

## ПОПЕРЕДНЄ ВИЯВЛЕННЯ ВСТУПУ СЕЙСМІЧНОГО СИГНАЛУ ЗА ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЮ ОЗНАКОЮ

Мета досліджень – розроблення методологічних засад щодо попереднього виявлення надходження сейсмічного сигналу, зареєстрованого трикомпонентною сейсмічною станцією (ТКСС), з урахуванням поляризаційних властивостей фонові та сигнальної складових. Методика. Реєстрацію сейсмічних сигналів здійснено за допомогою ТКСС GURALP CMG мережі сейсмічних спостережень Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) Державного космічного агентства (ДКА) України. Результати. Основною відмінністю сигнальної складові трикомпонентного сейсмічного запису від фону є поляризаційні властивості. Врахування цих властивостей дає змогу виявляти сейсмічні сигнали та визначати їх складові. Відомі підходи щодо поляризаційного аналізу трикомпонентного сейсмічного запису потребують великих обчислювальних затрат та, як правило, застосовуються для опрацювання та аналізу сейсмічного запису за контуром реального часу. У роботі запропоновано підхід, який дає змогу оцінювати ступінь лінійності прийнятої реалізації та визначити кути надходження сейсмічної хвилі, що особливо важливо для вирішення завдань моніторингу потенційних джерел надзвичайних подій (потенційно небезпечних об'єктів та сейсмоактивних районів) і може бути застосований у контурі реального часу. Наукова новизна. Врахування поляризаційних властивостей, на відміну від амплітудних критеріїв виявлення, дає змогу виявляти сигнали з меншим відношенням сигнал / шум, тим самим підвищуючи магнітудну чутливість ТКСС. Застосування поляризаційного аналізу для виявлення сейсмічного сигналу дає змогу, окрім виявлення, отримувати додаткові відомості про параметри складових сейсмічного сигналу (азимут та кут виходу на денну поверхню), які можуть використовуватись для ідентифікації складових сейсмічного сигналу та визначення місцеположення джерела сейсмічної події стосовно пункту спостереження (ПС). Практична значущість. Запропоновано підхід, який дає можливість підвищити магнітудну чутливість ПС та мережі спостережень загалом. Відносна простота реалізації запропонованого підходу дає змогу застосовувати його у режимі реального часу. Визначення кутових характеристик виходу сейсмічної хвилі дає можливість застосовувати запропонований підхід у контурі безперервного моніторингу потенційних джерел надзвичайних подій.

*Ключові слова:* сейсмічний моніторинг, трикомпонентна сейсмічна станція, виявлення сейсмічного сигналу, поляризаційний аналіз.

### Вступ

Останнім часом тенденція до реалізації спостережень у міжнародних та національних мережах сейсмічних спостережень спрямована на застосування простих, але високопродуктивних підходів для виявлення сейсмічних сигналів на кожному елементі щільної мережі сейсмічних спостережень, з подальшим повним їх опрацюванням у спеціалізованих центрах даних [Ващенко та ін., 2012; Гордієнко та ін., 2017; Машков, Кирилук, 2002].

Територіальна обмеженість мережі Національної системи сейсмічних спостережень України, однією зі складової якої є мережа ГЦСК ДКА України [Vakaliuk, et al., 2023], особливо внаслідок тимчасової втрати Кримського сегмента, та неможливість її розширення сьогодні, доводять необхідність розвитку підходів щодо вирішення всього переліку завдань сейсмічного моніторингу окремими пунктами сейсмічних спостережень, на яких встановлені ТКСС, – виявлення сейсмічних сигналів, визначення

складових сейсмічного запису, оцінювання їх параметрів, визначення осередку сейсмічної події, ідентифікація її природи, оцінювання параметрів сейсмічного джерела та можливих наслідків.

Тому питання удосконалення відомих та розроблення нових методологічних підходів щодо опрацювання вимірювальних даних ТКСС є актуальним.

Ця робота є частиною запланованого комплексу досліджень, спрямованих на удосконалення наявних та розроблення нових теоретичних основ виявлення сейсмічними засобами факторів небезпеки надзвичайних природних та техногенних ситуацій, які становлять небезпеку для життєдіяльності.

### *Аналіз останніх досліджень та публікацій*

Виявлення сейсмічних сигналів складається із таких етапів:

1. Попереднє виявлення – у режимі реального часу виявлення ділянки сейсмічного запису, на якій з визначеною вірогідністю передбачається наявність сигнальної складової.

2. Виявлення (детектування) – у постоперативному режимі (або у режимі часу, наближеного до реального) виявлення сейсмічного сигналу, визначення його складових та їх параметрів.

3. Оброблення сейсмічного сигналу – в постоперативному режимі уточнення параметрів сейсмічного сигналу (складових), визначення осередку сейсмічної події, ідентифікація природи та оцінювання параметрів сейсмічного джерела, оцінювання можливих наслідків сейсмічної події.

Найважливішим є саме етап попереднього виявлення, оскільки на цьому етапі потрібно виявити сигнальну складову на певному рівні хибних спрацювань. Його можна реалізувати у контурі реального часу.

Такий підхід дає змогу розвантажити основний контур опрацювання сейсмічних даних для застосування алгоритмічних засад повного оброблення, які потребують більших обчислювальних затрат, на відміну від попереднього виявлення.

Питань виявлення сейсмічних сигналів за результатами спостережень ТКСС стосується низка робіт [Машков, Кирилук, 2002a; Mashkov, Kiriluk, 2002b; Гордієнко et al., 2017; Li et al., 2020; Rivero-Moreno, & Escalante-Ramirez, 1996; Vakaliuk, et al., 2023; Withers, 1998; Zhao, 2021].

Більшість реалізованих підходів щодо попереднього виявлення сейсмічних сигналів за результатами спостережень ТКСС використовують критерій перевищення порога за амплітудою, достатньо ефективний за енергетичного відношення сигнал / шум не менше ніж  $2 \div 3$ .

Нині для попереднього виявлення сейсмічних сигналів за результатом спостережень, зокрема і для мережі спостережень ГЦСК, широко використовують детектор STA/LTA (Short Time Average to Long Time Average), який для опрацювання трикомпонентного сейсмічного запису визначається як [Trnkoczy, 2009; Vakaliuk, 2023, May; Withers, 1998]:

$$STA_i = \frac{1}{T} \dot{\mathbf{a}} \sqrt{n_j^2 + e_j^2 + z_j^2} \quad (1)$$

$$LTA_i = \frac{1}{M} \dot{\mathbf{a}} \sqrt{n_j^2 + e_j^2 + z_j^2} \quad (2)$$

$$h_i = \frac{STA_i}{LTA_i}, \quad (3)$$

де  $\{z_i, n_i, e_i\}$  – поточні координати зміщення часток ґрунту;  $T$  – тривалість вибірки, для якої оцінюють наявність сигналу;  $M$  – тривалість вибірки, для якої оцінюють параметри фону;  $\eta$  – відношення сигнал / шум.

Цей підхід потребує порівняно незначного обсягу обчислень, що є істотним аргументом для його використання у системах опрацювання вимірювальних даних реального часу [Алказ, 1977].

Загальним недоліком підходів, які застосовують на етапі попереднього виявлення, зокрема і

STA/LTA, можна вважати незначну інформативність результатів попереднього виявлення, а саме визначення лише ділянки сейсмічного запису, на якому з визначеною вірогідністю передбачають наявність сейсмічного сигналу. Крім того, застосування цього підходу не завжди дає змогу виявляти складові сейсмічного сигналу, що особливо важливо для однопозиційних сейсмічних спостережень.

Наступний крок – оцінювання параметрів сигнальної складової: уточнення часу вступу, визначення амплітуди, періоду, азимуту і кута виходу на денну поверхню тощо. Його реалізовано на другому етапі процесу виявлення за контуром реального часу.

За результатами трикомпонентних сейсмічних спостережень є можливість застосовувати інші критерії (ознаки) сигнальної складової, окрім амплітудного.

Однією із ознак сейсмічного сигналу та його складових під час реєстрації ТКСС є поляризаційні властивості [Алказ, 1977; Ляшук, Карягін, 2018; Vakaliuk, 2023, May; Bataille & Chiu, 1991]. Записи сейсмічних хвиль від вибухів, землетрусів та інших джерел характеризуються лінійною поляризацією коливань, тоді як шуми є результатом суперпозиції хвиль, що надходять на станцію від різних джерел та мають низький рівень лінійності поляризації. Ці відмінності сигналів та шумів можна виявити за допомогою поляризаційного аналізу коливань. Перевагою застосування апарату поляризаційного аналізу (АПА) є те, що за його результатами, окрім часу вступу сейсмічного сигналу, є можливість визначити його основні складові та їх кутові характеристики (азимут  $\alpha$  та кут виходу на денну поверхню  $\vartheta$ ), що, своєю чергою, пов'язано з місцеположенням осередка сейсмічної події відносно пункту спостереження (ПС) [Vakaliuk, 2023].

Ступінь лінійності трикомпонентного сейсмічного запису  $\{z_i, n_i, e_i\}$  визначено за результатом розрахунку матриці коваріації  $K$  [11]:

$$K = \begin{pmatrix} \text{cov}(n, n) & \text{cov}(n, e) & \text{cov}(n, z) \\ \text{cov}(e, n) & \text{cov}(e, e) & \text{cov}(e, z) \\ \text{cov}(z, n) & \text{cov}(z, e) & \text{cov}(z, z) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Квадратична форма (еліпсоїд), задана цією матрицею, приводиться до головних осей. Велика вісь еліпсоїда характеризує орієнтацію у просторі повного вектора зміщення сейсмічної хвилі кутами – азимутом  $\alpha$  та кутом виходу на денну поверхню  $\vartheta$ . Коефіцієнт лінійності  $G$  ( $0 < G < 1$ ) прийнятої реалізації трикомпонентного запису визначається як [Li et al., 2020, Bataille, & Chiu, 1991]:

$$G = 1 - \frac{b}{a}, \quad (5)$$

де  $b$  та  $a$  – відповідно значення найменшої та найбільшої піввісі еліпсоїда.

Для визначення ступеня лінійності трикомпонентного сейсмічного запису також застосовують

послідовну поляризаційну фільтрацію [Гордієнко, 2011], апроксимацію траєкторії руху часток ґрунту еліпсоїдом [Машков, Кирилюк, 2002а] тощо.

Відомі підходи щодо реалізації АПА використовують лише у постоперативному режимі, оскільки це потребує значних обчислювальних затрат.

Іншим підходом щодо оброблення вимірювальних даних ТКСС є поляризаційна фільтрація (ПФ). ПФ трикомпонентних сейсмічних даних полягає у перерахунку початкового трикомпонентного сейсмічного запису в повні вектори зміщення на вибраний напрямок, які перемножують на вагову функцію [Гордієнко та ін., 2010]:

$$p_i(\mathbf{a}, \mathbf{g}) = g_i \cdot G_1 \cdot G_2, \quad (6)$$

де  $g_i$  – повний вектор зміщення на вибраний напрямок;  $G_1$  – коефіцієнт лінійності ( $0 < G_1 < 1$ ) прийнятої реалізації трикомпонентного запису, який визначається за виразом [Гордієнко, 2011];  $G_2$  – значення кута між положенням у просторі найбільшої півосі еліпсоїда та визначеним напрямком, заданим кутом виходу сигналу на денну поверхню  $\vartheta$  та азимутом  $\alpha$ .

Обмеженням застосування ПФ є необхідність наявності апріорної інформації про можливий (очікуваний) напрямок надходження сейсмічного сигналу. Крім того для застосування ПФ також необхідно визначати ступінь лінійності ділянки сейсмічного запису [Гордієнко та ін., 2010; Гордієнко, 2011].

Отже, завдання розроблення методологічних засад попереднього виявлення сейсмічних сигна-

лів, оснований на врахуванні їх поляризаційних властивостей, які можна реалізувати у реальному режимі часу, є важливим.

**Об'єктом дослідження** є моніторинг сейсмічної обстановки та виявлення джерел надзвичайних подій за результатами сейсмічних спостережень.

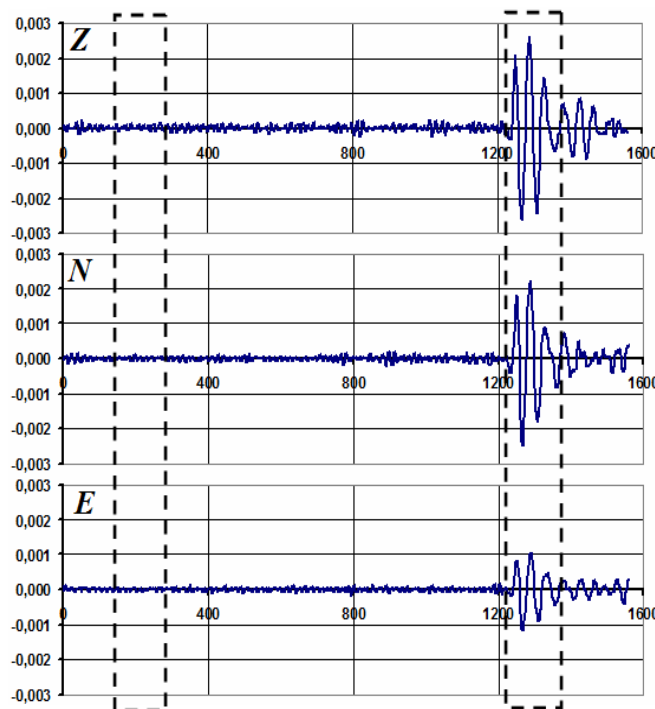
**Предметом дослідження** є методи опрацювання трикомпонентних сейсмічних даних.

### Мета

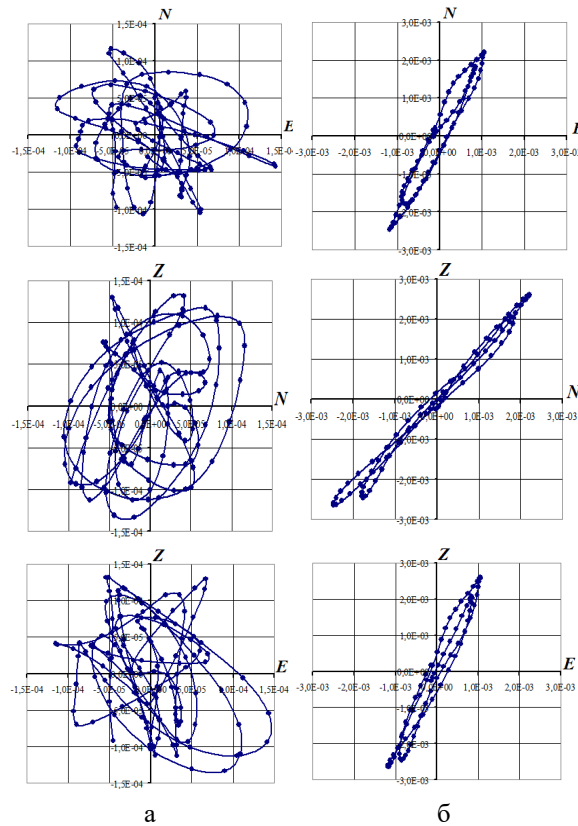
Мета статті – розроблення методологічних засад щодо реалізації попереднього виявлення сейсмічного сигналу з урахуванням поляризаційних властивостей сигнальної та фонові складових.

### Методика

Траєкторія руху часток ґрунту під час проходження сейсмічної хвилі має форму сильно витягнутого еліпсоїда, а для фону – близьку до сфери [Гордієнко та ін., 2017]. На рис. 1, 2 наведено трикомпонентний сейсмічний запис першого вступу ( $P$ -хвилі) сигналу від землетрусу з осередком у горах Вранча (Румунська частина Карпат,  $M = 4.2$ , 22.05.2004 р.) зареєстрованою ТКСС “Ворсівка” (м. Малин, Житомирська обл.) та траєкторії руху часток ґрунту у трьох ортогональних проєкціях для запису фону та сигналу (виділені ділянки сейсмічного запису на рис. 1). Наведені приклади наочно доводять відмінності у руху ґрунту для фону та сигналу. Ці відмінності покладено в основу застосування АПА.



**Рис. 1.** Хвильові форми трикомпонентного сейсмічного запису першого вступу сигналу від землетрусу із осередком у зоні Вранча



**Рис. 2.** Проекції траєкторії руху часток ґрунту для фону (а) та сигнальної складової (б)

Основне призначення наявних підходів щодо поляризаційного аналізу, незалежно від реалізації вирішальної функції, є оцінювання ступеня лінійності коливань та визначення кутового положення великої півосі еліпсоїда. Для першого вступу сейсмічного сигналу (*P*-хвиля) кутове положення великої півосі еліпсоїда визначає напрямок на сейсмічне джерело відносно ПС. Маючи апіорну інформацію про очікуваний напрям надходження сейсмічної хвилі, ступінь лінійності коливань можна оцінити як [Гордієнко та ін., 2010]:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^T \dot{\mathbf{a}} |m_i|}{\sum_{i=1}^T \dot{\mathbf{a}} |M_i|}, \quad (7)$$

де  $M_i\{z_i, n_i, e_i\}$ ,  $i = 1 \dots T$  – значення (вектор) зміщення часток ґрунту;

$$|M_i| = \sqrt{z_i^2 + e_i^2 + n_i^2} \quad (8)$$

де,  $z_i$  – значення зміщення ґрунту на вертикальному каналі;  $e_i$  – значення зміщення ґрунту на каналі Схід – Захід;  $n_i$  – значення зміщення ґрунту на каналі Північ – Південь;  $T$  – тривалість вибірки;

$m_i$  – значення проекції вибірки на певний (підконтрольний або очікуваний) напрямок, що визначається як

$$m_i = |M_i| \times \cos(M_i \wedge r) \quad (9)$$

$$m_i = z_i \times z + e_i \times e + n_i \times n$$

де,  $r\{z, n, e\}$  – одиничний вектор який визначає підконтрольний (очікуваний) напрямок, координати якого визначаються як

$$z = \sin(\gamma);$$

$$n = \cos(\gamma) \times \cos(\alpha); \quad (10)$$

$$e = \cos(\gamma) \times \sin(\alpha).$$

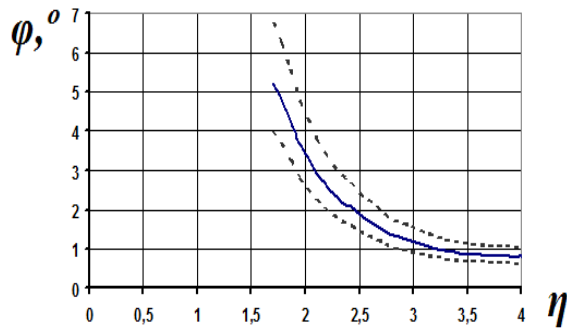
де,  $\gamma$  – очікуваний кут виходу сейсмічної хвилі на денну поверхню;  $\alpha$  – очікуваний азимут надходження сейсмічної хвилі.

Такий підхід потребує менше затрат, на відміну від відомих, які основані на врахуванні поляризаційних властивостей сигналу та фону, що дає змогу використовувати його у реальному режимі часу. Однак застосування такого підходу для вирішення завдань виявлення сейсмічного сигналу також передбачає наявність апіорної інформації про напрямок надходження сейсмічної хвилі (відомості про підконтрольний потенційно небезпечний об’єкт або сейсмоактивну зону).

Як апіорну інформацію про очікуваний напрямок надходження сейсмічної хвилі (положення головної піввісі еліпсоїда) запропоновано використовувати кутове положення максимального зміщення отриманої вибірки сейсмічних даних трикомпонентного запису  $M_{\max} \{z_{\max}, n_{\max}, e_{\max}\}$ :

$$M_{\max} = \max |M_i|, i = 1 \dots T. \quad (11)$$

На рис. 3 наведено осереднені значення кутів між головною піввісю еліпсоїда  $r\{z, n, e\}$  (напрямоком надходження сейсмічної хвилі), визначеною за результатом застосування АПА, та положенням максимального значення вибірки  $q\{z_q, n_q, e_q\}$  для різних значень відношення сигнал / шум, на прикладі перших вступів  $P$ -хвиль сейсмічних сигналів від подій з осередками в регіональній зоні. Пунктиром показано довірчі інтервали для середніх значень кутів на рівні  $\pm\sigma$ .



**Рис. 3.** Залежність кута між положенням максимального значення вибірки та найбільшої піввісі еліпсоїда від відношення сигнал / шум

Як видно з рис. 3, для відношення сигнал / шум більше ніж 2 відхилення положення максимального зміщення отриманої вибірки від положення головної піввісі еліпсоїда не перевищує 3°.

Виявлення сейсмічного сигналу здійснюється за результатом оцінювання ступеня лінійності коливань (7). Для цього використовують значення проєкції вибірки на напрямок, який відповідає максимальному значенню зміщення ґрунту отриманої вибірки:

$$m_i = |M_i| \cos(M_i \wedge q); \quad (12)$$

$$m_i = z_i \times z_q + e_i \times e_q + n_i \times n_q.$$

де  $q\{z_q, n_q, e_q\}$  – одиничний вектор, який визначає положення у просторі максимального значення зміщення:

$$z_q = \frac{z_{\max}}{|M_{\max}|}; e_q = \frac{e_{\max}}{|M_{\max}|}; n_q = \frac{n_{\max}}{|M_{\max}|} \quad (13)$$

Результати опрацювання виділених фрагментів хвильових форм (рис. 1, а) трикомпонентного сейсмічного запису за наявними (4)–(6) та запропонованим (11)–(13) способами наведено у табл. 1.

Рішення про наявність сейсмічного сигналу приймають у разі перевищення поточного значення оцінки ступеня лінійності порога  $Y_i^3 h_Y$ . Порог  $h_Y$  визначається за критерієм Неймана – Пірсона [Пічугін, 2006], згідно з яким мінімізується значення  $b$  ймовірності пропуску сигналу за умови, що ймовірність хибного виявлення сигналу  $a$  не перевищує заданого значення  $a_Y$ .

Таблиця 1

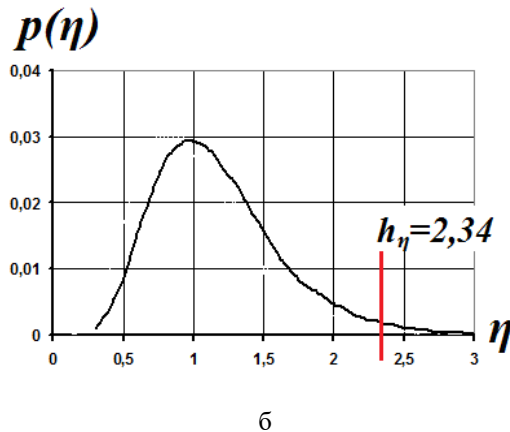
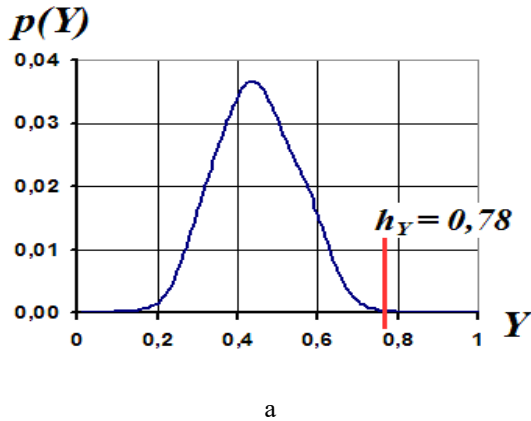
**Результати опрацювання трикомпонентного сейсмічного запису фону та сигнальної складової для різних методів визначення кутових характеристик та ступеня лінійності**

Параметри	АПА		Максимальне значення		МОЧ		МНК	
	фон	сигнал	фон	сигнал	фон	сигнал	фон	сигнал
Коефіцієнт лінійності	0,51	0,99	0,62	0,97	0,65	0,86	0,49	0,99
Азимут надходження $\alpha$ , °	142,1	205,6	127,4	204,8	133,1	201,3	141,7	205,9
Кут виходу $\gamma$ , °	52,3	46,3	60,8	44,4	28,7	42,4	52,6	46,1

Поріг виявлення визначають за умови значення ймовірності хибного виявлення на рівні 0,05

$$a_Y = \int_{h_Y}^{\infty} P(Y) dY = 0,05 \quad (14)$$

На рис. 4 наведено розподіли оцінки ступеня лінійності сейсмічного фону, визначеного запропонованим способом (11)–(13) та відношення сигнал / шум (1)–(3).



**Рис. 4.** Розподіл значення оцінки ступеня лінійності за запропонованим способом (а) та значення STA/LTA (б) для фонові складові.

За умовою (14) значення порога становить  $h_Y=0,78$  (рис. 4, а). За тією ж умовою у разі виявлення сигналу із використанням відношення STA/LTA значення порога становить  $h_\eta=2,34$  (рис. 4, б). Зауважимо, що порогове значення відношення сигнал / шум відрізнятиметься для різних умов розташування сейсмоприймача. Крім того, на поріг виявлення за амплітудним критерієм можуть впливати різні фактори (сезонні, метеорологічні, техногенні тощо), тому його значення потребує періодичного уточнення.

Наступне питання – уточнення (визначення) кутових характеристик надходження сейсмічного сигналу на ПС – азимута та кута виходу на денну поверхню.

Азимут та кут виходу на денну поверхню сейсмічної хвилі визначають як:

$$g = \arctg \frac{z_{\max}^2}{\sqrt{e_{\max}^2 + n_{\max}^2}} \quad (15)$$

$$a = \arctg \frac{e_{\max}}{n_{\max}} \quad (16)$$

У роботі [Пічугін, 2006] азимут на кут виходу визначено як математичне очікування (МОЧ) кутів, розрахованих для кожного значення отриманої вибірки.

$$m_g = \frac{1}{T} \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} \arctg \frac{z_i^2}{\sqrt{e_i^2 + n_i^2}} \quad (17)$$

$$m_a = \frac{1}{T} \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} \arctg \frac{e_i}{n_i} \quad (18)$$

З табл. 1 видно, що значення кутів, отриманих із застосуванням класичних підходів (15)–(18), відрізняється від значень, одержаних із використанням АПА.

Для визначення кутів надходження сейсмічної хвилі запропоновано застосовувати метод найменших квадратів (МНК) [Косуліна та ін, 2020]. Азимут надходження сейсмічної хвилі із застосуванням МНК визначають за виразом:

$$q = \frac{T \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} e_i \times n_i - \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} e_i \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} n_i}{T \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} n_i^2 - \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} e_i \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} n_i} \quad (19)$$

Кут виходу сейсмічної хвилі на денну поверхню визначається як:

$$J = \frac{T \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} z_i \times g_i - \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} z_i \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} g_i}{T \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} g_i^2 - \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} z_i \times \overset{\circ}{\underset{\circ}{\mathbf{a}}} g_i} \quad (20)$$

де

$$g_i = \frac{n_i}{\cos q} \quad (21)$$

Азимут надходження сейсмічної хвилі та кут виходу на денну поверхню визначають як:

$$g = \arctg J \quad (22)$$

$$a = \begin{cases} \arctg q & J > 0 \\ \arctg q + \pi & J < 0 \end{cases} \quad (23)$$

На рис. 5 наведено проєкції руху часток ґрунту для сигнальної складові (рис. 1) та визначені із застосуванням МНК значення функції регресії (червона пряма). Визначення коефіцієнта

лінійності здійснюється відповідно до виразів (7)–(10). Для визначення параметрів одиночного вектора

$r\{z, n, e\}$  застосовують отримані значення кутів надходження сейсмічної хвилі (17)–(21).

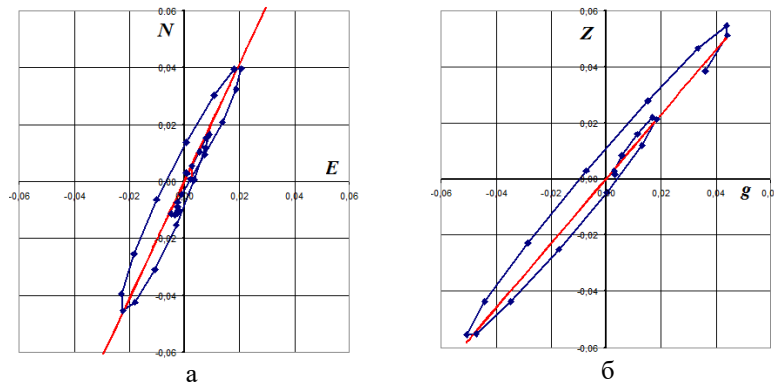


Рис. 5. Проекції траєкторії руху часток на площині NOE (а) та ZOg (б)

### Результати

На рис. 6 наведено результати застосування відомого (STA/LTA) та запропонованого підходів щодо виявлення вступу сейсмічного сигналу ( $P$ -хвилі) за результатом опрацювання трикомпонентного сейсмічного запису сигнальної складової від землетрусу з осередком у Чернівецькій обл. (16.01.2020,  $M = 2.4$ ), зареєстрованого ТКСС ПС “Полтава” (Полтавська обл.). Результати опра-

цювання із застосуванням використовуваних і запропонованого підходів щодо визначення ступеня лінійності та кутових характеристик надходження сейсмічного сигналу наведено у табл. 2.

Як видно з рис. 6, застосування амплітудного критерію призводить до пропуску надходження сейсмічного сигналу. А зменшення рівня порога виявлення спричинить хибне виявлення (ділянка 1, рис. 6, б).

Застосування запропонованого підходу дає змогу виявити вступ сейсмічного сигналу (ділянка 2, рис. 6, в).

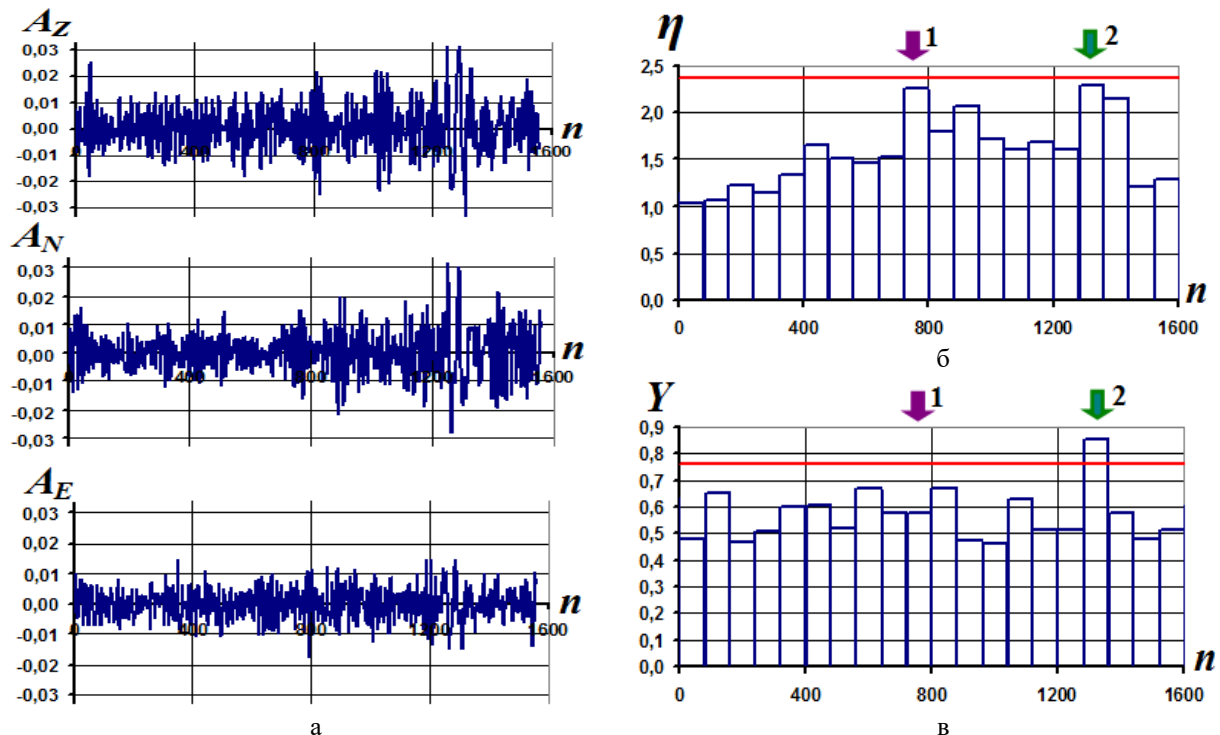


Рис. 6. Хвильові форми трикомпонентного сейсмічного запису першого вступу сигналу від землетрусу із осередком у Чернівецькій обл.:

а – хвильові форми сейсмічного запису; б – значення відношення сигнал / шум (STA/LTA); в – значення оцінки ступеня лінійності за максимальним значенням вибірки.

Таблиця 2

Результати опрацювання трикомпонентного сейсмічного запису сигнальної складової для різних методів визначення кутових характеристик та ступеня лінійності (фон – ділянка 1, сигнал – ділянка 2 рис. 6)

Параметри	АПА		Максимальне значення		МОЧ		МНК	
	фон	сигнал	фон	сигнал	фон	сигнал	фон	сигнал
Коефіцієнт лінійності	0,67	0,88	0,59	0,86	0,47	0,82	0,63	0,89
Азимут надходження $\alpha$ , °	47,4	261,1	44,3	257,8	62,2	238,6	46,7	261,3
Кут виходу, °	22,6	37,3	20,1	39,5	18,2	26,7	22,4	36,9

На рис. 7 наведено результати застосування розглянутих підходів для виявлення вступу сейсмічного сигналу ( $P$ -хвилі) від землетрусу з осередком у горах Вранча ( $M = 2.8$ , 09.09.2021 р.), зареєстрованого ТКСС ПС “Ворсівка”. Як видно з

рис. 7, застосування амплітудного критерію призводить до хибного виявлення вступу сейсмічного сигналу (ділянка 1, рис. 7, б). А збільшення рівня порога виявлення може призвести до пропуску корисного сигналу (ділянка 2, рис. 7, б).

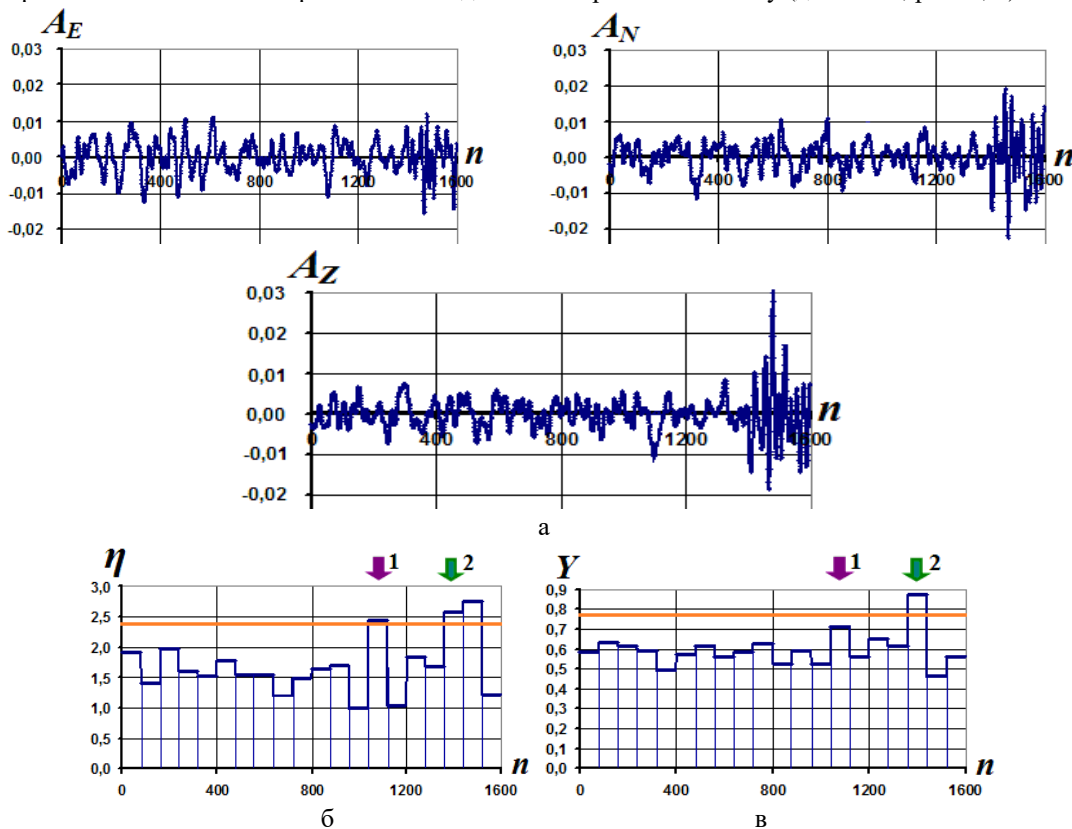


Рис. 7. Хвильові форми першого вступу сейсмічного сигналу від землетрусу з осередком у горах Вранча та результати опрацювання:

- а – хвильові форми сейсмічного запису; б – значення відношення сигнал / шум (STA/LTA); в – значення оцінки ступеня лінійності за максимальним значенням вибірки

Застосування запропонованого підходу дає змогу вилучати з опрацювання окремих пуг сейсмічного запису (ділянка 1 рис. 7, в), водночас виявляти вступ сигнальної складової (ді-

янка 2 рис. 7, в). Результати визначення ступеня лінійності та кутових характеристик надходження сейсмічного сигналу наведено у табл. 3.



**Результати опрацювання трикомпонентного сейсмічного запису сигнальної складової для різних методів визначення кутових характеристик та ступеня лінійності (фон – ділянка 1, сигнал – ділянка 2, рис. 7)**

Параметри	АПА		Максимальне значення		МОЧ		МНК	
	фон	сигнал	фон	сигнал	фон	сигнал	фон	сигнал
Коефіцієнт лінійності	0,56	0,86	0,71	0,84	0,63	0,78	0,56	0,82
Азимут надходження $\alpha$ , °	122,1	205,2	133,4	206,3	133,1	197,3	141,7	204,8
Кут виходу $\gamma$ , °	61,6	46,8	33,5	47,2	19,2	36,3	48,2	46,6

Отже, запропонований підхід дає змогу виявляти сейсмічні сигнали за оцінкою ступеня лінійності коливань відносно максимального зміщення часток ґрунту у вибірці, визначати кутові характеристики надходження сейсмічного сигналу та оцінювати ступінь лінійності.

**Наукова новизна та практична значущість**

Застосування запропонованого підходу порівняно з амплітудним критерієм виявлення забезпечує такі переваги:

- підвищення магнітудної чутливості ПС;
- можливість отримати додаткові відомості про параметри сейсмічного сигналу, а саме азимут та кут виходу сейсмічної хвилі на денну поверхню, що пов'язано з місцеположенням осередка сейсмічної події відносно ПС;
- запропонований підхід також можна застосовувати для виявлення складових сейсмічного сигналу.

Крім того, застосування запропонованого підходу потребує менше обчислювальних затрат порівняно з відомими методами поляризаційного аналізу, що дає змогу реалізувати його у контурі реального часу.

Визначення додаткових відомостей у контурі попереднього виявлення сейсмічного сигналу, а саме кутових характеристик надходження сейсмічної хвилі (азимут та кут виходу), дає змогу упровадити його у моніторинг потенційних джерел надзвичайних подій.

**Висновки**

У роботі запропоновано підхід щодо реалізації попереднього виявлення сейсмічного сигналу, зареєстрованого ТКСС за поляризаційною ознакою.

Як оцінку коефіцієнта лінійності запропоновано використовувати відношення проєкції вектора зміщення ґрунту вибірки на напрямок максимального значення прийнятої реалізації до повного значення зміщення вибірки.

Запропонований підхід дає змогу виділяти ділянку сейсмічного запису із сигнальною складовою та попередньо визначати значення кутових характеристик зареєстрованого сигналу (азимут та кут виходу).

Для визначення кутових характеристик сейсмічного сигналу застосовується МНК.

Запропонований підхід дає змогу покращити показники виявлення порівняно з STA/LTA виявником, який застосовують нині, тим самим підвищуючи магнітудну чутливість пунктів спостереження ГЦСК. Крім того, незначна кількість обчислювальних операцій дає можливість використовувати цей підхід у реальному режимі часу.

Простота запропонованих підходів дає змогу на етапі попереднього виявлення не тільки виявляти сейсмічні сигнали з меншим відношенням сигнал / шум, але і визначати кутові характеристики надходження складової сейсмічного сигналу. Це особливо важливо для вирішення завдань моніторингу потенційних джерел надзвичайних подій.

**Список літератури**

- Алказ В. Г., Онофраш Н. И., Перельберг А. И. (1977). Поляризационный анализ сейсмических колебаний. Издательство Штиинца.
- Ващенко, В. М., Толчонов, І. В., Гордієнко, Ю. О., & Солонець, О. І. (2012). Постановка проблеми виявлення факторів небезпеки надзвичайних ситуацій сейсмічними засобами. *Системи обробки інформації*, (2), 280–284.

- Гордієнко, В. О., Гордієнко, Ю. О., & Кирилюк, В. А. (2010). Виявлення сейсмічних сигналів та визначення кутових характеристик їх джерел за результатами поляризаційної фільтрації. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, (1 (52)), 67–71.
- Гордієнко, Ю. О., Солонець, О. І., Кошель, А. В., & Руденко, Д. В. (2017). Аналіз методів виявлення сейсмічних сигналів за результатами спостережень трикомпонентною сейсмічною станцією. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*, (2), 107–110.
- Гордієнко, Ю. О. (2011). Поляризаційна фільтрація вимірювальних даних трикомпонентної сейсмічної станції. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, (3 (58)), 123–127. [https://doi.org/10.26642/tn-2011-3\(58\)-123-127](https://doi.org/10.26642/tn-2011-3(58)-123-127)
- Косуліна Н. Г., Ляшенко Г. А., Зотова О. С., Полянова Н. В. (2020). Метод найменших квадратів: навч.-метод. посіб. Харків. ХНТУСГ. 25 с.
- Ляшук О. І., Карягін Є. В. (2018). Особливості сейсмічності в регіоні архіпелагу Аргентинські острови, обумовленої процесами айсбергоутворення. *Ukrainian Antarctic Journal*, (1 (17)), 32–39. [https://doi.org/10.33275/1727-7485.1\(17\).2018.29](https://doi.org/10.33275/1727-7485.1(17).2018.29)
- Машков О. А., Кирилюк В. А. (2002a). Научные проблемы создания автоматизированной системы обработки сейсмических данных (алгоритмические аспекты). *Специальная техника и вооружение*, № 1, 2, 35–41.
- Машков О. А., Кирилюк В. А. (2002b). Методика виявлення сейсмічних сигналів. *Труди Академії оборони України*. № 35, 122–131.
- Пічугін, М. Ф., Машков, О. А., Сашук, І. М., & Кирилюк, В. А. (2006). Обробка геофізичних сигналів у сучасних автоматизованих комплексах: навч. посіб.
- Bataille, K., & Chiu, J. M. (1991). Polarization analysis of high-frequency, three-component seismic data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(2), 622–642.
- Li, J., He, M., Cui, G., Wang, X., Wang, W., & Wang, J. (2020). A novel method of seismic signal detection using waveform features. *Applied Sciences*, 10(8), 2919. <https://doi.org/10.3390/app10082919>
- Rivero-Moreno, C., & Escalante-Ramirez, B. (1996, June). Seismic signal detection with time-frequency models. In *Proceedings of Third International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis (TFSA-96)* (pp. 345–348). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TFSA.1996.547484>
- Trnkoczy, A. (2009). Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. In *New manual of seismological observatory practice (NMSOP)* (pp. 1–20). *Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ*. [https://doi.org/10.2312/CFZ.NMSOP\\_R1\\_IS\\_8.1](https://doi.org/10.2312/CFZ.NMSOP_R1_IS_8.1)
- Vakaliuk, T. A., Pilkevych, I., Hordiienko, Y., & Loboda, V. (2023, May). Application of Polarization-Time Model Seismic Signal for Remote Monitoring of Potential Sources Emergencies by Three-Component Seismic Station. In *CMIS* (pp. 52–64). <https://ceur-ws.org/Vol-3392/paper5.pdf>
- Vakaliuk, T. A., Pilkevych, I. A., Hordiienko, Y. O., Loboda, V. V., & Saliy, A. O. (2023). Detection of a seismic signal by a three-component seismic station and determination of the seismic event center. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 175–175. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-4-16>
- Withers, M., Aster, R., Young, C., Beiriger, J., Harris, M., Moore, S., & Trujillo, J. (1998). A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 95–106. <https://doi.org/10.1785/BSSA0880010095>
- Zhao, Y., Niu, F., Zhang, Z., Li, X., Chen, J., & Yang, J. (2021). Signal detection and enhancement for seismic crosscorrelation using the wavelet-domain Kalman filter. *Surveys in Geophysics*, 42, 43–67. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09620-6>

Yurii HORDIENKO<sup>1</sup>, Veronika LOBODA<sup>2\*</sup>, Vasyl MYKLUKHA<sup>3</sup>

Korolov Zhytomyr Military Institute, 22, Prospect Myru, Zhytomyr, 10004, Ukraine, tel. +38(041)2415166, e-mail: <sup>1</sup>ua\_gordienko@ukr.net; <sup>2</sup>veronikaloboda03@gmail.com; <sup>3</sup>vas83mik@gmail.com

#### PRELIMINARY DETECTION OF SEISMIC SIGNAL ARRIVAL BY POLARIZATION FEATURE

Research is aimed at developing methodological principles for preliminary detection of the seismic signal arrival registered by a three-component seismic station (TCSS), taking into account polarization properties of background and signal components. Methods. Seismic signals were recorded using the GURALP CMG seismic observation network of the Main Special Control Center (MSCC) of the State Space Agency (SSA) of Ukraine. Result. The main difference between a signal component of a three-component seismic record and a background is polarization properties. Considering these characteristics makes it possible to detect seismic signals and determine their components. Traditional methods for analyzing polarization in a three-component seismic record

often involve significant computational effort and are typically employed for processing and analyzing seismic data in real time. In this study, we propose a new approach that evaluates the linearity of the implemented methods and determines the angles of seismic wave arrivals. This is particularly crucial for monitoring potential emergency sources, such as hazardous objects and seismically active areas. Our method can also be applied in real-time scenarios. Scientific novelty. Considering the properties of polarization, as opposed to relying solely on amplitude detection criteria, enables the detection of signals with a lower signal-to-noise ratio. This increases the sensitivity of the Transient Coherent Seismic Source (TCSS) to magnitudes. By utilizing polarization analysis in seismic signal detection, we not only enhance detection capabilities but also gain additional information about the parameters of seismic signal components, such as their azimuth and angle of arrival at the surface. This information can be instrumental in identifying the seismic signal components and determining the location of the seismic event source in relation to the observation point (OP). Significance of research. This approach makes it possible to increase the magnitude sensitivity of OP and the observation system as a whole. The relative simplicity of implementation makes it possible to apply it in real time. Determining angular characteristics of seismic wave arrival allows applying the proposed approach in a continuous monitoring loop for potential emergency sources.

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

Надійшла 11.10.2024 р.