

УДК 550.34

Ю.О. Гордієнко¹, О.І. Солонець², Ю.А. Андрущенко¹

¹Головний Центр спеціального контролю НКАУ, Макарів-1

²Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

АВТОМАТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄМНИХ ХВИЛЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ КУТОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМІЧНОГО СИГНАЛУ ВІД ДЖЕРЕЛ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ

В роботі розглядаються особливості куткових характеристик складових сейсмічного сигналу від джерел у ближній зоні. Запропоновано підходи щодо ідентифікації в автоматичному режимі сейсмічного сигналу з ближньої зони за результатами аналізу куткових характеристик

сейсмічний сигнал, кутові характеристики, ідентифікація

Вступ

Постановка проблеми. Одним з основних етапів обробки сейсмічного сигналу, виявленого за ре-

зультатами спостережень трикомпонентної сейсмічної станції (ТКСС), є ідентифікація основних типів сейсмічних хвиль. За результатами ідентифікації типів

сейсмічних хвиль можливо отримати наступну інформацію про параметри сейсмічного джерела [1, 2]:

- азимут на осередок сейсмічної події – як відношення складових першого вступу сейсмічного сигналу на горизонтальних каналах;
- відстань до осередку сейсмічної події – як різниця часу вступу об'ємних сейсмічних хвиль;
- природа сейсмічного джерела – природного (землетрус) або техногенного (вибух) походження – шляхом порівняння енергетичних характеристик повздовжніх та поперечних сейсмічних хвиль;
- інтенсивність сейсмічної події – оцінюється на основі даних про амплітуду та період коливання ґрунту для кожного з основних типів сейсмічних хвиль, а також відстані до осередку сейсмічної події.

Задача виявлення та ідентифікації основних типів сейсмічних хвиль для сейсмічної події у ближній зоні (БЗ) є дуже складною, оскільки вступ наступного типу хвилі сейсмічного сигналу відбувається на фоні хвостової частини попередньої хвилі.

На даний час ідентифікація типів сейсмічних хвиль в установах Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) Національного космічного агентства України (НКАУ) здійснюється вручну оператором за результатами аналізу всього сейсмічного сигналу. Точність та оперативність визначення складових сейсмічного сигналу та їх параметрів залежить від рівня підготовки оператора, а підходи щодо визначення типів хвиль при ручній обробці не передбачають автоматизацію.

Таким чином, задача розробки методологічних підходів до виявлення та ідентифікації основних типів сейсмічних хвиль в автоматичному режимі з метою підвищення оперативності прийняття рішення про сейсмічну подію та своєчасного оповіщення відповідних органів та служб, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час, для ТКСС відомі алгоритми автоматичної ідентифікації складових сейсмічного сигналу, які засновані на частотних особливостях основних типів сейсмічних хвиль [2 – 7]. Однак для їх реалізації необхідна наявність сейсмоприймачів з широким частотним діапазоном. Для існуючої на даний час мережі сейсмічних спостережень ГЦСК НКАУ сейсмоприймачі такого типу складають менше 25 % від загальної кількості. Відомі підходи виявлення об'ємних сейсмічних хвиль розроблені також лише для сейсмічних джерел з дальньої зони [2 – 8].

Формулювання мети статті. Таким чином, виходячи з особливостей мережі сейсмічних спостережень ГЦСК НКАУ, метою статті є розробка методологічних підходів щодо ідентифікації основних типів сейсмічних хвиль від джерела у ближній зоні на основі додаткових інформаційних критеріїв. В якості таких критеріїв пропонується використовувати кутові характеристики складових сейсмічного сигналу.

Виклад основного матеріалу дослідження

На даний час кутові характеристики сейсмічної хвилі (азимут приходу сейсмічної хвилі α та кут виходу хвилі на денну поверхню γ), за оцінками яких проводиться розрахунок місцеположення осередку сейсмічної події (ОСП), розраховуються в основному для першого вступу (Р-хвилі) [2-6].

Для розрахунку значень азимута та кута виходу сейсмічної хвилі за результатами спостережень ТКСС використовують значення рівнів сигналів Р-хвилі в каналах, орієнтованих північ-південь A_x , схід-захід A_y а також вертикальному A_z . Розрахунок здійснюється за виразами:

$$\alpha = \arctg \frac{A_x}{A_y}, \quad \gamma = \arctg \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}. \quad (1)$$

Однак використання даного підходу можливе лише для поверхневих або приповерхневих (глибиною $H < 15$ км) сейсмічних джерел. Для джерел зі значною глибиною, таких як наприклад землетруси у зоні Вранча з глибинами осередків $H = 80 \div 170$ км, використання даного підходу при обробці вимірювальної інформації в автоматичному режимі може призвести до помилкового визначення місцеположення ОСП (ОСП'). Це обумовлено тим, що інформація про азимут та кут виходу сейсмічного сигналу на денну поверхню, яка отримується за результатами обробки першого вступу сейсмічного сигналу на пункті спостережень (ПС), визначає параметри траси розповсюдження сейсмічного сигналу, але не визначає положення осередку сейсмічної події на ній (рис.1).

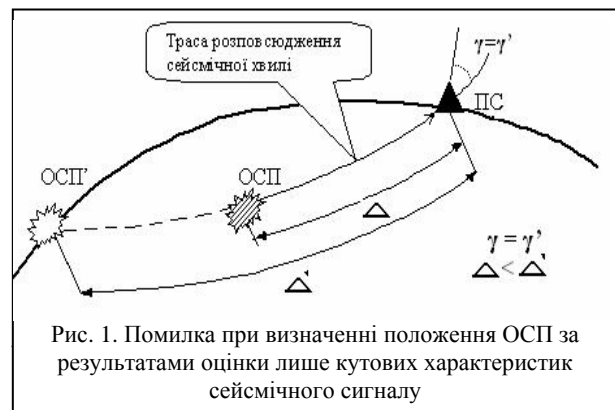


Рис. 1. Помилка при визначенні положення ОСП за результатами оцінки лише кутових характеристик сейсмічного сигналу

На рис. 2 наведено приклади записів сейсмічних сигналів з однаковими кутовими характеристиками для різних ОСП ($\alpha = \alpha'$, $\gamma = \gamma'$), при цьому відстані між ПС та епіцентрами подій були різними ($\Delta < \Delta'$), що відповідало різниці між часом вступу об'ємних хвиль $t < t'$.

Для підвищення точності визначення місцеположення осередку сейсмічної події за результатами

спостережень ТКСС необхідно використовувати додатково інформацію про відстань між ПС та епіцентром події Δ . Таку інформацію можна отримати шляхом виявлення та ідентифікації основних складових сейсмічного сигналу з подальшим використанням різницевого годографу розповсюдження сейсмічних хвиль[2].

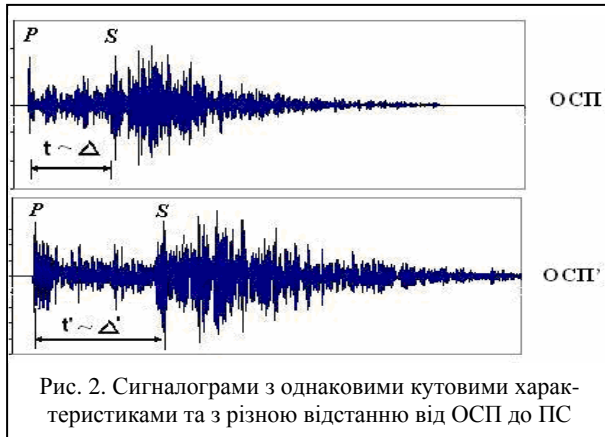


Рис. 2. Сигналограми з однаковими кутовими характеристиками та з різною відстанню від ОСП до ПС

Але, в свою чергу, для точного визначення відстані від ПС до ОСП за допомогою різницевого годографу необхідне чітке визначення типів сейсмічних хвиль та оцінки часу їх вступу.

Незначна різниця в часі пробігу сейсмічної хвилі від ОСП до ПС, як наслідок незначних відстаней, призводить до того, що кожна наступна фаза сейсмічного сигналу прописується на хвостову частину попередньої, що ускладнює ідентифікацію складових сейсмічного сигналу в автоматичному режимі.

Кутові характеристики сейсмічних хвиль для ОСП з БЗ з урахуванням особливості зміщення частот ґрунту для кожного з основних типів хвиль будуть пов'язані з положенням сейсмічного джерела відносно пункту сейсмічних спостережень наступним чином [2, 4]:

- P-хвиля – оскільки коливання частот ґрунту відбувається вздовж напрямку розповсюдження сейсмічної хвилі, азимут її приходу співпадає з азимутом на ОСП;

- S-хвиля – так як коливання ґрунту при проходженні цієї фази відбуваються перпендикулярно напрямку розповсюдження сейсмічної хвилі, тому розрахований азимут приходу хвилі відрізнятиметься від дійсного на 90° ;

- L γ -хвиля – поверхнева хвиля з еліптичною поляризацією, що орієнтована перпендикулярно напрямку розповсюдження, тому розрахований азимут також буде відрізнятися від дійсного на 90° ;

- L q -хвиля – поверхнева хвиля з еліптичною поляризацією в напрямку розповсюдження, тому розрахований азимут співпадатиме з дійсним азимутом на сейсмічне джерело.

Таким чином, ідентифікація складових сейсмічного сигналу може бути реалізована при врахуванні особливостей їх кутових характеристик, як пошук ділянок запису сейсмічного сигналу для яких виконуються умови $(\alpha_P \wedge \gamma_P) \vee (\alpha_P + 90^\circ \wedge \gamma_P)$, де α_P та γ_P - кутіві характеристики P-хвилі.

При цьому, для сейсмічних подій з осередками у БЗ доцільно обмежитись ідентифікацією лише об'ємних хвиль, враховуючи невизначеність хвильової картини групи поверхневих хвиль.

На рис. 3, а наведено вертикальну складову сейсмічного запису від землетрусу з території Румунії з осередком в зоні Вранча (17.01.2007 року, магнітуда $M=5.2$), зареєстрованого сейсмічною станцією „Малин”, та результати розрахунків розподілу азимуту секундного інтервалу для ділянок запису, які відповідають P- та S-хвилям.

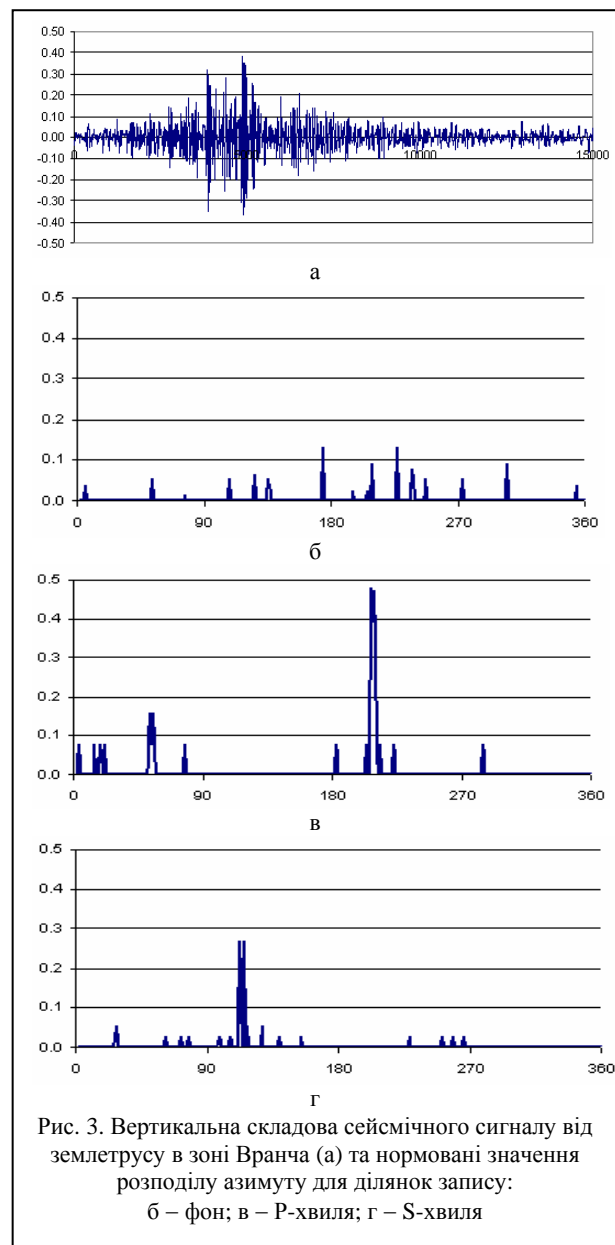


Рис. 3. Вертикальна складова сейсмічного сигналу від землетрусу в зоні Вранча (а) та нормовані значення розподілу азимуту для ділянок запису: б – фон; в – P-хвиля; г – S-хвиля

Аналіз наведених записів свідчить, що для фону розподіл азимуту не має чітко вираженого максимуму (декілька максимумів). Для об'ємних хвиль спостерігається чітко виражені максимуми, до того ж різниця між максимумами складає $\sim 90^\circ$.

Аналіз залежності проекції повного вектору зміщення від очікуваного азимуту приходу сейсмічної хвилі, наведений на рис. 4, показує, що різниця між максимумами для Р-хвилі та для S-хвилі складає 92° . Похибка різниці між розрахованими азимутами обумовлена тим, що S-хвиля вступає у хвостовий частині фази Р. Подібні відмінності в азимутах приходу Р- та S-хвиль спостерігались і для інших сейсмічних джерел з БЗ як природного так і техногенного походження.

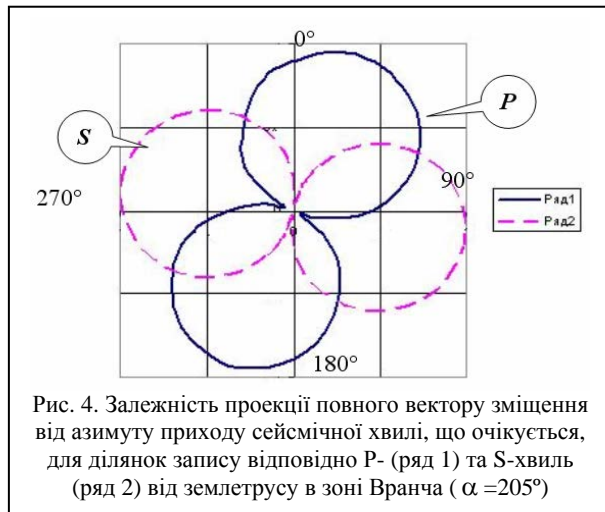


Рис. 4. Залежність проекції повного вектору зміщення від азимуту приходу сейсмічної хвилі, що очікується, для ділянок запису відповідно Р- (ряд 1) та S-хвиль (ряд 2) від землетрусу в зоні Вранча ($\alpha = 205^\circ$)

Особливість ортогональності розрахованих азимутів для об'ємних хвиль може бути покладено в основу алгоритму автоматичної ідентифікації сейсмічних сигналів та визначення параметрів ОСП, який буде включати наступні етапи:

- 1) виявлення сигналу;
- 2) оцінка кутових характеристик першого вступу (Р-хвилі) – α_P та γ_P ;
- 3) пошук ділянок запису сейсмічного сигналу з кутовими характеристиками, які відповідають S-хвилі – $\alpha_P + 90^\circ$ та γ_P ;
- 4) оцінка відстані до сейсмічного джерела за допомогою годографа;
- 5) оцінка координат сейсмічного джерела;
- 6) оцінка параметрів сейсмічного джерела – час, магнітуда та тип сейсмічної події.

На рис. 5 наведено результати ідентифікації об'ємних хвиль за результатами аналізу кутових характеристик для сигналу від землетрусу в районі гір Вранча, який відбувся 27.09.2004 року з магнітудою $M=5.2$, глибина осередку складала 145 км.

Для першого вступу (Р-хвилі) проводилась оцінка кутових характеристик α_P та γ_P . За їх результатами проводився пошук ділянок запису, для яких кутові характеристики відповідають умовам:

$$f(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha = \alpha_P; \\ 0, & \alpha \neq \alpha_P. \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha = \alpha_P + 90^\circ; \\ 0, & \alpha \neq \alpha_P + 90^\circ. \end{cases} \quad (4)$$

$$q(\gamma) = \begin{cases} 1, & \gamma = \gamma_P; \\ 0, & \gamma \neq \gamma_P. \end{cases} \quad (5)$$

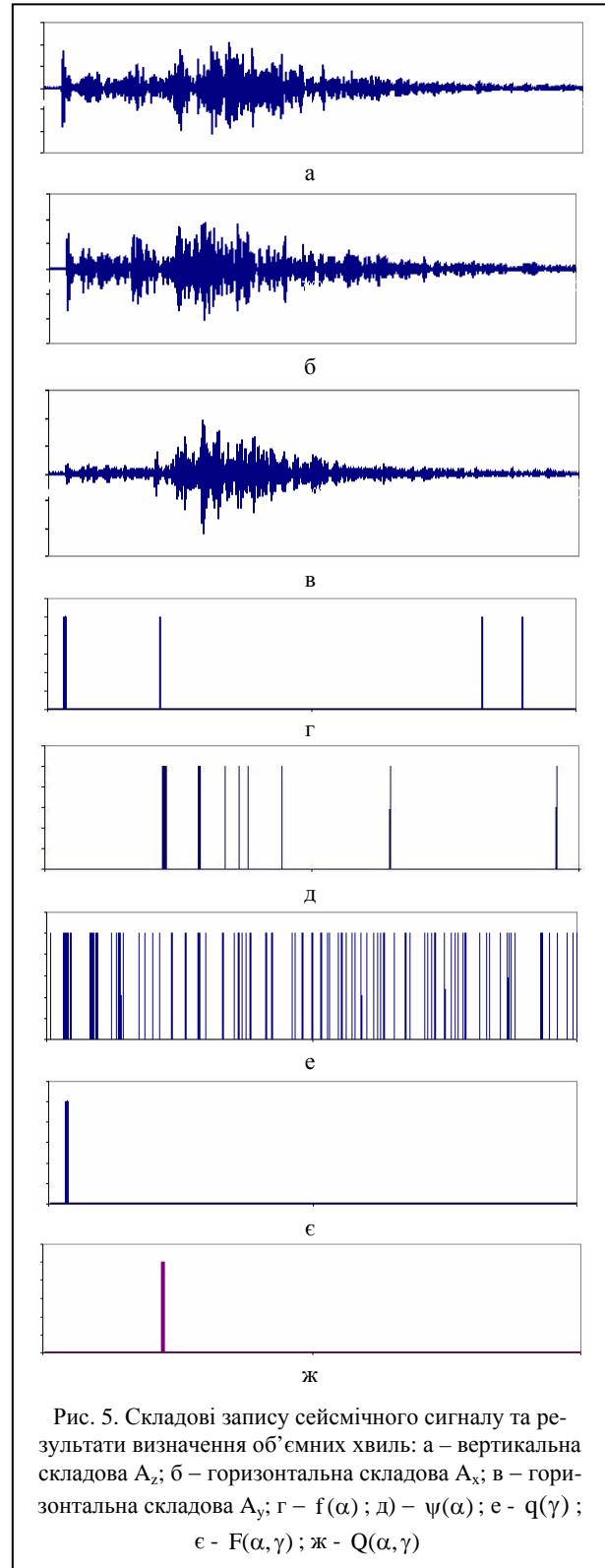


Рис. 5. Складові запису сейсмічного сигналу та результати визначення об'ємних хвиль: а – вертикальна складова A_z ; б – горизонтальна складова A_x ; в – горизонтальна складова A_y ; г – $f(\alpha)$; д – $\psi(\alpha)$; е – $q(\gamma)$; є – $F(\alpha, \gamma)$; ж – $Q(\alpha, \gamma)$

Азимут та кут виходу оцінюється за формулами (1 – 2). Рішення про відповідні фази сейсмічного сигналу приймається як:

$$F(\alpha, \gamma) = f(\alpha)q(\gamma); \quad (6)$$

$$Q(\alpha, \gamma) = \psi(\alpha)q(\gamma). \quad (7)$$

Як видно з рис. 5, на підставі оцінки кутових характеристик першого вступу (Р-хвилі) було визначено фазу сигналу, яка відповідає S-хвилі. Різниця часу між розрахованими за даним алгоритмом вступами Р- та S-хвилі складає 56 секунд, що співпадає з результатами, отриманими за допомогою годографа.

Висновки

Аналіз кутових характеристик основних складових сейсмічного сигналу, їх особливостей, дозволяє проводити ідентифікацію об'ємних хвиль в автоматичному режимі. Реалізація запропонованих підходів навіть з використанням існуючої на даний час мережі сейсмічних спостережень ГЦСК дозволяє суттєво підвищити оперативність обробки сейсмічного запису та відповідного визначення параметрів ОСП.

Список літератури

1. Антикаев Ф.Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах. – М.: Наука, 1969. – 104 с.
2. Кедров О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. – М.; Саранск: Тип. „Красный Октябрь”, 2005. – 420 с.
3. Буллен К.Е. Введение в теоретическую сейсмологию. – М.: Мир, 1966. – 460 с.
4. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. – М.: Недра, 1972. – 293 с.
5. Алказ В.Г., Онофраш Н.И., Перельберг А.И. Поляризационный анализ сейсмических колебаний. – Кишинев: Штиница, 1977. – 110 с.
6. Александров С.И. Поляризационный анализ сейсмических волн. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 142 с.
7. Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. – М.: Недра, 1977. – 279 с.
8. Кедров О.К., Башилов И.П. О поляризационном способе выделения объемных волн от удаленного сейсмического источника // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1975. – № 8. – С. 90-99.

Надійшла до редколегії 2.10.2007

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