

О. І. Бріцький

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Побудова сейсмічних портретів важливих подій за умови недоступності їхнього спостереження

Подано підхід до отримання сейсмічних портретів важливих подій за умови недоступності їхнього спостереження. Сутність запропонованого підходу полягає в тому, що спочатку визначаються сейсмічні портрети важливих подій з доступною боку, використовується принцип рухомого вікна, яке має розмір за часом, відповідний передбачуваному сейсмічному портрету. Вікно дискретно зсувається по осі часу на сейсмограмі з недоступною боку. У кожному положенні вікна обчислюється взаємкореляційна функція процесу у вікні з відомим портретом з доступною боку. Отримані сейсмічні портрети можна використовувати для вирішення завдань локації та ідентифікації важливих сейсмічних подій.

Ключові слова: рух важкої техніки, постріли окремих видів зброї, кореляційна обробка сейсмічних подій, сейсмометри з цифровими лазерними інтерферометрами, сейсмічні портрети неспостережуваних подій.

Постановка проблеми

Події останніх років, що пов'язані з локальними військовими конфліктами, свідчать про актуальність використання сейсмічних методів виявлення руху важкої техніки та її ідентифікації. Важливою задачею є локація пострілів окремих видів зброї і виявлення руху груп людей. Вирішенню цих задач на різних рівнях присвячені роботи [1–6]. Одним із важливих висновків із цих робіт є доцільність використання кореляційних методів аналізу, але при цьому використовувалися огинаючі сейсмічних сигналів і, як наслідок, втрачалася тонка структура сигналів, яка є важливою для вирішення задач ідентифікації. Можливо це було пов'язано з обмеженими можливостями сейсмоприймачів, які у своїй більшості вимірюють швидкість чи прискорення сейсмічних процесів.

Значних успіхів у використанні кореляційного методу аналізу сейсмічних процесів досягла компанія ZETLAB (РФ), яка виробляє відповідне обладнання промисловим способом, але воно вирішує задачу лише локації джерела сейсмічних хвиль, а не його ідентифікації [7].

© О. І. Бріцький

Тому було запропоновано використовувати розроблений в Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України сейсмометр з вимірювальним пристроєм на основі цифрового лазерного інтерферометра [8], який має особливо високі характеристики з точки зору чутливості та розрізнявальної здатності. Перші результати використання такого сейсмометра представлено в роботах [9, 10].

Очевидно, що кореляційний аналіз процесів потребує наявності двох часових залежностей, перша з яких є портретом сейсмічного явища і використовується для його ідентифікації, а друга — самим процесом, на множині значень якого виявляється це явище:

$$R_{x,y}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t + \tau) d\tau, \quad (1)$$

або в дискретному вигляді

$$h_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k y_{j+k}, \quad (2)$$

де x_k та y_k є портретом і досліджуваним процесом відповідно.

У найпростішому випадку спостерігач за наявними засобами зв'язку повідомляє на вимірювальний центр про настання сейсмічних подій (проходження певних зразків важкої військової техніки, залізничних потягів), а на сейсмограмі визначають відповідність між конкретними подіями та їхніми сейсмічними портретами.

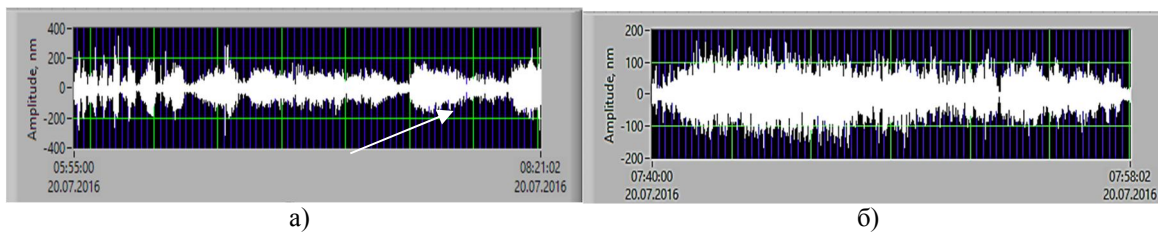


Рис. 1. Сейсмограми руху залізничних потягів: а) вантажного потягу (показано стрілкою та підтверджено спостерігачем); б) розгорнутий сейсмічний портрет

Аналіз проведених експериментальних досліджень свідчить про труднощі з побудовою сейсмічних портретів явищ, недоступних для спостереження. У цьому випадку необхідно аналізувати різні аргументи настання сейсмічних подій та ідентифікувати останні.

Мета роботи

Запропонувати методику визначення сейсмічних портретів подій, які недоступні для зовнішнього спостереження.

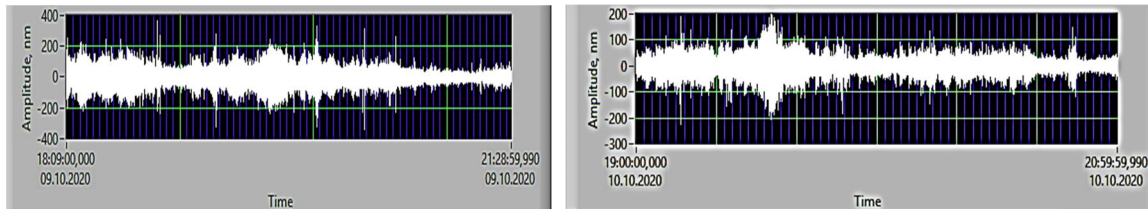
Виклад основних результатів дослідження

Прийmemo наступні обмеження.

1. Маємо хоча би один запис з доступної сторони сейсмічної події (рух залізничного потягу, танка, постріл міномета тощо).

2. Маємо хоча би один запис з недоступної сторони подібної сейсмічної події.

Приклади таких сейсмограм, отриманих 9 і 10 жовтня 2020 року, зображено на рис. 2. Дослідження проводилися на відстані 6 км від залізничної станції Клавдієве-Тарасове в Київській області. При цьому поняття «доступна сторона» і «недоступна сторона» вважалися умовними. Недоступною стороною вважалася відсутність на ній спостерігача.



а)

б)

Рис. 2. Сейсмограми руху залізничних потягів: а) наявність проходження двох подібних пасажирських потягів підтверджена спостерігачем; б) можливе проходження пасажирського потягу по недоступній стороні

На перший погляд, сейсмічні портрети руху пасажирських потягів на рис. 2 знайти практично неможливо. Тому використовуємо наступний підхід. Введемо позначення:

t_{na} — момент початку запису сейсмограми на рис. 2,а;

t_{ka} — момент кінця запису сейсмограми на рис. 2,а;

t_{nb} та t_{kb} — аналогічні моменти для сейсмограми на рис. 2,б.

Із використанням розробленого програмного забезпечення в середовищі Lab-View за виразом (2) виконаємо обчислення взаємкореляційної функції рис. 2,а протягом кожної хвилини з наростанням до t_{ka} із сейсмограмою на рис. 2,б.

Результати обчислень зображені на рис. 3.

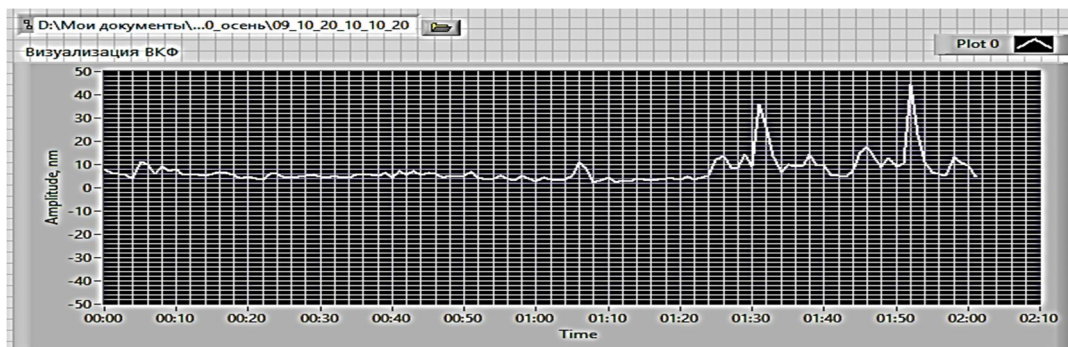


Рис. 3. Результат щохвилинного обчислення взаємкореляційної функції процесу з доступної сторони з процесом з недоступної сторони

Аналізуючи рис. 3, можна зробити висновок, що по недоступній для спостереження стороні відбувся рух потягу, сейсмограма якого добре корелює із сейсмограмою на рис. 2,а через 1 год. 51 хв. після початку запису. Тому можна вважати

цей фрагмент сейсмічним портретом події з недоступної сторони, що зображено на рис. 4.

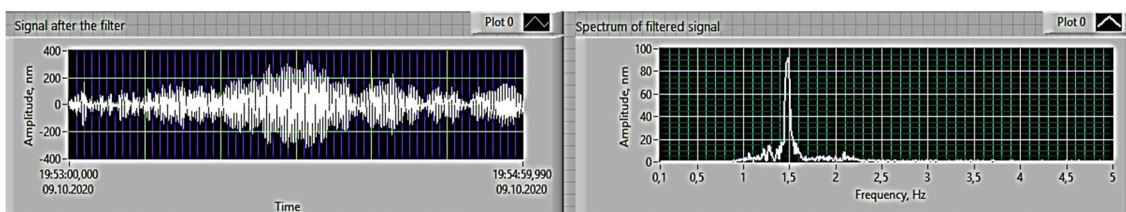


Рис. 4. Приклад сейсмічного портрету події на недоступній стороні

Для перевірки зроблених викладок через 8 дБ був проведений запис сейсмічних подій на недоступній стороні і виявлений рух аналогічного потягу, що показано на рис. 5.

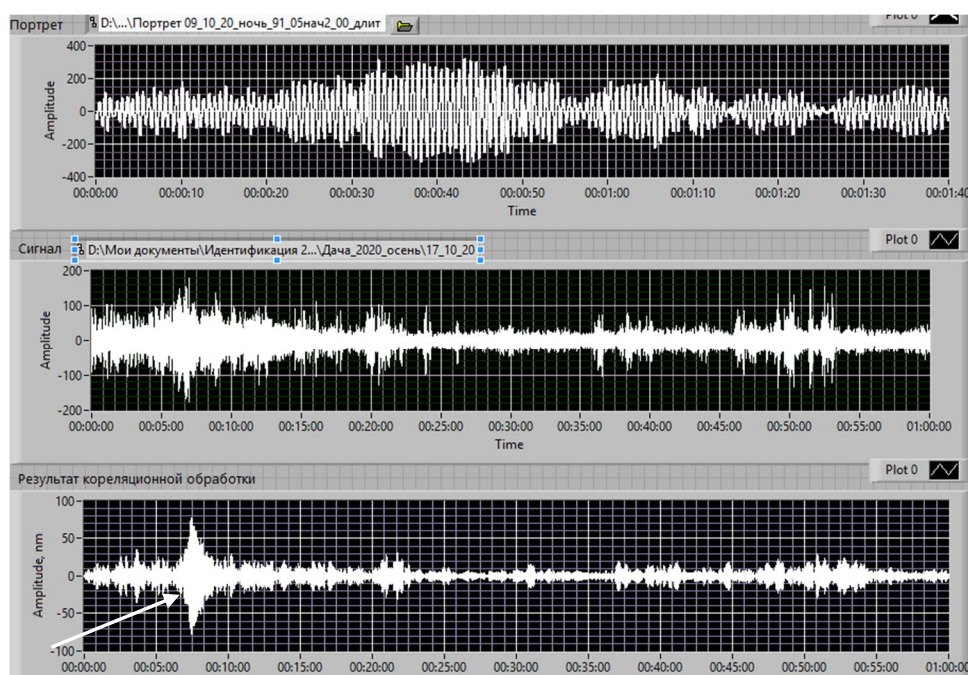


Рис. 5. Виявлення руху потягу по недоступній стороні через 8 дБ (показано стрілкою)

Необхідно відмітити, що дослідження проводилися в низькочастотній області спектра та стосувалися руху важкої техніки, що видно на рис. 4. Важливими є також аналогічні дослідження сейсмограм, які притаманні дії окремих видів зброї, наприклад, артилерійської. З цією метою співробітники інституту прийняли участь у спільних навчаннях Сухопутних військ МО України і Національної гвардії МВС України 25 червня 2019 року на полігоні «Дівички» як дослідники. В навчаннях також приймали участь співробітники Інституту геофізики НАН України імені С.І. Субботіна і співробітники Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка. Бойові стрільби виконували міномети калібру 120 мм і гаубиці Д-30.

На наступних рисунках показані сейсмограми пострілів мінометів на доступній стороні.

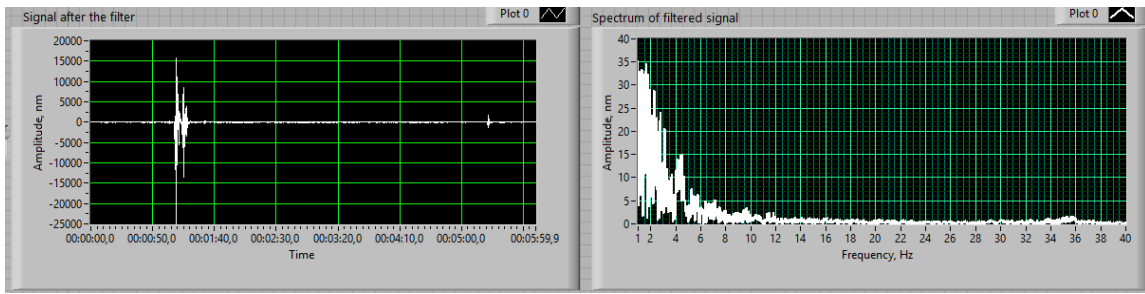


Рис. 6. Сейсмограма пострілів двох мінометів на відстані 1 км від позиції

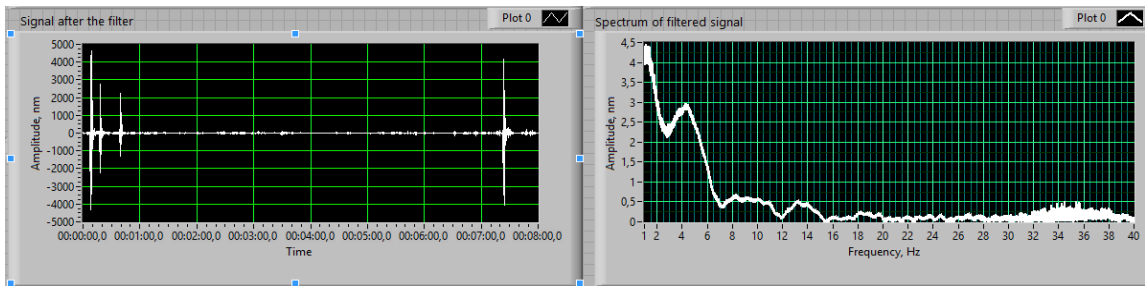


Рис. 7. Сейсмограма пострілів трьох мінометів на відстані 3,5 км від позиції (перший стріляв повторно)

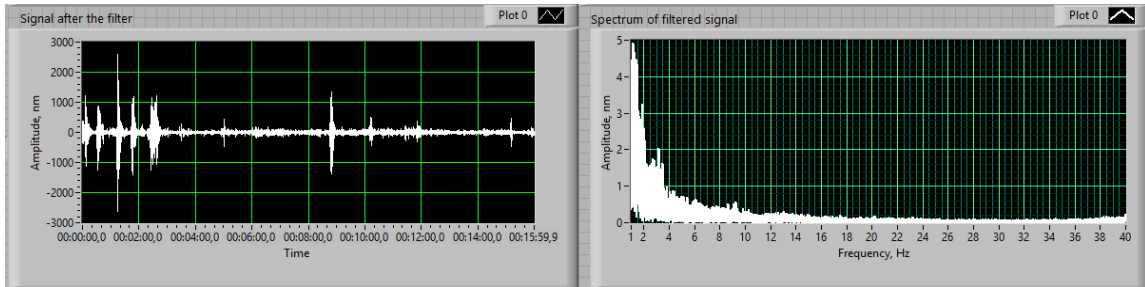


Рис. 8. Сейсмограма пострілів з недоступної сторони на відстані біля 4 км

За аналогією з аналізом руху потягів був отриманий портрет пострілу міномета з недоступної сторони (рис. 9), який у подальшому буде використовуватися для вирішення задач ідентифікації зброї.

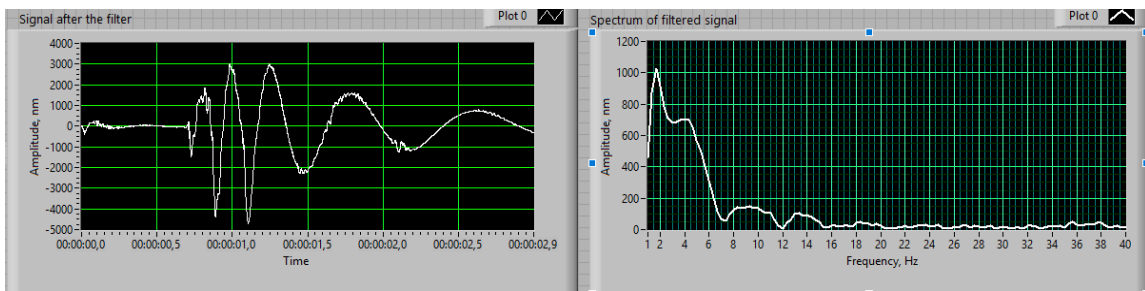
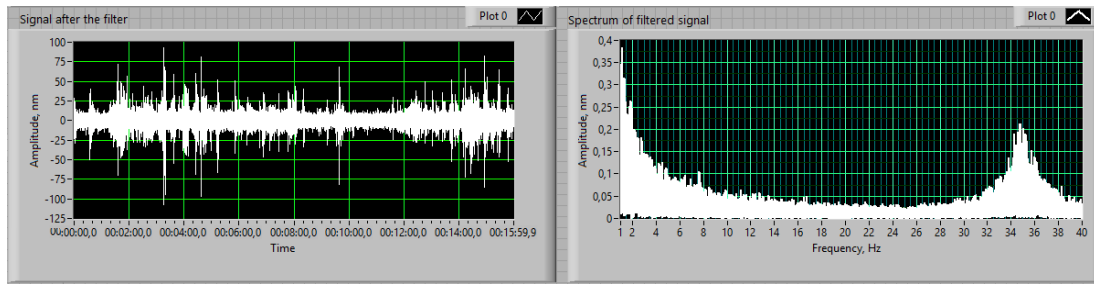
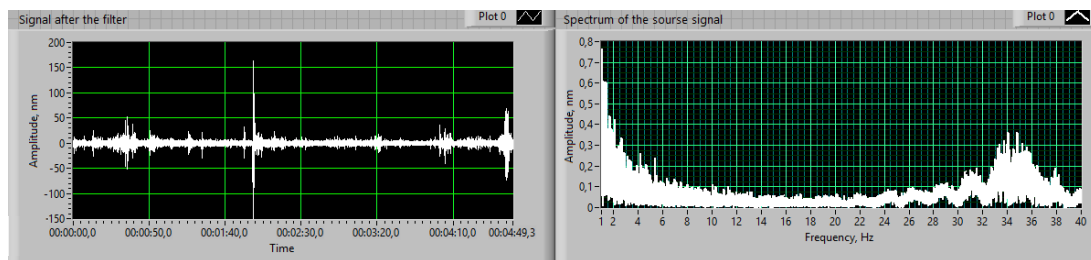


Рис. 9. Сейсмограма пострілу міномета з недоступної сторони

Аналіз експериментальних досліджень засвідчив, що сейсмічні сигнали від пострілів гаубиць знаходяться у смузі більш високих частот, що показано на рис. 10.



а)



б)

Рис. 10. Сейсмограми пострілів гаубиць: а) з доступної сторони; б) з недоступної сторони

На перший погляд виявити сейсмічний портрет пострілу гаубиці за рис. 10 важко, але після використання послідовного кореляційного аналізу з кроком 5 с (приблизний час сейсмічного процесу від пострілу) виявляються моменти пострілу. Вони відповідають максимальним значенням взаємкореляційної функції (рис. 11).

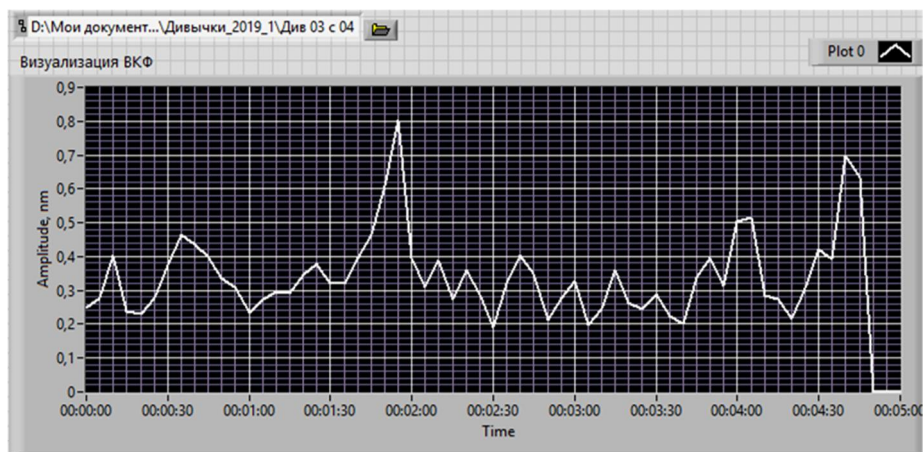


Рис. 11. Результат обчислення взаємкореляційної функції з послідовним змінням 5-секундного інтервалу

Із використанням знайденого сейсмічного портрету був проведений пошук пострілу гаубиці серед пострілів мінометів, що показано на рис. 12

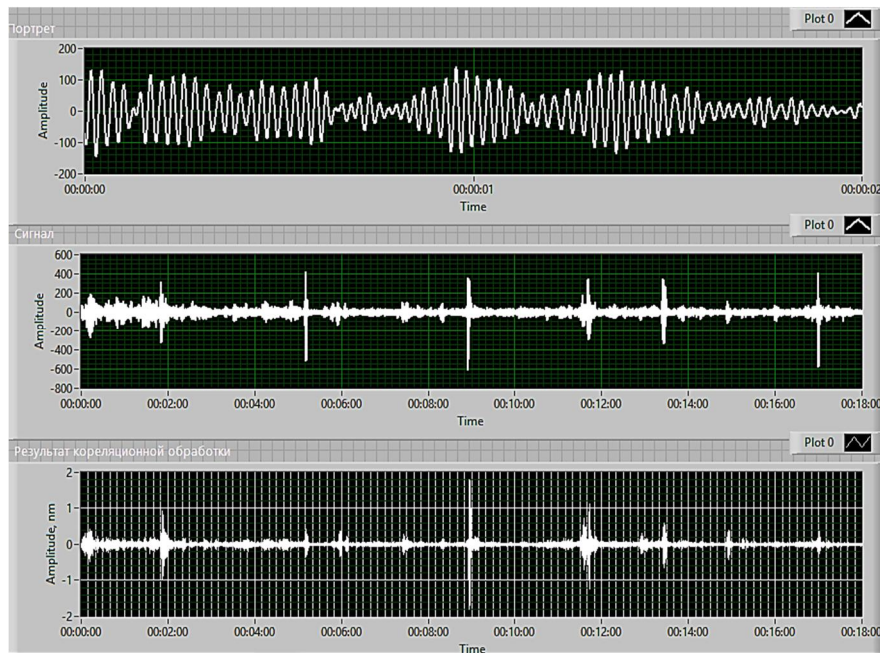


Рис. 12. Постріл гаубиці відбувся в кінці 8-ї хвилини спостереження

Таким чином, можна констатувати, що запропонований підхід до побудови сейсмічних портретів подій на основі експериментальних даних дозволяє виявити необхідні портрети для подальшого використання при вирішенні задач локації та ідентифікації.

Висновки

1. Сутність запропонованої методики побудови сейсмічних портретів важливих подій за умови недоступності їхнього спостереження полягає у використанні рухомого вікна для обчислення взаємокореляційних функцій подібних сейсмічних процесів. При цьому за зразковий використовується процес з доступної сторони, а за досліджуваний — процес з недоступної сторони.

2. Визначені сейсмічні портрети можна використовувати для вирішення задач ідентифікації і локації важливих сейсмічних подій на недоступній стороні.

1. Ghassan I. Aleqabi, Michael E. Wyssession, and Hafidh A.A. Ghalib. Characterization of Seismic Sources from Military Operations in Urban Terrain (MOUT): Examples from Baghdad. *Bulletin of the Seismological Society of America*. February 2015. Vol. 106, No. 1. P. 1–19. doi: 10.1785/0120140187.

2. Сивцевич В.В., Виноградов А.Е. Формирование эталонов в устройстве распознавания движущихся наземных объектов. Докл. БГУИР 2016. № 1 (95) С. 51–56.

3. Кухальский Н.Е., Козека П.И. Особенности корреляционной обработки сейсмических сигналов. Докл. БГУИР. 2011. № 4(58). С. 30–35.

4. Варнавских В.А., Виноградов А.Е., Козека П.И. и др. Матер. III всеросс. научн. конф. ученых, специалистов и профессорско-преподавательского состава «Территориально распределенные системы охраны». Калининград, 2010. С. 58–66.

5. Кухальский Н.Г., Виноградов А.Е. Математическая модель движения человека. Докл. БГУИР. 2008. № 6. С. 25–31.

6. Нікіфоров М.М., Пампуха І.В., Щербина С.В. та ін. Особливості використання автоматизованого сейсмоакустичного комплексу за допомогою комбінованого способу виявлення об'єктів. *Геофізичний журнал*. 2018. Т. 40, № 6. С. 150-158. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151049>.

7. Метод определения ХУ координат слабо шумящего объекта, основанный на применении алгоритма обратных проекций взаимных корреляционных функций сейсмических сигналов. URL: <https://zetlab.com/podderzhka/vibrometriya-i-akustika/kalibrovka-i-prakticheskoe-primenenie-akselerometrov/opredelenie-xu-koordinat-slaboshumyashhego-obekta/> (Дата звернення 06.12.2020).

8. Oleksander I. Britsky, Ivan V. Gorbov, Viacheslav V. Petrov, Iryna V. Balagura. A compact semiconductor digital interferometer and its applications. Proc. SPIE 9506, Optical Sensors-2015. 2015. Vol. 9506. 7 p. doi: 10.1117/12.2178476.

9. Брицький О.І. Спектральні і часові особливості сейсмічних подій під час руху важкої техніки та дії окремих видів зброї. *Регстрація, зберігання і оброб. даних*. 2020. Т. 22. № 1. С. 23–30. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.1.1.207764>.

10. Брицький О.І. Ідентифікація руху важкої техніки та дії окремих видів зброї за їх сейсмічними ознаками. *Регстрація, зберігання і оброб. даних*. 2020. Т. 22. № 2. С. 44–49. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2020.22.2.211254>.

Надійшла до редакції 16.01.2021