

УДК 550.344.03.42

**В.О. Гордієнко, нач. автослужби**  
Національний університет оборони України

**Ю.О. Гордієнко, к.т.н.**  
Головний центр спеціального контролю  
Національного космічного агентства України

**В.А. Кирилюк, к.т.н., с.н.с., доц.**  
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова  
Національного авіаційного університету

### ВИЯВЛЕННЯ S-ХВИЛІ СЕЙСМІЧНОГО СИГНАЛУ ЗА ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЮ ОЗНАКОЮ

*В роботі розглядається можливість автоматичної ідентифікації S-хвилі сейсмічного сигналу, зареєстрованого трикомпонентною сейсмічною станцією, за поляризаційною ознакою. Наведено результати тестування запропонованого підходу для сейсмічних сигналів від сейсмічних джерел з осередками у ближній зоні.*

**Вступ. Постановка проблеми.** Однією зі складових процесу обробки сейсмічних сигналів, виявлених трикомпонентною сейсмічною станцією (ТКСС), є ідентифікація основних типів сейсмічних хвиль. Визначення типів хвиль дає можливість отримати інформацію про місцезонаження осередку сейсмічної події, оцінити енергетичні характеристики сейсмічного явища та його наслідки, а також провести ідентифікацію природи сейсмічного джерела.

На даний час ідентифікація типів сейсмічних хвиль на пунктах спостереження (ПС) Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) Національного космічного агентства України (НКАУ) здійснюється в процесі ручної обробки сигналів оператором. При цьому автоматизація підходів до визначення типів хвиль при ручній обробці ускладнена.

Модернізація мережі сейсмічних спостережень ГЦСК, перехід на цифрову реєстрацію вимірювальних даних сейсмічного методу дозволяє реалізувати якісно новий рівень сейсмічного моніторингу. Однак ці можливості обмежені відсутністю методологічних засад. Тому питання розробки методологічних підходів виявлення та ідентифікації основних типів сейсмічних хвиль в автоматичному режимі є актуальним, оскільки це надасть можливість підвищення оперативності прийняття рішення про сейсмічну подію та своєчасного оповіщення відповідних органів та служб.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час для ТКСС широко використовуються алгоритми автоматичної ідентифікації складових сейсмічного сигналу, які засновані на частотних особливостях основних типів сейсмічних хвиль [1–3]. Однак для їх реалізації необхідна наявність сейсмоприймачів з широким частотним діапазоном. Для мережі сейсмічних спостережень ГЦСК НКАУ сейсмоприймачі такого типу складають менше 25 % від загальної кількості. Таким чином, необхідно розробити методологічні підходи ідентифікації основних типів сейсмічних хвиль від події у ближній зоні на основі додаткових інформаційних критеріїв. Як такі критерії пропонується використовувати поляризаційні особливості сейсмічних хвиль.

Нині поляризаційний аналіз сигналів використовується лише для виявлення сейсмічних сигналів [4]. Відомо, що записи сейсмічних хвиль  $P$  та  $S$  від вибухів та землетрусів характеризуються лінійною поляризацією коливань, у той час коли шумові коливання ґрунту мають хаотичний характер з низьким рівнем лінійності поляризації [5].

На даний час реалізовані методологічні підходи до поляризаційного аналізу засновані на апроксимації траєкторії руху ґрунту еліпсоїдом та оцінки його параметрів, що пов'язані з положенням осередку сейсмічної події [6]. Використання існуючих підходів передбачає наявність апріорної інформації про кутові характеристики сейсмічної події відносно ПС – азимут  $\alpha$  та кут виходу сейсмічного сигналу на денну поверхню  $\gamma$ .

Іншим підходом є використання апарата поляризаційної фільтрації (ПФ) [4], суть якої полягає у перерахунку похідних записів компонент сейсмічного запису ТКСС у повний вектор зміщення та його проєкцію на певний напрямок. Реалізація даного підходу не виключає впливу сигналів від сейсмічних подій з інших напрямків, що призводить до помилкового визначення належності сигналу з підконтрольного напрямку. Крім того, використання апарата ПФ також потребує наявності попередньої інформації про кутові характеристики осередку сейсмічної події відносно ПС.

В умовах відсутності апріорної інформації про кутові характеристики осередку сейсмічної події відносно ПС в роботі [7] пропонується перейти від аналізу вимірювальних даних з певного напрямку до аналізу вимірювальних даних з усіх можливих напрямків, тобто для  $\alpha = 1-360^\circ$  та  $\gamma = 0-90^\circ$ :

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

де  $P(\alpha, \gamma)$  – проекція повного вектора зміщення ґрунту на напрямок  $G^{\alpha\gamma}$  ;  
 $N$  – розмір ділянки сейсмічного запису, для якого розраховується функція  $P(\alpha, \gamma)$ ;  
 $g_i$  – поточне нормоване значення зміщення ґрунту  $g_i = \{n_i, e_i, z_i\}$ ;  
 $G^{\alpha\gamma}$  – напрямок, який задається вектором  $G^{\alpha\gamma} = \{x, y, z\}$ .

Координати  $x, y, z$  вектора  $G^{\alpha\gamma}$  пов'язані з азимутом  $\alpha$  та кутом виходу  $\gamma$  як:

$$x = \cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha), \quad y = \cos(\gamma) \cdot \sin(\alpha), \quad z = \sin(\gamma). \tag{2}$$

Для сейсмічних хвиль функція  $P(\alpha, \gamma)$  достатньо добре апроксимується еліпсоїдом, ступінь лінійності якого пов'язаний з типом хвилі та визначається як [6]:

$$G = 1 - \frac{b}{a}, \tag{3}$$

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

$$G = 1 - \frac{\min P(\alpha, \gamma)}{\max P(\alpha, \gamma)}. \tag{4}$$

При цьому максимум  $P(\alpha, \gamma)$  для першої фази сейсмічного сигналу ( $P$ -хвилі) відповідає кутовому положенню осередку сейсмічної події відносно ПС [7]. Даний підхід дозволяє виявляти сейсмічні сигнали з незначним відношенням сигнал/шум.

Однак використання даного підходу для аналізу сигнальної складової дозволяє виділити ряд ділянок запису з лінійною поляризацією. На рисунку 1 наведено результати розрахунку обвідної сейсмічного сигналу від промислового вибуху в Хмельницькій області (с. Пудлівці, Кам'янець-Подільський район), зареєстрованого ТКСС ПС "Ворсовка", яка визначається за виразом:

$$\Omega = \sum_{i=1}^N \sqrt{z_i^2 + n_i^2 + e_i^2}, \tag{5}$$

де  $z_i, n_i, e_i$  – поточні значення складових зміщення ґрунту за вертикальним напрямком та напрямками "Південь-Північ", "Схід-Захід";

$N$  – розмір вибірки ( $N = 40$ , що відповідає тривалості запису 1 с при частоті дискретизації  $f_\delta = 40$  Гц).

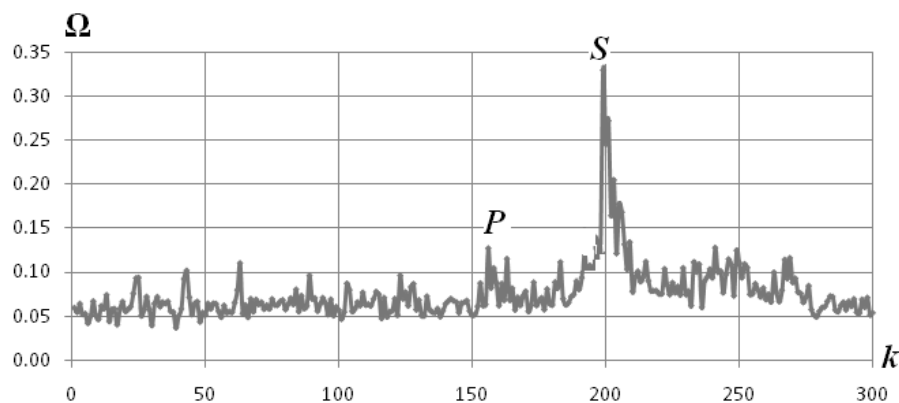


Рис. 1. Обвідна сейсмічного сигналу від кар'єрного вибуху

На рисунку 2 наведено значення коефіцієнта лінійності  $G$ , розрахованого за виразами (1–4).

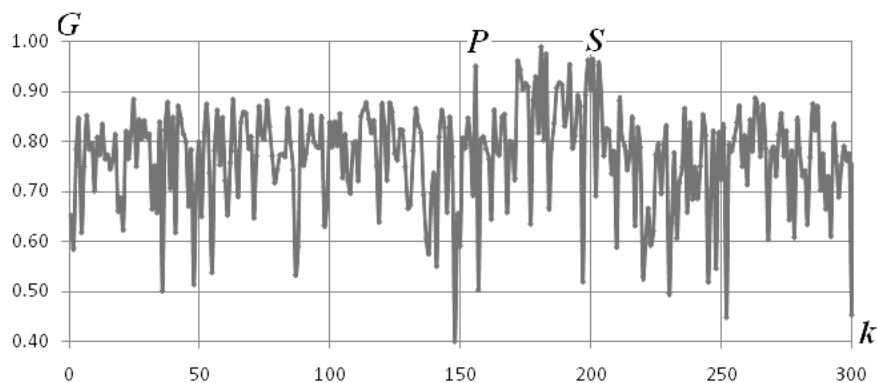


Рис. 2. Значення коефіцієнта лінійності  $G$

Моменти надходження хвиль  $P$  та  $S$  – 156-й та 200-й відліки відповідно. Як видно з рисунка 2, після надходження сейсмічного сигналу спостерігається ряд значень коефіцієнта лінійності  $G$ , які перевищують рівень 0,95 і одне з яких відповідає  $S$ -хвилі.

Таким чином, окрім поляризаційного аналізу, для ідентифікації типів сейсмічних хвиль необхідно ввести додаткові критерії. Одним з таких критеріїв є особливості кутових положень максимумів функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ - та  $S$ -хвиль.

**Метою роботи** є розробка методологічних підходів до ідентифікації об’ємних хвиль в автоматичному режимі на основі особливостей кутових положень максимумів функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ - та  $S$ -хвиль.

**Викладення основного матеріалу.** Певні кутові положення максимумів функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ - та  $S$ -хвиль виходять з особливостей колювання ґрунту для цих хвиль [4, 5]. Для  $P$ -хвилі колювання часток ґрунту відбувається в напрямку розповсюдження хвилі. Для  $S$ -хвиль зміщення ґрунту відбувається перпендикулярно напрямку розповсюдження хвилі. Кутове положення максимумів функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ - та  $S$ -хвиль будуть відрізнятися на  $90^\circ$ . На рисунку 3 наведено результати розрахунку функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ - та  $S$ -хвиль сейсмічного сигналу від промислового вибуху в Хмельницькій області, зареєстрованого ТКСС ПС “Ворсовка”.

Максимум функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ -хвилі припадає на кути  $\alpha = 214^\circ$  та  $\gamma = -38^\circ$ , що відповідає кутовому положенню кар’єру, на якому проведений вибух, відносно ПС “Ворсовка”. Максимум  $P(\alpha, \gamma)$  для  $S$ -хвилі – на кути  $\alpha = 108^\circ$  та  $\gamma = -16^\circ$ . Кут між максимумами функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ - та  $S$ -хвиль визначається як:

$$\Theta = \arccos(x_p \cdot x_s + y_p \cdot y_s + z_p \cdot z_s), \tag{6}$$

де  $\{x_p, y_p, z_p\}$  та  $\{x_s, y_s, z_s\}$  – координати одиничних векторів положення максимумів функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ - та  $S$ -хвиль, які визначаються з (2), та становить  $\Theta = 90,7^\circ$ .

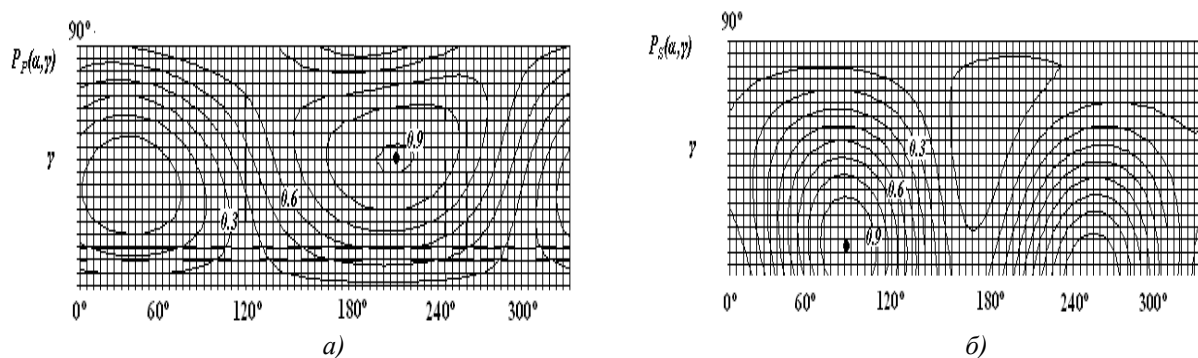


Рис. 3. Розподіл функції  $P(\alpha, \gamma)$  для хвиль  $P$  та  $S$  (відповідно а та б) сейсмічного сигналу від кар’єрного вибуху на території Хмельницької області

При цьому кутові положення інших ділянок запису сейсмічного сигналу, для яких значення коефіцієнта лінійності  $G$  перевищують рівень 0,95, відрізняються від  $90^\circ$  (рис. 4).

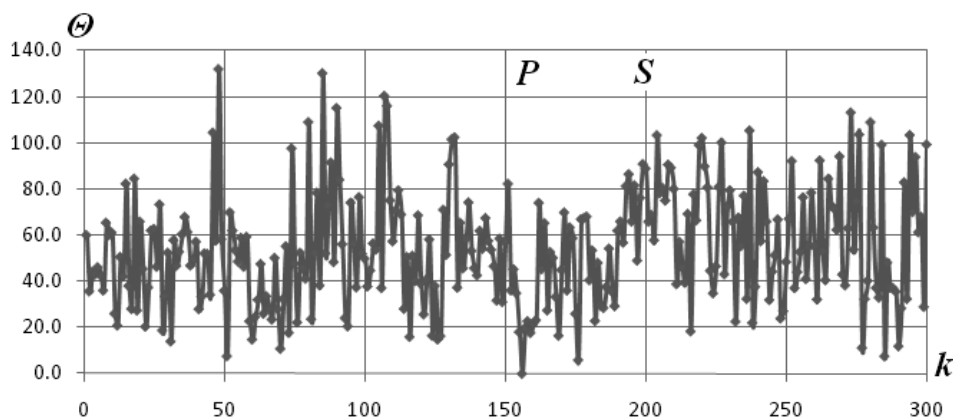


Рис. 4. Кутове положення максимуму функції  $P(\alpha, \gamma)$  для ділянок запису відносно  $\text{тах } P_p(\alpha, \gamma)$

Для виявлення  $S$ -хвилі пропонується ввести додаткову функцію  $Q(k)$ :

$$Q(k) = 1 - \frac{\left| \Theta(k) - \frac{\pi}{2} \right|}{\frac{\pi}{2}}, \tag{7}$$

де  $\Theta(k)$  – значення кута між максимумами функції  $P(\alpha, \gamma)$ , розрахованого для  $P$ -хвилі та поточної ділянки запису;

$k$  – номер ділянки запису.

Функція набуватиме максимальних значень у той момент часу, значення напрямку руху часток середовища при якому є ортогональним значенню напрямку руху часток середовища  $P$ -хвилі, що надійшла. На рисунку 5 наведено варіації функції  $Q(k)$  для сейсмічного сигналу від промислового вибуху в Хмельницькій області.

Рішення про відповідність ділянки запису  $S$ -хвилі приймається за результатом пошуку максимуму функції:

$$\Psi(k) = Q(k) \cdot G(k). \tag{8}$$

Варіації вирішальної функції  $\Psi(k)$  для сейсмічного сигналу від промислового вибуху в Хмельницькій області наведено на рисунку 6.

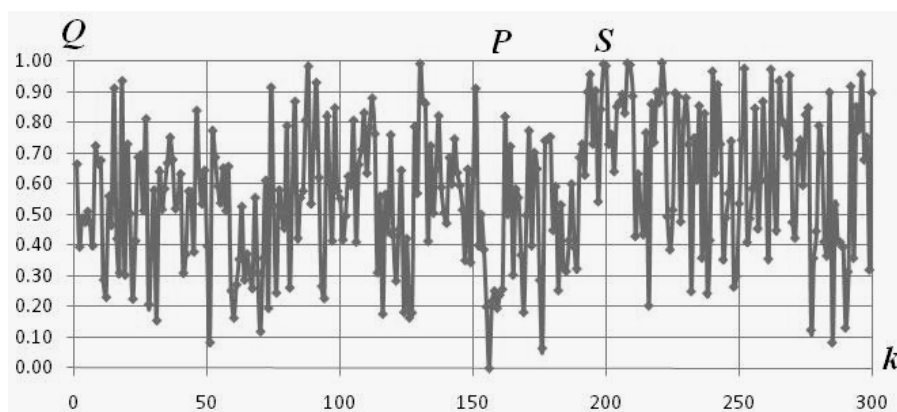


Рис. 5. Варіації функції  $Q(k)$  для сейсмічного сигналу від промислового вибуху

Максимум функції  $\Psi(k)$  для розглянутого сигналу припадає на 36-ту секунду відносно першої фази  $P$ -хвилі, що відповідає годографу.

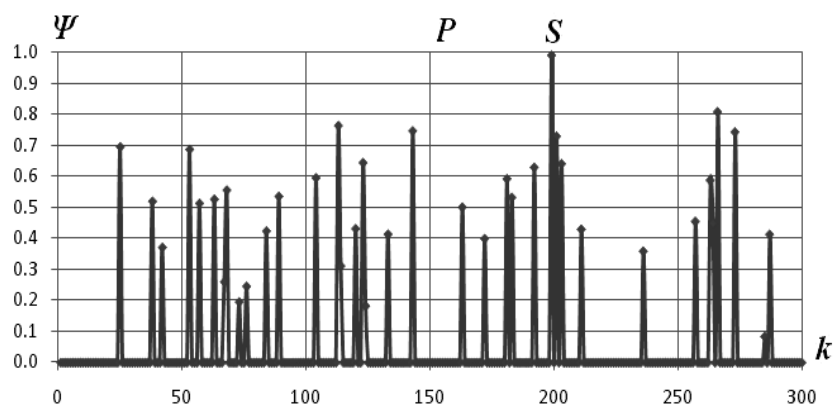


Рис. 6. Варіації вирішальної функції  $\Psi(k)$

На рисунку 7 наведено приклади використання запропонованого підходу до виявлення  $S$ -хвилі для сигналу від джерел штучного походження з осередком у регіональній зоні ( $\Delta \leq 500$  км).

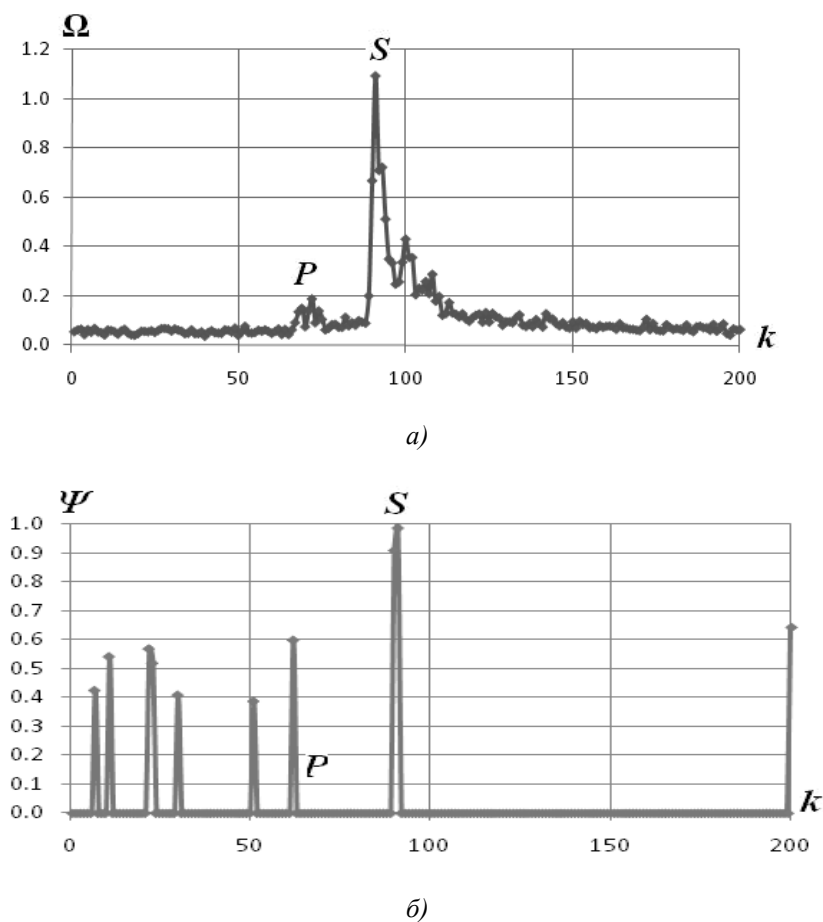


Рис. 7. Обвідна сейсмічного сигналу від промислового вибуху (а) та варіації вирішальної функції  $\Psi(k)$  (б)

**Висновки.** В роботі запропоновано підхід до ідентифікації  $S$ -хвилі в автоматичному режимі за результатами поляризаційного аналізу сейсмічного сигналу на підставі поляризаційних особливостей коливання ґрунту для  $P$ - і  $S$ -хвиль та їх зв'язок з кутовим положенням осередку сейсмічної події й пункту спостереження. Ідентифікація  $S$ -хвилі здійснюється на підставі визначення коефіцієнта лінійності та його ортогонального положення максимуму функції  $P(\alpha, \gamma)$  для  $P$ -хвилі.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. *Алказ В.Г.* Поляризационный анализ сейсмических колебаний / *В.Г. Алказ, Н.И. Онофраш, А.И. Перельберг.* – Кишинев : Штиница, 1977. – 110 с.
2. *Александров С.И.* Поляризационный анализ сейсмических волн / *С.И. Александров.* – М. : ОИФЗ РАН, 1999. – 142 с.
3. *Гальперин Е.И.* Поляризационный метод сейсмических исследований / *Е.И. Гальперин.* – М. : Недра, 1977. – 279 с.
4. *Кедров О.К.* Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / *О.К. Кедров.* – М.–Саранск : Крас. Окт., 2005. – 420 с.
5. *Саваренский Е.Ф.* Сейсмические волны / *Е.Ф. Саваренский.* – М. : Недра, 1972. – 293 с.
6. *Гринюк Ю.В.* Використання поляризаційної фільтрації сейсмічних сигналів для покращення якісних показників їх виявлення / *Ю.В. Гринюк, В.А. Кирилюк, В.О. Сергійко* // Зб. наук. пр. ЖВІРЕ. – 2004. – Вип. 8. – С. 124–129.
7. *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. – № 1(52). – 2010. – С. 67–71.

ГОРДІЄНКО Вадим Олексійович – начальник автослужби бази забезпечення наукового процесу Національного університету оборони України.

Наукові інтереси:

– обробка геофізичної інформації.

ГОРДІЄНКО Юрій Олексійович – кандидат технічних наук, інженер науково-дослідницького випробувального відділу Головного центру спеціального контролю Національного космічного агентства.

Наукові інтереси:

– обробка геофізичної інформації;

– фрактальний аналіз, детермінований хаос.

КИРИЛЮК Володимир Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри технічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– обробка геофізичної інформації.

Подано 11.08.2010

**Гордієнко В.О., Гордієнко Ю.О., Кирилюк В.А.** Виявлення S-хвилі сейсмічного сигналу за поляризаційною ознакою

**Гордієнко В.О., Гордієнко Ю.О., Кирилюк В.А.** Обнаружение S-волны сейсмического сигнала по поляризационному признаку

**Gordienko V.O., Gordienko U.O., Kirilyuk V.A.** Detection of S-wave of seismic signal on polarization sign

УДК 550.344.03.42

Обнаружение S-волны сейсмического сигнала по поляризационному признаку / **В.О. Гордієнко, В.А. Кирилюк, Ю.О. Гордієнко**

В статье рассматривается возможность автоматизации идентификации S-волны сейсмического сигнала, зарегистрированного трехкомпонентной сейсмической станцией, по поляризационному признаку. Приведені результати тестирования предложенного подхода на сейсмических сигналах от источников с очагами в ближней зоне.

УДК 550.344.03.42

Detection of S-wave of seismic signal on polarization sign / **V.O. Gordienko, U.O. Gordienko, V.A. Kirilyuk**

Possibility of automatic authentication of S-wave of seismic signal registered the three-component seismic station is probed on a polarization sign. Results are tested for seismic signals from industrial explosions.