти четвертого рівня розкладу, використання яких дозволяє отримати значення коефіцієнти взаємної кореляції Р-хвиль для сигналів з підконтрольних СНР  $0,91 \div 0,95$ , при цьому значення взаємної кореляції для сигналів з інших відстаней  $0,38 \div 0,65$  (рис. 2, ряд 2). Перехід до оперування з вейвлет-образами дозволить зменшити обсяг еталонної вибірки в  $2^4$  разів відносно похідної.

Іншим важливим моментом є оцінка тривалості сигнального фрагменту та відповідного вейвлет-образу, необхідного для ідентифікації СНР БЗ.

Трансформація сигнальної частини особливості середовища розповсюдження буде мати індивідуальний характер для кожної конкретної зв'язки „СНР – пункт спостереження”. Результати досліджень показали, що для ідентифікації СНР БЗ, в якому відбувся землетрус, з використанням кореляційної схеми, достатньо залучити до обробки вибірку з 10 елементів.

Оскільки в якості вейвлет-образів використовувались апроксимуючі коефіцієнти четвертого рівня розкладу, то 10 елементному вейвлет-образу відповідатиме  $10 \times 2^4$  елементна вибірка вхідного сигналу, що в свою чергу відповідає 4 секундному запису першого вступу сигналу при частоті дискретизації 40 Гц (рис. 3).

Зменшення тривалості сигнальної частини, залученої до обробки, дозволить зменшити час попередньої ідентифікації СНР, в якому відбувся землетрус, та оцінити його параметри.

Використання запропонованого підходу щодо упередження найбільш небезпечних фаз сейсмічного сигналу від землетрусів з осередками у СНР БЗ дозволяє зменшити час надання інформації користувачам про землетрус з осередком у СНР БЗ з 15 хвилин до 1 хвилини.

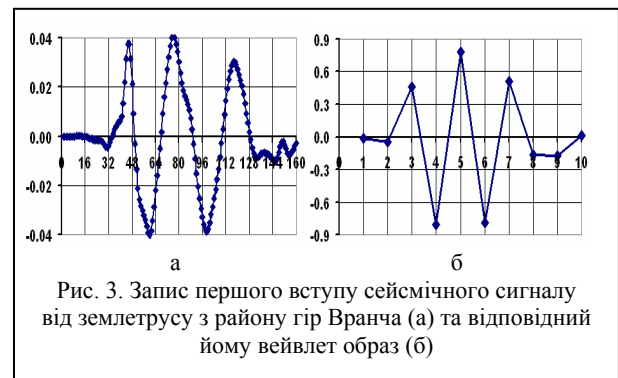


Рис. 3. Запис першого вступу сейсмічного сигналу від землетрусу з району гір Вранча (а) та відповідний йому вейвлет образ (б)

**Висновки**

Введення додаткової інформації щодо характеру хвильових форм сигнальної частини, зменшення тривалості сигнальної частини, залученої до обробки, дозволяє зменшити обсяг вимірювальної інформації для проведення попереднього визначення САР БЗ, в якому відбувся землетрус.

Результати розрахунків (досліджень) показали, що для сигналів з сейсмонезбезпечного району гір Вранча достатньо провести аналіз 4-секундного запису першого вступу для прийняття рішення щодо землетрусу з цього району.

Враховуючи особливості перерозподілу енергії сейсмічного сигналу від землетрусів у ближній зоні, при реалізації запропонованого підходу (при ідентифікації сейсмонезбезпечного району за результатами обробки першого вступу) з'являється можливість попередження про руйнівні фази сейсмічного сигналу.

**Список літератури**

1. Антикаев Ф.Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах. – М.: Наука, 1969. – 104 с.
2. Дядюра В.А., Михайлик И.Ю., Пененко А.В и др. Украинская сейсмическая группа. Модернизация аппаратно-программных средств // Геофизический журнал. – 2000. – Т. 22, № 3. – С. 70-77.

3. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. – М.; Саранск: Тип. „Красный Октябрь”, 2005. – 420 с.

4. Гордієнко Ю.О. Методика контролю та прогнозу сейсмічної обстановки у ближній зоні системою спостережень ГЦСК НКАУ // Вісник ЖДТУ. – 2004. – Вип. IV (31). Том 1. – С. 101-111.

5. Гордієнко Ю.О., Солонець О.І., Шапка В.М., Проценко М.М. Особливості застосування апарату вейвлет-перетворення при ідентифікації сейсмоактивного району в ближній зоні // Зб. наук. праць ХУПС. – Х.: ХУПС. – 2006. – Вип. 6 (12). – С. 104-106.

6. Стаховкий И.Р. Вейвлетный анализ временных сейсмических рядов // Доклады Академии наук. – 1996. – Т. 350, №3. – С. 393-396.

7. Коваленко М.В., Проценко М.М. Вейвлет-перетворення та його застосування для обробки сейсмічних даних // Вісник ЖІТІ. – 2003. – № 24. – С. 82-86.

8. Коваленко М.В., Проценко М.М. Методика стиснення цифрової інформації за допомогою вейвлет-перетворень // Збірник наукових праць. – Ж.: ЖВІРЕ, 2003. – Вип. 6. – С. 11-17.

Надійшла до редколегії 11.04.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співр. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**АНАЛИЗ ПЕРВОГО ВСТУПЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА С ЦЕЛЬЮ ОПЕРАТИВНОГО ОПОВЕЩЕНИЯ О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ**

Ващенко В.Н., Толченов И.В., Гордиенко Ю.А.

*В работе показана актуальность разработки новых подходов к обработке сейсмической информации с целью уменьшения времени оповещения пользователей о мощном землетрясении в ближней зоне. Рассматриваются подходы к оперативному выявлению сигналов от землетрясений в ближней зоне и оценки их параметров по результатам анализа первого вступления. Оцениваются преимущества использования корреляционного анализа и аппарата вейвлет-преобразований. Предложенный подход позволит осуществлять оповещение пользователей о землетрясении, которое состоялось в данном районе, до подхода наиболее опасных (разрушительных) фаз сейсмического сигнала.*

**Ключевые слова:** землетрясение, сейсмический сигнал, вейвлет-преобразование.

**ANALYSIS OF THE FIRST ENTRY OF SEISMIC SIGNAL WITH PURPOSE OF EFFICIENT NOTIFICATION ABOUT THE EARTHQUAKES**

Vaschenko V.N., Tolchonov I.V., Gordienko J.A.

*Actuality of development of new approaches to treatment of seismic information with purpose of reduction of time of notification of users about the powerful earthquake in the fellow creature area is shown in work. Approaches are considered to the efficient exposure of signals from the earthquakes in the near area and estimation of their parameters on results analysis of the first entry. Advantages of use of correlation analysis and wavelet-transformations are estimated. The offered approach will allow carrying out notification of users about the earthquake, which took place in the given district, to approach of the most dangerous (destructive) phases of seismic signal.*

**Keywords:** earthquake, seismic signal, wavelet-transformation.