

УДК 550.34:621.391:004.93:351.814  
DOI: <https://doi.org/10.17721/3041-2323.2024.380-387>

Анатолій ШЕВЧЕНКО, бригадний генерал  
ORCID ID: 0000-0003-2723-0378  
e-mail: shevchenko@gmail.com  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Сергій ТОЛЮПА, д-р техн. наук, проф.  
ORCID ID: 000-0002-1919-9174  
e-mail: serhii.toliupa@knu.ua  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## СЕЙСМОАКУСТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

*Нині в нашій країні, з огляду на воєнний стан, необхідно постійно проводити моніторинг об'єктів критичної інфраструктури щодо можливості їхнього використання після впливу боєприпасів різної потужності, чим займається дуже велика кількість державних і приватних організацій, які виробляють найрізноманітнішу продукцію. Це пов'язано зі зростаючою потребою в захисті від недобросовісних конкурентів, терористів, а у випадку України особливо в захисті від диверсійних атак і постійних обстрілів. Уперше запропоновано метод моніторингу об'єктів критичної інфраструктури на основі сейсмоакустичного аналізу, суть якого полягає у відображенні досліджуваного об'єкта у вектор інформативних параметрів (під терміном "інформативні параметри" розуміють фізичні параметри об'єкта, які характеризують його стан, а динаміку цих параметрів викликано змінами стану зазначеного об'єкта), динаміка яких характеризує динаміку стану досліджуваного об'єкта.*

**Ключові слова:** моніторинг, ударна хвиля, вейвлет-перетворення, сейсмічні сигнали, сейсмоакустичний моніторинг, вейвлет-аналіз.

### Вступ

Загальноприйнято, що сучасний аналіз вейвлет-перетворення зародився на початку 1980-х рр. Він почався з вейвлет-перетворення Морле (Morlet), запропонованого для полегшення виявлення

© Шевченко Анатолій, Толюпа Сергій, 2024

ня сейсмічних сигналів (Goupillaud, Grossmann, & Morlet, 1984). З огляду на це можна вважати, що сейсмологія є місцем народження сучасного вейвлет-перетворення. Відтоді у різних галузях геофізики для виявлення сигналів запропоновано та використано безліч різних вейвлет-перетворень. Фактично існує велика кількість доступних методів для вимірювання властивостей підповерхневого середовища, включаючи геофізичні методи. Це сейсмологія, сейсмоакустичний аналіз, гравіметрія, магнітні методи, електричні методи, радіоактивні методи та геофізичні дослідження при зостосуванні сейсмоакустичного моніторингу, зокрема і впливу ударної хвилі на об'єкти критичної інфраструктури.

### **Результати**

Роль вейвлет-аналізу обговорювалася в огляді розробок з оброблення сейсмічних даних, де запропоновано використовувати ортонормоване дискретне вейвлет-перетворення як інструмент, що характеризує сейсмічні часові ряди. У статті (Daubechies, 1992) автори аналізували сейсмічні сигнали. Для фільтрації сейсмічних сигналів вони використовували специфічне Добеші (D20) вейвлет-перетворення (Chan, & Shen, 2005), розглядаючи прості ілюстративні приклади вейвлет-аналізу (Fedorenko, & Husebye, 1999) з метою придушення небажаних поверхневих хвиль, які наявні у записах. У дослідженні (Li, 1996) представлено метод, який включає специфічне Добеші вейвлет-перетворення, як перетворення для автоматичного визначення часу вступу  $P$  і  $S$  хвиль у сейсмічних записах. У роботі (Li, 1999) використано синтезовану методіку, засновану на вейвлет-аналізі для моделювання, фрактального акустичного каротажу. Автори порівняли отримані результати з класичним методом найменших квадратів, який застосовують до моделювання такого типу даних, і дійшли висновку, що методіка, що використовує вейвлет-перетворення, значно скорочує артефакт, пов'язаний з класичною методикою сейсмоакустичного аналізу. У пізнішій роботі (Kalcic, Lambert, & Martinez, 1999) автори використовували моделі вейвлет-перетворення фрактальних процесів для моделювання й аналізу процесів з урахуванням геологічних і фізичних особливостей об'єкта. Для аналізу акустичних образів сейсмічних даних, отриманих на поверхні землі, автори використовували вейвлет-аналіз. Досліджуючи коефіцієнти вейвлет-

перетворення сигналів із різними вагами, автори змогли виявити, як впливає ударна хвиля різної потужності на об'єкти різного типу.

У статті (Bergeron et al., 1999) автори запропонували метод вейвлет-аналізу підповерхневого середовища для дослідження підземних неприродних об'єктів. Вчені рекомендували використання цієї методології для виділення корисного сигналу з акустичних даних розвідки на малій глибині. Для тривимірної сейсмічної топографічної моделі в (Wavelet Explorer Documentation, n. d.) автори застосували тривимірне вейвлет-перетворення, використавши як базові функції імпульс Рікера, відомий як мексиканський капелюх (Mexican hat). У роботі (Nagano, & Niitsuma, 2000) автори використовували максимальні енергії вейвлет-перетворення і розглянули номери базисних вейвлет-функцій як довірчу кількість сейсмічних швидкісних аномалій, що спостерігаються, і виявили, що розподіл кількості вейвлет-функцій дає інформацію, яка не очевидна для прямої візуальної експертизи сейсмічних і сейсмоакустичних нечітких об'єктів. Автори (Goupillaud, Grossmann, & Morlet, 1984), використовуючи вейвлет-перетворення Морле, запропонували метод вимірювання дисперсії хвиль у підповерхневих середовищах. Ці вейвлет-перетворення виділяли сейсмічні хвилі, які поширювалися в приповерхневому середовищі землі, і було помічено, що їхні параметри (напр., дисперсія швидкості, частоти) та розподіл амплітуд значно залежать від геометрії та фізичних властивостей стану досліджуваного об'єкта.

Для дослідження сейсмічних даних автори (Li, 1996) порівняли коротке перетворення Фур'є і безперервне вейвлет-перетворення Морле. Якщо порівняти ці види перетворень синтетичної сейсмограми, можна побачити, що розкладання при порівняльному пошуку найвдаліше у площині частота-час. Автори досліджували відображену сейсмограму сейсмічної хвилі для ідентифікування покладів долериту. Авторами ідентифіковано чотири різні форми у відповідній площині частота-час. Перший тип еліптичної форми, подовжений у напрямку частоти, представляє події, які локалізовані в часі, але містять велику кількість частот. Вони пов'язані з відбитками. Інший тип, подовжений за часом, але вузький за частотою, ідентифікований як поверхневі хвилі низької частоти. Третій – циклічний тип, що представляє події, які мають

лише одну або дві частоти, на частотно-часовій осі в короткому проміжку часу. Четвертий тип – довга смуга у напрямку вздовж осі часу. Вона представляє окрему частоту шуму, рівну 60 Гц, яка є досить тривалою. Усі відображені події можуть бути ідентифіковані у площині частота-час як еліптичні сплески в короткому проміжку часу та довшому частотному діапазоні. Циклічні сплески викликано випадковим шумом, який присутній у спостережених даних, і вертикальні піки виникають через короткогенерований шум. У роботі (Li, 1999) автор досліджував оброблення сейсмічних даних за методом Габора в порівняльному пошуку елементарних осередків структур даних; в результаті виявлено ознаки фаз, які могли бути пов'язані з типами фацій у системі дельта.

Запропонований вище аналіз застосування методів вейвлет-перетворення для дослідження сейсмологічної інформації дозволяє стверджувати, що це перетворення дає змогу представити геофізичну інформацію у вигляді безлічі параметрів (амплітуди вейвлет-функцій, їхні масштабні множники та параметри походження), які мають фізично змістовний зміст. Із цієї множини можна виділити підмножину найінформативніших параметрів для характеристики стану об'єкта сейсмомоніторингу. Процес зміни стану об'єкта відображається у тимчасові зміни цієї підмножини параметрів. Зазначена обставина стала підставою для використання вейвлет-функцій у деяких випадках як альтернативу раніше розглянутим моделям осциляторів. Динаміка об'єкта дослідження відображається в міграцію точки у скінченному просторі параметрів, вибраних як інформативні.

Модель охоплює  $K$  підмоделей і є суперпозицією імпульсів, кожен з яких задано формулою

$$\min_{\substack{\mathbf{h} \in H \\ \mathbf{a} \in A}} \left[ (y(t, x) - M(\mathbf{h}, \mathbf{a}, t, x), y - M(\mathbf{h}, \mathbf{a}, t, x)) \right], \quad (1)$$

і представлений у моделі вектором фізично змістовних вільних параметрів сполученого імпульсу Берлаге, кожен імпульс повністю визначається вектором-рядком

$$\mathbf{P}_{\langle k \rangle} = \{A_k, \tau_k, \alpha_k, \omega_k, \beta_k\}. \quad (2)$$

А модель набуває вигляду

$$M(t, \mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K A_k \eta(t - \tau_k) (t - \tau_k)^{\beta_k} \exp\{-\alpha_k(t - \tau_k)\} \sin[\omega_k(t - \tau_k)] + n(t). \quad (3)$$

У формулі (3) введено матрицю вільних параметрів моделі. Вектор-рядок цієї матриці повністю визначає підмодель, а вектор-стовпець якої визначає споріднені параметри підмоделей – адитивна перешкода. У (3) таких споріднених параметрів п'ять:

$$\mathbf{P} = \{P_{k,s}\}, \quad k = \overline{1, K}, \quad s = \overline{1, 5}. \quad (4)$$

Отже, прямокутна матриця вільних параметрів моделі розмірністю визначає модель (3).

Якщо з'єднати споріднені вектори у матрицю, то

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{P}^{(1)}, \mathbf{P}^{(2)}, \mathbf{P}^{(3)}, \mathbf{P}^{(4)}, \mathbf{P}^{(5)}\}. \quad (5)$$

У формулі (5) об'єднано вектори вигляду

$$\mathbf{P}^{(1)} = \mathbf{A} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_k \\ \vdots \\ A_K \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{P}^{(2)} = \boldsymbol{\tau} = \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_k \\ \vdots \\ \tau_K \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{P}^{(3)} = \boldsymbol{\alpha} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_k \\ \vdots \\ \alpha_K \end{Bmatrix};$$

$$\mathbf{P}^{(4)} = \boldsymbol{\omega} = \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_k \\ \vdots \\ \omega_K \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{P}^{(5)} = \boldsymbol{\beta} = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \\ \vdots \\ \beta_K \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Модель оптимізації динамічних параметрів моніторингу об'єктів критичної інфраструктури на основі сейсмоакустичного аналізу у термінах матриці вільних параметрів набуває вигляду

$$M(t, \mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K \mathbf{P}_k^{(1)} \eta(t - \mathbf{P}_k^{(2)}) (t - \mathbf{P}_k^{(2)})^{\mathbf{P}_k^{(5)}} \times$$

$$\times \exp\{-\mathbf{P}_k^{(3)}(t - \mathbf{P}_k^{(2)})\} \sin[\mathbf{P}_k^{(4)}(t - \mathbf{P}_k^{(2)})]. \quad (7)$$

Тут вектори  $A, \tau, \alpha, \omega, \beta$  – вектор-стовпці, що складаються з  $K$  рядків,  $K$  – кількість підмоделей. Матриця  $P$  формується як

поєднання векторів (2)–(6),  $P_{k,s} = P_k^{(s)}$ . У наведеній моделі  $s = \overline{1, S}$ ;  $S = 5$ .

Формула (3) – це нова модель дискретного вейвлет-переретворення, яке широко використовують у задачах моніторингу сейсмологічними методами.

#### **Дискусія і висновки**

Отримано оптимальну оцінку параметрів моделі для даних, що спостерігаються. Наступним кроком в обробленні даних буде синтез за параметрами моделі модельного сигналу та оцінювання розбіжності моделі з даними спостереження для обраного критерію. Можна зробити висновок, що математична модель апроксимує дані спостереження вибухового сигналу з великим ступенем достовірності, що дає можливість відобразити ОКІ у векторний простір вільних параметрів моделі.

#### **Список використаних джерел**

- Bergeron, S. Y., Vincent, A. P., Yuen, D. A., Tranchant, V. J., & Tchong, Z. (1999). Viewing seismic velocity anomalies with 3D continuous Gaussian wavelets. *Geophysical Research Letters*, 25(15), 2311–2314.
- Chan, T. F., & Shen, J. (2005). *Image processing and analysis - variational, PDE, wavelet, and stochastic methods*. Society of Applied Mathematics.
- Daubechies, I. (1992). Ten lectures on wavelets. *CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics*. Philadelphia: SIAM.
- Fedorenko, Y. V., & Husebye, E. S. (1999). First breaks – automatic phase of pickings P- and S-onsets in seismic records. *Geophysical Research Letters*, 26(21), 3249–3252.
- Goupillaud, P., Grossmann, A., & Morlet, J. (1984). Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis. *Geoexploration*, 23, 85–102.
- Kalcic, M. T., Lambert, D. N., & Martinez, A. (1999). Time-frequency analysis of shallow seismic imagery. *Sea Technology*, 40(8), Ch. 7, 55–60.
- Li, X. P. (1996). Comparison of Fourier and wavelet power spectral analysis of heterogeneities. *EAGE 58th Conference and Technical Exhibition* (171 p.), Amsterdam, The Netherlands, June 3–7.
- Li, X. P. (1999). On-line discovery of breakage from small diameter clicks using the current signature wavelet transform. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 157–164.
- Nagano, K., & Niitsuma, H. (2000). *Discrepancy in the analysis of crack-waves in arterial subsurface fracture using two crack models*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(1), 3–11.
- Wavelet Explorer Documentation*. (n. d.). <http://documents.wolfram.com/applications/wavelet/FundamentalsofWavelets/1.4.5.html>

### References

- Bergeron, S. Y., Vincent, A. P., Yuen, D. A., Tranchant, V. J., & Tchong, Z. (1999). Viewing seismic velocity anomalies with 3D continuous Gaussian wavelets. *Geophysical Research Letters*, 25(15), 2311–2314.
- Chan, T. F., & Shen, J. (2005). *Image processing and analysis - variational, PDE, wavelet, and stochastic methods*. Society of Applied Mathematics.
- Daubechies, I. (1992). Ten lectures on wavelets. *CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics*. Philadelphia: SIAM.
- Fedorenko, Y. V., & Husebye, E. S. (1999). First breaks – automatic phase of pickings P- and S-onsets in seismic records. *Geophysical Research Letters*, 26(21), 3249–3252.
- Goupillaud, P., Grossmann, A., & Morlet, J. (1984). Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis. *Geoexploration*, 23, 85–102.
- Kalacic, M. T., Lambert, D. N., & Martinez, A. (1999). Time-frequency analysis of shallow seismic imagery. *Sea Technology*, 40(8), Ch. 7, 55–60.
- Li, X. P. (1996). Comparison of Fourier and wavelet power spectral analysis of heterogeneities. *EAGE 58th Conference and Technical Exhibition* (171 p.), Amsterdam, The Netherlands, June 3–7.
- Li, X. P. (1999). On-line discovery of breakage from small diameter clicks using the current signature wavelet transform. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 157–164.
- Nagano, K., & Niitsuma, H. (2000). *Discrepancy in the analysis of crack-waves in arterial subsurface fracture using two crack models*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(1), 3–11.
- Wavelet Explorer Documentation*. (n. d.). <http://documents.wolfram.com/applications/wavelet/FundamentalsOfWavelets/1.4.5.html>

**Отримано редакцією журналу / Received: 17.09.24**

**Прорецензовано / Revised: 27.09.24**

**Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24**

**ORCID ID: 0000-0003-2723-0378**

**e-mail: shevchenko@gmail.com**

**Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine**

**Serhii TOLIUPA, DSc (Engin.), Prof.**

**ORCID ID: 000-0002-1919-9174**

**e-mail: serhii.toliupa@knu.ua**

**Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine**

## **SEISMOACOUSTICAL MONITORING OF CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS BASED ON DISCRETE WAVELET ANALYSIS**

*Today, in our country, given the martial law situation, it is necessary to constantly monitor critical infrastructure facilities for the possibility of their*

*use after the impact of ammunition of various capacities, which is done by a very large number of public and private organizations that produce a wide variety of products. This is due to the growing need for protection from unscrupulous competitors, terrorists, and, in the case of Ukraine, especially protection from sabotage attacks and constant shelling. The paper first proposes a method for monitoring critical infrastructure facilities based on seismic and acoustic analysis, the essence of which is to map the object under study into a vector of informative parameters (the term "informative parameters" refers to the physical parameters of the object that characterize its state, and the dynamics of these parameters is caused by changes in the state of this object), the dynamics of which characterizes the dynamics of the state of the object under study.*

**Keywords:** *monitoring, shock wave, wavelet transform, seismic signals, seismoacoustic monitoring, wavelet analysis.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.