

УДК 550.34

Ю.О. Гордієнко

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, Житомир

ВИЗНАЧЕННЯ ОСЕРЕДКУ СЕЙСМІЧНОЇ ПОДІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТОМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТРИКОМПОНЕНТНОЇ СЕЙСМІЧНОЇ СТАНЦІЇ

В роботі розглядається підхід щодо визначення місцеположення осередку сейсмічної події за результатами обробки вимірювальних даних окремої трикомпонентної станції. В основу запропонованого підходу покладено кінематичні (швидкісні) та динамічні (поляризаційні) властивості складових сейсмічного сигналу та методологічні засади щодо їх визначення за результатами використання апарату поляризаційного аналізу.

Ключові слова: сейсмічний моніторинг, трикомпонентна сейсмічна станція, осередок сейсмічної події, поляризаційний аналіз.

Вступ

Постановка проблеми. Останні землетруси з епіцентрами на території України, а також 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.

В Україні однією з установ, яка виконує завдання сейсмічного моніторингу, є Головний центр спеціального контролю (ГЦСК) Державного космічного агентства України (ДКАУ) [1]. Основним засобом мережі сейсмічних спостережень ГЦСК, який застосовується для моніторингу сейсмічності в ближній зоні ($\Delta \leq 1000$ км) є трикомпонентні сейсмічні станції (ТКСС). Процес обробки сейсмічних сигналів, зареєстрованих ТКСС, включає визначення:

- типів хвиль (P, S, L_q, L_R);
- параметрів складових сейсмічного сигналу (часу надходження, максимальної амплітуди та періоду);
- параметрів джерела сейсмічного сигналу (епіцентральної відстані (Δ), азимута на епіцентр (α), часу події в джерелі ($t_{дж}$), глибини гіпоцентру джерела (H), магнітуди сейсмічної події (m_p)).

Рішення про параметри сейсмічної події приймається за результатами аналізу результатів реєстрації всіх пунктів спостереження (ПС). Реалізовані на даний час у ГЦСК способи оброблення вимірювальних даних сейсмічного методу дозволяють надавати попередню інформацію через 15 хвилин, а остаточно через 40 хвилин від моменту події.

Обмеження часу надання інформації користувачам викликані насамперед можливістю існуючих підходів щодо обробки вимірювальних даних.

Одним з напрямків подолання вказаної проблеми є розроблення методологічних засад, які б дозволяли в автоматичному режимі приймати рі-

шення про факт сейсмічної події та оцінювати її параметри за результатами спостережень окремої трикомпонентної установки. Крім того, така необхідність зумовлена проблемою забезпечення функціональної стійкості мережі сейсмічних спостережень у випадках, коли не можливо використовувати сейсмічні дані кількох ПС (відмови апаратури, переривання зв'язку, проведення технічного обслуговування тощо) [2]. Таким чином, питання удосконалення методологічних засад автоматизованої обробки сейсмічних сигналів у ТКСС є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Головним завданням моніторингу сейсмічної обстановки окремою ТКСС є виявлення сейсмічного сигналу, визначення основних типів сейсмічних хвиль. Параметри сейсмічних хвиль дають можливість визначити місцеположення сейсмічної події, природу сейсмічного джерела, його магнітуду та можливі наслідки.

На даний час більшість реалізованих алгоритмів виявлення сейсмічних сигналів за результатами спостережень ТКСС використовують критерій перевищення порогу за амплітудою, який є достатньо ефективним при енергетичному відношенні сигнал/шум не менше 5. Однак використання даного підходу призводить до обмеження магнітудної чутливості сейсмічної станції. Крім того, даний спосіб не дозволяє точно визначити складові сейсмічного сигналу, оскільки вступ наступної сейсмічної хвилі відбувається на фоні хвостової частини попередньої.

Іншим напрямком щодо реалізації процедури виявлення сейсмічного сигналу є використання апарату поляризаційного аналізу (АПА). Використанню АПА для оброблення вимірювальних даних присвячено низку робіт [3 – 6]. Більшість з них стосується аналізу поляризації сейсмічних сигналів та питань виявлення сигналів за поляризаційною ознакою. Однак реалізовані на даний час методологічні підходи щодо поляризаційного аналізу ґрунтуються на апроксимації траєкторії руху ґрунту еліпсоїдом та оцінці його параметрів, які пов'язані з положенням

осередку сейсмічної події (ОСП) відносно ПС, та вимагають значних обчислювальних затрат [3, 4]. В роботі [7] для виявлення сейсмічних сигналів пропонується використовувати апарат поляризаційної фільтрації (ПФ) для всіх можливих напрямків надходження сейсмічної хвилі:

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

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

$$\begin{cases} n = \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha); \\ e = \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha); \\ z = \sin(\gamma). \end{cases} \quad (2)$$

Для сейсмічних хвиль функція $P(\alpha, \gamma)$ достатньо добре апроксимується еліпсоїдом, ступінь лінійності якого визначається як [4]:

$$G = 1 - \frac{b}{a}, \quad (3)$$

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

При цьому максимум $P(\alpha, \gamma)$ для першої фази сейсмічного сигналу (Р-хвилі) відповідає кутовому положенню ОСП відносно ПС [5].

У роботі [7] запропоновано підхід щодо виявлення S-хвилі в автоматичному режимі за результатами поляризаційного аналізу сейсмічного сигналу на підставі особливостей коливання ґрунту для Р та S хвиль та їх зв'язку з кутовим положенням ОСП та ПС. Виявлення S-хвилі здійснюється шляхом пошуку ділянки сейсмічного сигналу, на якій рух частинок середовища можна вважати лінійним, а напрямком руху є ортогональним відносно ділянки, що відповідає першій фазі Р-хвилі. Для формалізації такого критерію введено додаткову функцію $Q(n)$, максимум якої відповідає ділянці сигналу, а напрямком руху частинок середовища є ортогональним відносно ділянки, що відповідає першій фазі Р-хвилі:

$$Q(n) = 1 - \left| \frac{2 \cdot \Theta(n)}{\pi} - 1 \right|, \quad (4)$$

де $\Theta(n)$ – значення кута між вектором, що характеризує напрямком руху частинок середовища та визначається аргументами функції $P(\alpha, \gamma)$, розрахованої для Р-хвилі ($\arg(P_s(\alpha, \gamma))$), та вектором, що характеризує напрямком руху частинок середовища для поточної ділянки запису; n – номер ділянки запису.

Врахування поляризації та швидкості розповсюдження сейсмічних хвиль може бути покладене в основу методології визначення місцеположення осередку сейсмічного джерела за результатами обробки вимірювальних даних окремої ТКСС.

Формулювання мети статті. Метою статті є розробка методологічних підходів до визначення місцеположення осередку сейсмічного джерела за результатами обробки вимірювальних даних ТКСС на основі аналізу поляризації основних складових сейсмічного сигналу (Р- та S-хвиль).

Виклад основного матеріалу дослідження

В основу підходу до визначення місцеположення осередку сейсмічного джерела за результатами обробки вимірювальних даних ТКСС покладено динамічні (поляризація коливань) та кінематичні (швидкість розповсюдження) особливості об'ємних хвиль Р та S, основними положеннями якого є:

– для сейсмічних хвиль характерна лінійна поляризація коливань, на відміну від фону, який має низький рівень лінійності поляризації [6];

– аргументи функції $P(\alpha, \gamma)$ для першої фази сейсмічного сигналу (Р-хвилі) відповідають кутовому положенню осередку сейсмічної події відносно ПС [5, 7];

– аргументи функції $P(\alpha, \gamma)$ для S-хвилі складають вектор, ортогональний вектору аргументів функції $P(\alpha, \gamma)$ для Р-хвилі [7];

– різниця часу між вступами складових сейсмічного сигналу Р- та S-хвиль залежить від відстані Δ між ПС та ОСП та визначається за годографом [4].

Завдання визначення ОСП за результатами обробки вимірювальних даних ТКСС складається з трьох етапів:

1) виявлення першої фази сейсмічного сигналу (Р-хвилі);

2) пошук складової сейсмічного сигналу, яка відповідає хвилі S;

3) визначення осередку сейсмічної події (λ, φ).

Розглянемо кожний етап окремо.

Перший етап. Виявлення вступу сейсмічного сигналу здійснюється за поляризаційною ознакою з використанням виразів (1 – 3). Рішення про наявність сигналу приймається при виконанні умови:

$$G(t) > G_h, \quad (5)$$

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

Поріг визначається за критерієм Неймана-Пірсона, згідно з яким мінімізується величина ймовірності пропуску сигналу β за умови, що ймовірність виявлення хибного сигналу α не перевищує заданої величини α_0 , тобто $\min \beta$ при $\alpha = \alpha_0$ [8]. На рис. 1 наведено графік щільності розподілу випадкової величини G для фону та сигналів.

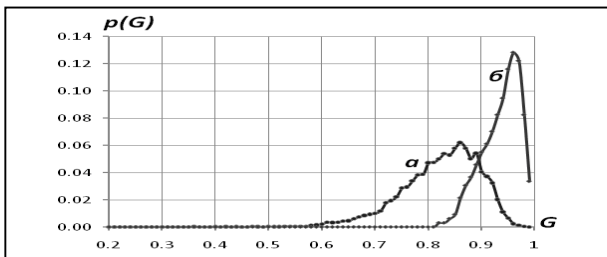


Рис. 1. Щільність розподілу випадкової величини G для фону (а) та сигналів (б)

За умови, що ймовірність виявлення хибного сигналу α не перевищує заданої величини $\alpha_0=0.05$, значення порога виявлення визначається як:

$$\alpha = \int_{G_h}^{\infty} p_{\Phi}(G)dG = 0.05. \quad (6)$$

За результатами обробки наявних статистичних даних поріг виявлення сейсмічного сигналу за поляризаційною ознакою становить $G_h=0.92$, при цьому ймовірність правильного виявлення – $D=0.76$.

На рис. 2 наведено сигналограму від землетрусу поблизу м. Кривий Ріг (Дніпропетровська обл.), який відбувся 13.06.2010 р., та результати розрахунку G. Горизонтальною лінією позначено рівень порога – $G_h = 0.92$.

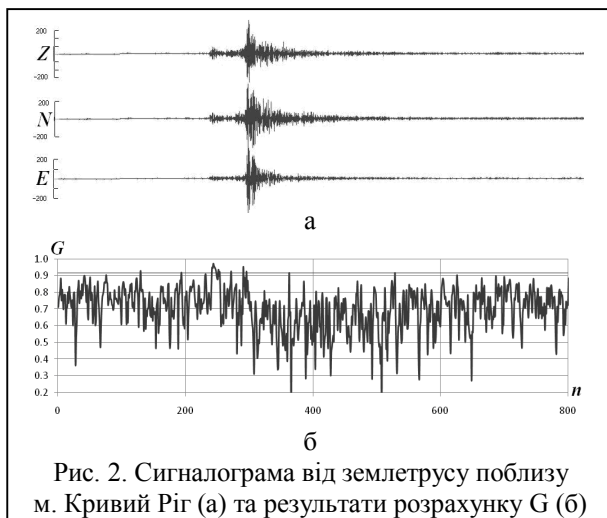


Рис. 2. Сигналограма від землетрусу поблизу м. Кривий Ріг (а) та результати розрахунку G (б)

Розрахунок значення коефіцієнта лінійності здійснювали для ділянки сейсмічного запису тривалістю $n = 120$ відліків, що відповідає 3 с при частоті дискретизації $f_d = 40$ Гц, із зсувом на 40 відліків (1 с). Як слідує з наведеного, запропонований спосіб дозволяє виявляти сейсмічні сигнали за поляризаційною ознакою. Максимум функції $P(\alpha, \gamma)$ для Р-хвилі припадає для азимута $\alpha = 132^\circ$ та куту виходу $\gamma = 26^\circ$.

Другий етап. Визначення складової сейсмічного сигналу, яка відповідає хвилі S, здійснюють шляхом розрахунку функції на ділянці запису від першої фази Р-хвилі n_p до максимального інтервалу між Р- та S- хвилями N, знаходження його максимуму та порівняння з порогом Ψ_h :

$$\Psi(n) = Q(n) \cdot G(n); \quad (7)$$

$$\max_{n_p \leq n \leq T/\tau} \Psi(n) > \Psi_h, \quad (8)$$

де T – максимальний час між надходженням Р- та S-хвиль сейсмічних сигналів від джерел з осередками у ближній зоні ($T = 120$ с); τ – інтервал ковзання вікна, для якого розраховується значення функції ($\tau = 1$ с).

На рис. 3 наведено результати розрахунку функції $\Psi(n)$ для сейсмічного сигналу від землетрусу поблизу м. Кривий Ріг. Максимум функції $\Psi(n)$ для розглянутого сигналу припадає на 46-у секунду відносно першої фази Р-хвилі.

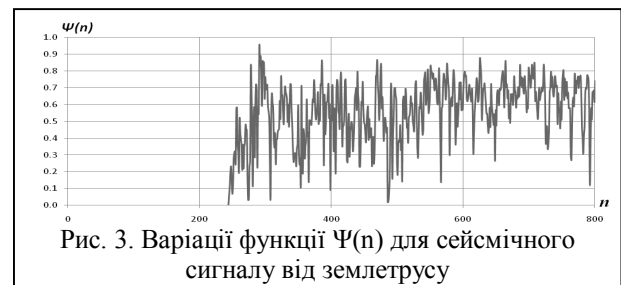


Рис. 3. Варіації функції $\Psi(n)$ для сейсмічного сигналу від землетрусу

На рис. 4 наведено щільність розподілу випадкової величини $\Psi(n)$. Значення порога за критерієм Неймана-Пірсона (6) становить $G_h = 0.87$, при цьому ймовірність правильного виявлення – $D = 0.80$.

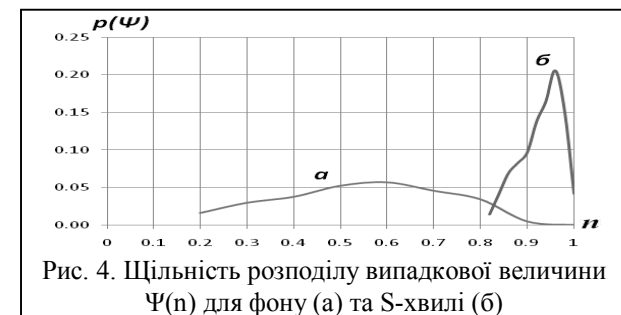


Рис. 4. Щільність розподілу випадкової величини $\Psi(n)$ для фону (а) та S-хвилі (б)

Третій етап. Визначення осередку сейсмічної події за результатами спостережень ТКСС здійснюють з використанням прямої геодезичної задачі, суть якої полягає у знаходженні координат об'єкта (λ, ϕ) на підставі відомостей про координати пункту спостереження ($\lambda_{ПС}, \phi_{ПС}$), азимуту на об'єкти відносно пункту спостереження та відстані між ПС й об'єктом [4].

Для сейсмічного сигналу від землетрусу поблизу м. Кривий Ріг (рис. 4) за результатами обробки запропонованим способом було отримано такі дані:

- максимум функції $P(\alpha, \gamma)$ для Р-хвилі припадає на 243-тю секунду від початку запису, для азимута $\alpha = 132^\circ$ та куту виходу $\gamma = 26^\circ$;

- максимум функції $\Psi(n)$ для розглянутого сигналу припадає на 46-ту секунду відносно вступу Р-хвилі;

- відстань між ОСП та ПС визначається за дографом сейсмічних хвиль для ближньої зони (рис. 5) та становить $\Delta (46 \text{ с}) = 422 \text{ км}$.



Рис. 5. Годограф сейсмічних хвиль

Координати ОСП, які визначались за отриманими даними з використанням прямої геодезичної задачі, становлять $\lambda = 48.08$, $\varphi = 33.44$.

На рис. 6 приведено результати розрахунку місцеположення ОСП при застосуванні запропонованого підходу до однієї ТКСС та отримані традиційним способом для МСС ГЦСК ДКАУ. Розбіжність визначення місцеположення ОСП при використанні запропонованого способу та за результатами обробки даних МСС становить $\Delta = 27.3$ км.

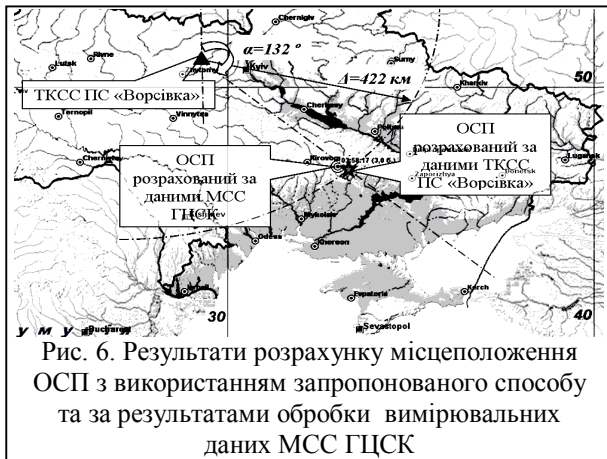


Рис. 6. Результати розрахунку місцеположення ОСП з використанням запропонованого способу та за результатами обробки вимірювальних даних МСС ГЦСК

Похибка визначення місцеположення ОСП з використанням запропонованого способу обумовлена помилкою визначення кутових характеристик складових сейсмічного сигналу, тривалістю ділянки запису, для якого розраховуються функції $P(\alpha, \gamma)$ та $\Psi(n)$. Її значення може бути зменшене при здійсненні сумісної обробки координатної інформації, отриманої від різних ТКСС.

Висновки

У роботі запропоновано підхід до обробки вимірювальних даних окремої ТКСС з використанням апарату поляризаційного аналізу, який дозволяє виявляти вступ сейсмічного сигналу, проводити ідентифікацію його основних складових та оцінювати місцеположення осередку сейсмічної події. При проведенні подальших досліджень необхідно:

- 1) розробити методіку сумісної обробки координатної інформації, отриманої від різних ТКСС;
- 2) оцінити функціональну стійкість мережі сейсмічних спостережень в умовах відмов окремих ТКСС.

Список літератури

1. Ващенко В.М. Постановка проблеми виявлення факторів небезпеки надзвичайних ситуацій сейсмічними засобами / В.М. Ващенко, І.В. Толчонов, Ю.О. Гордієнко, О.І. Солонець // Системи обробки інформації: Збірник наукових праць. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 2 (100). – С. 280-284.
2. Машков О.А. Научные проблемы создания автоматизированной системы обработки сейсмических данных (алгоритмические аспекты) / О.А. Машков, В.А. Кирилюк // Специальная техника и вооружение. – 2002. – № 1, 2. – С. 35-41.
3. Александров С.И. Поляризационный анализ сейсмических волн / С.И. Александров. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 142 с.
4. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О.К. Кедров. – М.: КрО, 2005. – 420 с.
5. 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.
6. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны / Е.Ф. Саваренский. – М.: Недра, 1972. – 293 с.
7. 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.
8. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 716 с.

Надійшла до редколегії 16.12.2015

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Ю.А. Гордиенко

В работе рассматривается подход к определению местоположения источника сейсмического события по результатам обработки измерительных данных отдельной трехкомпонентной станции. В основу предложенного подхода положены кинематические (скоростные) и динамические (поляризационные) особенности составляющих сейсмического сигнала и методологические основы к их определению по результатам использования поляризационного анализа.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, трехкомпонентная сейсмическая станция, источник сейсмического события, поляризационный анализ.

DETERMINATION OF SOURCE SEISMIC EVENT ON RESULTS SUPERVISIONS THREE COMPONENT SEISMIC STATIONS

Yu.A. Gordienko

In work considered method of finding position seismic source on results processing of data of three component seismic stations. In basis method is the use of kinematics (speed) and dynamic (polarization) features of constituents seismic signal and methodological bases to their determination on results the use of polarization analysis.

Keywords: seismic monitoring, three component seismic stations, source seismic event, polarization analysis.