

УДК 550.34

Ю.О. Гордієнко<sup>1</sup>, О.І. Солонець<sup>2</sup>, А.В. Кошель<sup>3</sup>, Д.В. Руденко<sup>4</sup><sup>1</sup> Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, Житомир<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>3</sup> Головний центр спеціального контролю, смт. Городок<sup>4</sup> Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТРИКОМПОНЕНТНОЮ СЕЙСМІЧНОЮ СТАНЦІЄЮ

У роботі проведено аналіз методів виявлення сейсмічних сигналів за результатами реєстрації трикомпонентною сейсмічною станцією в рамках вирішення завдань інформаційного забезпечення про сейсмічну обстановку. Надані рекомендації щодо подальших досліджень з урахуванням особливостей мережі сейсмічних спостережень Головного центру спеціального контролю.

**Ключові слова:** сейсмічний сигнал, виявлення, трикомпонентна сейсмічна станція.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Останні землетруси з епіцентрами на території України та суміжних держав, промислові вибухи та вибухи на потенційно небезпечних об'єктах свідчать про необхідність оперативного визначення факту сейсмічної події, оцінювання її параметрів та можливих наслідків з метою своєчасного надання інформації міністерствам та відомствам для проведення відповідних заходів [1]. Актуальним також на даний час є пошук шляхів використання сейсмічних засобів для моніторингу подій на Сході України.

Для здійснення сейсмічних спостережень в Головному центрі спеціального контролю Державного космічного агентства України розгорнуто мережу сейсмічних спостережень, яка постійно удосконалюється та розширюється. Ключовим інформаційним елементом мережі сейсмічних спостережень ГЦСК є трикомпонентні сейсмічні станції (ТКСС). Обробка вимірювальних даних ТКСС здійснюється в ручному та автоматичному режимах.

Модернізація сейсмічних засобів спостереження, передачі та обробки вимірювальних даних, перехід на цифрову обробку інформації дозволяють перейти на якісно новий рівень моніторингу сейсмічної обстановки. Однак методологічні підходи, що використовуються в ГЦСК для обробки вимірювальних даних сейсмічного методу, потребують суттєвого удосконалення для розширення можливостей мережі сейсмічних спостережень щодо вирішення поставлених завдань. Таким чином, задача розробки нових та удосконалення існуючих методів виявлення сейсмічних сигналів за результатами спостережень ТКСС є **актуальною**.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням сейсмічного моніторингу присвячена низка робіт, як фундаментальних так і дослідницьких [2–12]. Однак більшість запропонованих підходів

спрямовані на вирішення окремих проблем, вимагають значних обчислювальних витрат та використовуються у постоперативному режимі часу.

На даний час основна тенденція виявлення сейсмічної події в автоматичному режимі полягає у використанні відносно простих процедур обробки вимірювальних даних, які дозволяють оперативно здійснювати аналіз даних [3], але при цьому збільшується щільність мережі сейсмічних спостережень. Територіальна обмеженість мережі сейсмічних спостережень ГЦСК зумовлює необхідність розробки методологічних засад вирішення завдань сейсмічного моніторингу окремим пунктом спостереження. Тому виникає необхідність провести аналіз існуючих методів виявлення сейсмічних сигналів з метою визначення пріоритетних напрямків досліджень та надання рекомендацій щодо удосконалення існуючих та розробки нових методів виявлення сейсмічних сигналів, ідентифікації їх складових, визначення місцеположення осередку сейсмічної події та оцінки її параметрів.

**Формулювання мети статті.** Метою статті є аналіз існуючих методів виявлення сейсмічних сигналів за результатами реєстрації трикомпонентною сейсмічною станцією в рамках вирішення завдань інформаційного забезпечення про сейсмічну обстановку окремим пунктом спостереження.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Вирішення завдань сейсмічного моніторингу окремим пунктом спостереження складається з наступних етапів – виявлення сейсмічного сигналу, ідентифікація складових сейсмічного запису (встановлення типів сейсмічних хвиль), локація осередку сейсмічної події, оцінка параметрів сейсмічного джерела [8]. При однопозиційних спостереженнях останні два етапи вирішуються за умови впевненого

вирішення задачі виявлення та визначення основних складових сейсмічного запису. Тому, при аналізі існуючих методів виявлення та обробки сейсмічних даних основна увага приділятиметься саме можливості вирішення цих задач.

Далі розглянуто основні методи виявлення сейсмічних сигналів, які використовуються у Міжнародному та Національних центрах обробки сейсмічних даних.

**Алгоритм STA/LTA.** На даний час основна тенденція виявлення сейсмічної події у автоматичному режимі полягає у використанні відносно простих процедур обробки вимірювальних даних, таких як, наприклад, алгоритм STA/LTA [3; 7]. Даний алгоритм дозволяє здійснювати аналіз даних за рахунок порівняння енергії сейсмічного сигналу в ковзних вікнах.

Автоматична локація сейсмічної події та визначення її параметрів при використанні зазначеного підходу потребує значного часу. Так для Міжнародної системи моніторингу [3] при використанні результатів реєстрації мережі первинних станцій час надання попередньої інформації становить 1 годину. Час надання даних про сейсмічну подію за даними первинної та допоміжної мережі становить 10 годин. Остаточна інформація про сейсмічну подію надається протягом 48 годин після її виявлення.

Обмеженість мережі сейсмічних спостережень ГЦСК та нерівномірність її розташування на території України обмежують можливості застосування наведених підходів, а розширення мережі вимагає значних фінансових витрат. Тому, окрім системного аналізу результатів реєстрації доцільним є використання методів обробки вимірювальних даних в автоматичному режимі для окремих ТКСС.

**Алгоритм кумулятивних сум.** Алгоритм являє собою послідовний критерій відношення ймовірностей для двох простих гіпотез  $H_1$  та  $H_0$ . Ідея алгоритму полягає в аналізі поведінки кумулятивної суми [4–5]:

$$S_t = S_{t+1} + \ln \frac{\omega(x_t / \Theta_1)}{\omega(x_t / \Theta_0)}, \quad (1)$$

де  $\omega(x_t / \Theta)$  - щільність імовірності параметра  $\Theta$  ( $\Theta = \Theta_1$  для  $H_1$  і  $\Theta = \Theta_0$  для  $H_0$ ), яка порівнюється на кожному кроці з двома порогоми  $\varepsilon$  та  $h$  ( $\varepsilon, h > 0$ ), які задаються, виходячи з умов забезпечення припустимих похибок першого та другого роду.

Якщо значення кумулятивної суми стає меншим, ніж  $-\varepsilon$ , то вона обнуляється, і робота алгоритму починається знову. При перевищенні значення кумулятивної суми порога  $h$  приймається рішення про наявність сигналу. Даний підхід потребує незалежності елементів часового ряду, що не має місця

при аналізі вимірювальних даних сейсмічного поля. Крім того, даний підхід дозволяє виявити лише вступ сейсмічного сигналу.

**Узгоджена фільтрація.** Узгоджений фільтр будується на основі критерію максимуму пікового відношення сигнал/шум та призначений для встановлення факту наявності сейсмічного сигналу у прийнятій реалізації [4]. При цьому вважається, що корисний сигнал заданий за формою та її викривлення при фільтрації не мають істотного значення. Частотна характеристика узгодженого фільтра має вигляд:

$$H(\omega) = S^*(\omega)/W(\omega), \quad (2)$$

де  $H(\omega)$  – амплітудно-частотна характеристика фільтра;  $S^*(\omega)$  – комплексно спряжений спектр сигналу, що очікується;  $W(\omega)$  – амплітудно-частотний спектр шуму.

Створення алгоритму узгодженої фільтрації не вимагає значних затрат, якщо перешкоду можна вважати білим шумом. Реально сейсмічний шум значно відрізняється від білого. Це призводить до неоптимальності виявлення сигналів. Крім того, синтез узгодженого фільтра вимагає знання форми сигналу або його частотного спектра, що не завжди має місце. Даний підхід використовується лише при вирішенні завдань моніторингу певних районів, для виявлення сигналів техногенного походження.

**Алгоритм Вейса-Аллена.** Суть цього способу полягає в обчисленні модифікованої функції  $f_i = x_i - x_{i-1}$  за першими різницями цифрових відліків та порівнянні її з функцією  $f_0$ , що являє собою середнє значення диференційної функції, помножене на константу, яка характеризує відношення сигнал/шум [6]:

$$f_0 = k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i. \quad (3)$$

Фактично алгоритм Вейса-Аллена реалізує смугову фільтрацію запису та пошук моменту перевищення сигналу у вибраній смузі частот певного рівня амплітуд. Основним недоліком даного методу є значний час реактивації алгоритму, що призводить до пропуску виявлення наступних складових сейсмічного запису.

**Методи розпізнавання образів.** Дані методи засновані на виявленні характерних ознак (сигнатур), які необхідно розпізнавати [6; 8]. Основою їх застосування є етап навчання на еталонних сигналах. Виявлення сейсмічного сигналу з осередком у підконтрольному районі здійснюється шляхом оцінки його відповідності відповідним «образам», які у свою чергу були зформовані на підставі ознак раніше зареєстрованих сигналів. Порівняння зареєстрованої вибірки з набором «образів» відбувається

шляхом розрахунку когерентності на декількох рівнях за потужністю спектрів. Основним недоліком даного підходу є необхідність наявності еталонних сигналів від конкретних подій з осередками у підконтрольних районах.

#### Поляризаційний аналіз.

На даний час основними найбільш раціональними напрямками обробки вимірювальних даних ТКСС є використання апарату поляризаційного аналізу та поляризаційної фільтрації [9–12].

Записи сейсмічних хвиль від вибухів, землетрусів та інших джерел сейсмічних збурень характеризуються лінійною поляризацією коливань, в той час як шуми являють собою результат суперпозиції хвиль, що приходять на станцію від різних джерел та мають низький рівень лінійності поляризації [9]. Ці відмінності сигналів та шумів можуть бути виявлені за допомогою поляризаційного аналізу коливань, а зменшення рівня шумів за даною ознакою може здійснюватися за допомогою поляризаційної фільтрації. В результаті виділяються додаткові фази, що є надзвичайно важливим при обробці слабких подій та локації осередку події. Крім того вони є особливо корисними при виявленні сигналів, що мають частоту, близьку до частоти шуму, де частотна фільтрація виявляється малоефективною.

Поляризаційний аналіз сейсмічного запису дозволяє чисельно оцінити, наскільки близько коливання описують фігуру, що за формою відповідає еліпсоїду. З цією метою за трикомпонентним записом  $\{x, y, z\}$  обчислюється матриця коваріацій [11]:

$$M = \begin{pmatrix} \text{cov}(x,x) & \text{cov}(x,y) & \text{cov}(x,z) \\ \text{cov}(y,x) & \text{cov}(y,y) & \text{cov}(y,z) \\ \text{cov}(z,x) & \text{cov}(z,y) & \text{cov}(z,z) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Квадратична форма (еліпсоїд), що задається цією матрицею, приводиться до головних осей. Велика вісь еліпсоїда характеризує орієнтацію в просторі повного вектора зміщення певного типу сейсмічної хвилі кутами  $\Theta$  та  $i$ , а відношення малої ( $b$ ) до великої ( $a$ ) півосі – ступінь витягнутості еліпсоїда, тобто рівень прямолінійності поляризації коливань.

В [12] для виявлення сейсмічних сигналів пропонується використовувати апарат поляризаційної фільтрації для всіх можливих напрямків надходження сейсмічної хвилі:

$$P(\alpha, \gamma) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot G^{\alpha\gamma}, \quad (5)$$

де  $P(\alpha, \gamma)$  – проекція повного вектору зміщення ґрунту на напрямок  $G^{\alpha\gamma}$ ;  $N$  – розмір ділянки сейсмічного запису, для якого розраховується функція  $P(\alpha, \gamma)$ ;  $g_i$  – поточне значення зміщення ґрунту  $g_i = \{n_i, e_i, z_i\}$ ;  $G^{\alpha\gamma}$  – напрямок, для якого проводиться-

ся поляризаційна фільтрація  $G^{\alpha\gamma} = \{x, y, z\}$ , де координати  $x, y, z$  пов'язані з азимутом  $\alpha$  та кутом виходу  $\gamma$ :

$$\begin{cases} n = \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha); \\ e = \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha); \\ z = \sin(\gamma). \end{cases} \quad (6)$$

Для сейсмічних хвиль функція  $P(\alpha, \gamma)$  достатньо добре апроксимується еліпсоїдом, ступінь лінійності якого визначається як:

$$G = 1 - \frac{b}{a}, \quad (7)$$

де  $b$  та  $a$  – відповідно мала та велика півосі еліпсоїда, які в свою чергу відповідають мінімальному та максимальному значенням функції  $P(\alpha, \gamma)$ .

Рішення про наявність сигналу приймається при виконанні умови:

$$G(t) > G_n, \quad (8)$$

де  $G(t)$  – поточне значення коефіцієнта лінійності значення;  $G_n$  – порогове значення.

Поріг визначається за критерієм Неймана-Пірсона, згідно з яким мінімізується величина ймовірності пропуску сигналу  $\beta$  за умови, що ймовірність виявлення хибного сигналу  $\alpha$  не перевищує заданої величини  $\alpha_0$ , тобто  $\min \beta$  при  $\alpha = \alpha_0$ .

Використання поляризаційних властивостей складових сейсмічного сигналу може бути покладено в основу алгоритмічних підходів щодо виявлення сейсмічних сигналів та його окремих складових. Однак реалізовані на даний час методологічні підходи щодо поляризаційного аналізу засновані на апроксимації траєкторії руху часток ґрунту еліпсоїдом та оцінки його параметрів, які пов'язані з положенням осередку сейсмічної події, та потребують подальшого удосконалення.

## Висновки

В умовах територіальної обмеженості мережі сейсмічних спостережень ГЦСК зростає актуальність вирішення усього спектру завдань сейсмічного моніторингу окремими пунктами спостережень. При цьому зростає важливість визначення не тільки факту наявності сигналу, але й його параметрів, необхідних для подальшої ідентифікації та локалізації джерела сейсмічного збурення.

Аналіз методів виявлення сейсмічних сигналів, які використовуються для обробки у Міжнародному та Національному центрах даних, показав, що в якості основи підходу щодо обробки вимірювальних даних на окремому пункті спостереження раціонально застосовувати поляризаційний аналіз. Однак для оптимального використання методологічних засад визначення поляризаційних властивостей сей-

смічного сигналу необхідне їх подальше вдосконалення для використання в режимі реального часу.

### Список літератури

1. Мережа геофізичних спостережень ГЦСК як інформаційний сегмент системи моніторингу надзвичайних ситуацій / Р.А. Андрощук, О.І. Солонець, І.В. Толчонов, Ю.О. Гордієнко // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. пр. – К.: ЦНДІ НіУ, 2011. – Вип. 2(18). – С. 281-283.
2. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны / Е.Ф. Саваренский. – М.: Недра, 1972. – 293 с.
3. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О.К. Кедров. – М., Саранск: Красный Октябрь, 2005. – 420 с.
4. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И.В. Никифоров. – М.: Наука, 1983. – 198 с.
5. Никифоров И.В. Оперативная обработка данных автоматизированной сейсмической станции. Теория и практика / И.В. Никифоров, И.Н. Тихонов, Т.Г. Михайлова. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. – 175 с.
6. Esmersoy S. Three-component array processing / S. Esmersoy, V.F. Cormier, M.N. Toksuz // A Twenty-Five Year Review of Basic Research, Publisher, USA. – 1985. – P. 565-578.
7. Украинская сейсмическая группа. Модернизация аппаратно-программных средств / В.А. Дядюра,

И.Ю. Михайлик, А.В. Пененко и др. // Геофизический журнал. – 2000. – Т. 22, № 3. – С. 70-77.

8. Гордієнко Ю.О. Визначення осередку сейсмічної події за результатом спостереження трикомпонентної сейсмічної станції / Ю.О. Гордієнко // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2016. – Вип. 2(139). – С. 186-189.
9. Алказ В.Г. Поляризаційний аналіз сейсмічних колебаний / В.Г. Алказ, Н.І. Онофраш, А.І. Перельберг. – Кишинев: Штиница, 1977. – 110 с.
10. Александров С.И. Поляризаційний аналіз сейсмічних волн / С.И. Александров. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 142 с.
11. Гордієнко В.О. Виявлення сейсмічних сигналів та визначення кутових характеристик їх джерел за результатами поляризаційної фільтрації / В.О. Гордієнко, Ю.О. Гордієнко, В.А. Кирилюк // Вісник ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – № 1 (52). – С. 67-71.
12. Гордієнко В.О. Виявлення S-хвилі сейсмічного сигналу за поляризаційною ознакою / В.О. Гордієнко, Ю.О. Гордієнко, В.А. Кирилюк // Вісник ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – № 3 (54). – С. 36-41.

Надійшла до редколегії 5.01.2017

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

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ

Ю.А. Гордиенко, А.И. Солонец, А.В. Кошель, Д.В. Руденко

В работе проведен анализ методов обнаружения сейсмических сигналов по результатам регистрации трехкомпонентной сейсмической станцией в рамках решения заданных информационного обеспечения о сейсмической обстановке. Даны рекомендации по дальнейшим исследованиям с учетом особенностей сети сейсмических наблюдений Главного центра специального контроля.

**Ключевые слова:** сейсмический сигнал, обнаружение, трехкомпонентная сейсмическая станция.

### ANALYSIS OF SEISMIC SIGNALS DETECTION METHODS ON THE THREE-COMPONENT SEISMIC STATION SUPERVISIONS RESULTS

Yu. Gordienko, A. Solonets, A. Koshel, D. Rudenko

The analysis of seismic signals detection methods on the three-component seismic station registration results within the framework of the informative support about a seismic situation decision tasks is in-process conducted. Produce of recommendation on further researches taking into account the features of the Main center of the special control seismic supervisions network.

**Keywords:** seismic signal, detection, three-component seismic station.