

Ярмолай Ігор Олександрович

Військовий інститут КНУ імені Тараса Шевченка, м. Київ

ORCID 0009-0001-7013-5790

МЕТОДИКА МОНІТОРИНГУ ВИБУХОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ ВЕДЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ НА ОСНОВІ СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. Сейсмоакустичний моніторинг вибухових полів є ключовим інструментом для ведення дистанційної розвідки, що базується на множині режимних спостережень у специфічних (інфразвуковому та акустичному) частотних діапазонах. Режими моніторингу та спектральні параметри об'єктів залежать від унікальних характеристик цілей дослідження. Підвищення достовірності класифікації вибухових сигналів досягається шляхом інтеграції інформаційних технологій у процес моніторингу. Метою роботи є розробка та обґрунтування вдосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу, яка забезпечує високу достовірність класифікації вибухових сигналів. Ключова ідея методики полягає в переході від складних часових сигналів до їхнього представлення у векторному просторі інформативних параметрів. Процес моніторингу зводиться до оцінки цих параметрів параметричних математичних моделей роздільних та нероздільних сигналів вибухового поля, суперпозиція яких формує саме вибухове поле. Множина цих параметрів формує вектор у n -вимірному Евклідовому просторі, що однозначно характеризує сигнал. Таким чином, класифікація сигналів зводиться до класифікації цих векторів.

Для досягнення мети розроблено параметричну математичну модель нероздільного сигналу, що враховує передавальну функцію середовища, параметри завад та природного шумового фону. Запропоновано оптимізовані процедури обробки спостережених даних, які базуються на апіорних статистиках випадкового процесу перешкод та враховують нестабільність параметрів, що дозволяє максимально послабити вплив завад. Також сформульовано та апробовано підхід, за якого класифікація вибухових сигналів (з метою визначення типу джерела вибуху) виконується шляхом класифікації відповідних векторів у n -вимірному Евклідовому просторі. Результати роботи можуть бути використані для визначення місця розташування та типу ворожої зброї у системах дистанційної розвідки.

Ключові слова: сейсмоакустичний аналіз, параметрична сейсмоакустичний сигнал, вибухові поля, сейсмоакустичний моніторинг, математична модель, методика моніторингу вибухових полів.

Igor Yarmolai

Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv

ORCID 0009-0001-7013-5790

METHODOLOGY OF EXPLOSIVE FIELD MONITORING FOR REMOTE RECONNAISSANCE BASED ON SEISMOACOUSTIC ANALYSIS

Abstract. Seismoacoustic monitoring of explosive fields is a key tool for remote exploration based on multiple regime observations in specific (infrasound and acoustic) frequency ranges. Monitoring modes and spectral parameters of objects depend on the unique characteristics of the research targets. The reliability of explosive signal classification is improved by integrating information technologies into the monitoring process. The aim of the work is to develop and justify an improved method of seismoacoustic monitoring that ensures high reliability of explosive signal classification. The key idea of the method is to transition from complex time signals to their representation in the vector space of informative parameters. The monitoring process boils down to evaluating these parameters of parametric mathematical models of separate and non-separate signals of the explosion field, the superposition of which forms the explosion field itself. The set of these parameters forms a vector in n -dimensional Euclidean space, which uniquely characterizes the signal. Thus, signal classification boils down to the classification of these vectors.

To achieve this goal, a parametric mathematical model of an indivisible signal has been developed that takes into account the transfer function of the medium, interference parameters, and natural noise background. Optimized procedures for processing observed data have been proposed, which are based on a priori statistics of the random interference process and take into account the instability of parameters, which allows the influence of interference to be minimized. An approach has also been formulated and tested, in which the classification of explosive signals (to determine the type of explosion source) is performed by classifying the corresponding vectors in n -dimensional Euclidean space. The results of the work can be used to determine the location and type of enemy weapons in remote reconnaissance systems.

Keywords: seismoacoustic monitoring, parametric mathematical model, seismoacoustic analysis, explosive fields, seismoacoustic signal, explosive fields monitoring methodology.

© Ярмолай І.О.

2025

1. Вступ.

Сейсмоакустичний моніторинг оперує у визначених частотних діапазонах, включаючи інфразвуковий та акустичний. Оскільки об'єкти дослідження мають різну природу, геометричні розміри, фізичний склад і динаміку процесів, режими моніторингу завжди унікальні та залежать від індивідуальних характеристик об'єкта і поставлених цілей.

Для дистанційної розвідки вибухових полів сейсмоакустичний моніторинг реалізується через режимні спостереження - серію систематичних вимірювань. Спектральні параметри об'єкта та сам режим спостережень визначаються конкретними завданнями розвідки. Підвищення достовірності класифікації вибухових сигналів досягається шляхом інтеграції інформаційних технологій у процес дистанційної розвідки. Термін «режимні спостереження» передбачає суворо визначений порядок дій.

Для ефективного моніторингу необхідно спершу розробити математичну модель нероздільного сигналу вибухового поля. Ця модель повинна відображати ключові аспекти процесу моніторингу, враховуючи не лише параметри самого вибухового процесу, але й характеристики перешкод, природного шумового фону та передавальну функцію середовища розповсюдження сигналу.

Для успішного моніторингу критично важливим є накопичення статистичних даних про різні вибухові сигнали та передавальні функції середовищ. Це дозволяє сформулювати апіорне (попереднє) уявлення про вибухове поле в точках вимірювання і про самі сигнали. Апіорне знання про випадковий процес завад значно зменшує їх вплив на оцінку вибухового сигналу, що досліджується. Це ослаблення отримується завдяки оптимізації процесу обробки, який враховує цю апіорну статистику. Також враховується у процесі обробки вплив нестабільності параметрів дослідження та здійснюється оптимізація за критеріями, які враховують характеристики завад природного фону.

Таким чином процес моніторингу сейсмоакустичних вибухових полів, по суті, зводиться до визначення та оцінки інформативних параметрів параметричних математичних моделей як нероздільних, так і роздільних сигналів, суперпозиція яких утворює сейсмоакустичне вибухове поле. Сукупність отриманих інформативних параметрів кожного сигналу створює вектор параметрів в n -вимірному просторі Евкліда. Тобто відповідний сигнал однозначно характеризує кожен такий вектор. Таким чином, класифікація нероздільних і вирішених сейсмоакустичних вибухових сигналів зводиться до класифікації отриманих векторів в n -вимірному просторі.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Сьогодні питання, пов'язані з сейсмічним акустичним моніторингом і впливом ударних хвиль на об'єкти, описані в роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників, а саме: Мостовий В.С., Вижва С.А., Щербіна С.В., Кендзера О.В., Габріель Альберт (французький вчений, який вивчав ударні хвилі та працював над їх математичним описом), Гайзім Вальцман (Гаррі Дж. Вальцман - американський фізик, що спеціалізується на фізиці ударних хвиль і вибухових явищ), Джон Соломон (Джон Соломон - вчений, що працює в галузі фізики ударних хвиль і механіки матеріалів), Кевін Трускотт (Кевін М. Трускотт - інженер і вчений, який вивчає взаємодію ударних хвиль з конструкціями), Леонардо Бассані (Леонардо Бассані - італійський вчений, який вивчав фізику вибухів і ударних хвиль), Джеймс Р. Мелвілл (Джеймс Р. Мелвілл - фізик, що спеціалізується на вивченні ударних явищ і механіки матеріалів).

3. Мета і задачі дослідження.

Розробити та обґрунтувати вдосконалену методику сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки, що забезпечить підвищення достовірності класифікації вибухових сигналів шляхом відображення їхніх інформативних параметрів у векторний простір для подальшої класифікації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Створити параметричну математичну модель нероздільного сигналу вибухового поля, яка б відображала суттєві фізичні аспекти процесу моніторингу, враховуючи при цьому передавальну функцію середовища та параметри природного шумового фону.

2. Розробити процедуру оцінки інформативних параметрів цієї моделі для роздільних та нероздільних вибухових сигналів.

3. Побудувати математичну модель нероздільного сигналу вибухового поля, в якій відображала б найбільш суттєві моменти процесу моніторингу сигналів вибухових полів.

4. Розробити оптимізовані процедури обробки спостережених даних, які враховують апіорні статистики випадкового процесу перешкод та нестабільність параметрів процесу, з метою максимального послаблення їхнього впливу.

5. Сформулювати та апробувати підхід, за якого класифікація вибухових сигналів (для визначення типу джерела) зводиться до класифікації відповідних векторів в n -вимірному Евклідовому просторі.

6. Запропонувати методику моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу..

4. Математична модель нероздільних сигналів, як удосконалення математичної моделі роздільних сигналів вибухових полів для ведення дистанційної розвідки.

В якості моделі роздільного сигналу вибухового поля вибираємо суперпозицію рішень диференціального рівняння другого порядку, яка описує суперпозицію осциляторів, які вступили в різні моменти часу, що мають свої амплітуди та власні частоти:

$$M(t, \lambda) = \sum_{i=0}^I \Phi(t - \lambda_{0+4i}) \lambda_{1+4i} \left[e^{-\lambda_{2+4i}(t - \lambda_{0+4i})} \sin[\lambda_{3+4i}(t - \lambda_{0+4i})] \right]; \lambda = \lambda_{p+4i} \quad i=\overline{0, I}; p=\overline{0, 4}, \quad (1)$$

де λ – вектор вільних параметрів моделі; I – кількість підмоделей, які входять до суперпозиції; p – номер відповідної підмоделі; $\Phi(t)$ – функція Гевісайда [1], i – порядковий номер підмоделі, λ_{0+4i} – час вступу сигналу, λ_{1+4i} – амплітуда сигналу, λ_{2+4i} – коефіцієнт затухання сигналу, λ_{3+4i} – частота сигналу.

Оптимальна оцінка інформативних параметрів сейсмоакустичного сигналу досягається шляхом отримання вектора вільних параметрів (невдомих змінних моделі), який мінімізує визначення критерію узгодженості між фактичними даними спостережень та математичною моделлю.

Такий підхід забезпечує високий ступінь згоди між моделлю та реальними даними, особливо при моделюванні лінійних систем осцилюючих об'єктів. Завдяки цій властивості модель ефективно враховує осцилюючий (коливальний) характер вибухових сигналів, що є ключовим для їх точного аналізу.

В якості критерія згоди візьмемо величину норми L_2 (інтеграл квадрата ухилення моделі від даних $y(t)$, що спостерігаються) або L_1 (інтеграл модуля відхилення моделі від даних, що спостерігаються $y(t)$). У першому випадку критерій набуває $F(\lambda)$ вигляду: $F(\lambda) = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)]^2 dt$. В другому випадку: $F(\lambda) = \int_T |y(t) - M(t, \lambda)| dt$.

Оптимальна оцінка вільних параметрів λ^* – це точка в просторі параметрів, яка мінімізує $F(\lambda)$:

$$F(\lambda^*) = \min_{\lambda \in \Lambda} F(\lambda) \quad (2)$$

де $y(t)$ – аналітична апроксимація вектор функції значень спостережених даних. Λ – множина всіх можливих значень вектору λ . Щоб знайти мінімум критерію (2), нам необхідно обчислити часові похідні $\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$ і, прирівнявши їх до нуля, створити систему рівнянь, яка має вигляд:

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \lambda_k} = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)] \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_k} dt = 0 \quad k = \overline{0, K}$$

Система приводиться:

$$\int_T [y(t) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt = \int_T [M(t, \lambda) \cdot \mathbf{D}(M(t, \lambda))] dt$$

де $\mathbf{D}(M(t, \lambda))$ – вектор, складений з функцій, кожна з яких – це похідна моделі за всіма відповідними компонентами вектора λ .

Для моделі (1) цей вектор має вигляд:

$$\mathbf{D}(M(t, \lambda)) = \left\{ \frac{\partial M(t, \lambda)}{\partial \lambda_{p+i}} \right\}; \quad p = \overline{0, 3}; \quad i = \overline{0, I}. \quad (3)$$

Актуальність варіаційного підходу у вирішенні завдань сейсмоакустичного моніторингу можна простежити у роботі [2].

Пошук мінімуму критерію (2) здійснюється за алгоритмом Лівенберга-Маркварда [3], для апріорі випадковим чином обраної точки у просторі вільних параметрів моделі (1)

Коректність рішення моделі (1) розглянуто в роботі [4].

Моделі (1) може бути узагальнена на випадок потоку нероздільних сигналів, тобто коли носії сигналів перетинаються. Тоді модель потоку нероздільних сигналів приймає вигляд:

$$M(t, \lambda) = \sum_{s=1}^S \sum_{i=0}^I \Phi(t - \lambda_{0+i,s}) \lambda_{1+i,s} \left[e^{-\lambda_{2+i,s}(t - \lambda_{0+i,s})} \sin[\lambda_{3+i,s}(t - \lambda_{0+i,s})] \right], \quad (4)$$

де S - кількість сигналів, що перетинаються в групі, λ - матриця вільних параметрів моделі; I - кількість пілмолелей, які входять до суперпозиції; p - номер відповідної підмоделі; $\Phi(t)$ - функція Гевісайда, i - порядковий номер підмоделі, $\lambda_{0+4i,s}$ - час вступу S -го сигналу, $\lambda_{1+4i,s}$ - амплітуда S -го сигналу, $\lambda_{2+4i,s}$ - коефіцієнт затухання S -го сигналу, $\lambda_{3+4i,s}$ - частота S -го сигналу.

Тобто модель (3.19) складається з S окремих роздільних сигналів. У загальному випадку S - випадкова величина. У матриці вільних параметрів моделі $\Lambda = \lambda_{k,s}$; $k = \overline{0, K}$; $s = \overline{1, S}$; $K = 4I$; стовпчик з номером s є вектором параметрів s -го сигналу. У цьому векторі параметрів $\bmod k, 4$ - це номер $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$, або λ_3 параметра відповідної згасаючої (або зростаючої) гармоніки. Ця гармоніка має номер $\bmod k, 4$. Ми приймаємо таку символіку: $\bmod k, 4$ - це залишок від розподілу числа k на 4, а $\text{ant } k, 4$ - це ціла частина від ділення k на 4.

Розглянутий вище приклад моделі (1) можна вважати окремим випадком більш загальної моделі (4), у випадку коли $\lambda_{0+i,s}$ не залежить від i .

Оптимальна оцінка матриці вільних інформативних параметрів математичної моделі (4) Λ , визначається значенням вільних параметрів, де значення критерію (2) є мінімальним, на множині локальних мінімумів цього критерію. Отримання оптимальної оцінки процедури полягає в тому, що для існуючої множини з M матриць Λ визначаються точки локальних екстремумів, найближчі до кожної з них, і далі на множині локальних мінімумів вибирається глобальний.

Точка, яка дає цей мінімум критерію у $(K+1) \cdot S$ мірному просторі вибирається як оптимальна для вільних параметрів сигналу моделі. У такій процедурі забезпечена збіжність до оптимального рішення за ймовірністю зі зростанням кількості M . У цьому випадку можна вважати, що ми отримали в результаті рішення суперпозицію M роздільних сигналів (1), що почалися в різний час.

5. Методика моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу.

Для проведення сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки (ВПВДР) представлено удосконалену методику сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР. Сутність удосконалення методики полягає у відображенні сигналів вибухових полів у векторний простір інформативних параметрів математичної моделі сигналу вибухового поля з метою їх класифікації, які генеруються вибуховим полем. Представлення сигналів вибухових полів у векторний простір вільних параметрів здійснюється з урахуванням фізичних властивостей вибухових сигналів, передаточної функції середовища та мікросейсмічного фону.

Дана методика представлена для роздільних і нероздільних сигналів вибухових полів, тобто сигналів, у яких кожний наступний сигнал починається після закінчення попереднього сигналу. Закінченням сигналу вважаємо

Оскільки роздільний сигнал є окремим випадком нероздільного (коли в запису присутній лише один сигнал), то узагальнену методику сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для нероздільних сигналів можна представити як загальний випадок узагальненої методики сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для роздільних сигналів.

Нижче представлена узагальнена методика для нероздільних сигналів вибухових полів, тобто сигналів, які не можуть бути однозначно визначені або виділені один від одного із загального сигналу. Нероздільні сигнали представляють собою суперпозицію роздільних сигналів. Тому оцінка параметрів роздільних сигналів, яка представлена в задачі (1), є підзадачею оцінки параметрів нероздільних сигналів. При цьому, роздільні сигнали є окремим випадком нероздільних сигналів, тому узагальнена методика розробляється для нероздільних сигналів.

На основі проведеного дослідження [5], і сформульованої вище удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для роздільних сигналів, можна сформулювати наступні етапи удосконаленої методики сейсмоакустичного моніторингу ВПВДР для нероздільних сигналів:

I етап – Визначення характеристик передаточної функції середовища, в якому генеруються сигнали вибухових полів. Визначення характеристик передаточної функції середовища, в якому генеруються сигнали вибухових полів здійснюється за результатами геологічної розвідки.

Етап II: визначення фізичних параметрів моніторингу. На другому етапі дослідник повинен обґрунтувати та обрати фізичні параметри для сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів. Зважаючи на умови, в яких проводиться моніторинг, специфіку навколишнього середовища та фізичні особливості хвильового поля, необхідно вибрати відповідний вид параметричної математичної моделі.

З огляду на природу сигналів вибухового поля, як фізичні параметри моделі доцільно обрати параметри осциляторів (згідно з моделлю 1). Правильність такого вибору детально обґрунтована у джерелі [4].

Етап III: побудова параметричної математичної моделі. Третій етап визначає побудову параметричної математичної моделі для сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів з метою дистанційної розвідки. Ця модель застосовується для оцінки спектральних характеристик інформативного сигналу вибухового поля (сейсмічних хвиль). З урахуванням умов специфіки та моніторингу середовища отримується конкретна параметрична математична модель сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів (4).

IV етап – Обґрунтування вибору характеристик дослідницької апаратури, за результатами I та II етапів. Враховуючи умови ведення моніторингу, специфіку оточуючого середовища та фізичну особливість хвильового поля, дослідник обирає апаратуру, яка відповідає умовам ведення моніторингу та специфіки оточуючого середовища. Сигнали вибухового поля мають свої специфічні спектральні характеристики, а кожне середовище має свою специфічну реакцію на сигнали вибухового поля. При цьому, вибір апаратури для ведення моніторингу вибухових полів, вибирається таким чином, що її спектральні характеристики та динамічний діапазони, відповідають спектральним характеристикам і динамічного діапазону сигналів вибухового поля і середовища, в якому генеруються ці сигнали. В даній роботі в якості фізичних параметрів математичної моделі вибрані параметри осциляторів (1). Характеристики апаратури мають враховувати динамічний та спектральний діапазони цих сигналів, з урахуванням III-го етапу.

V етап - Набір статистичних даних параметрів математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки. На передісторії спостереження накопичуються статистичні дані різних класів сигналів вибухових полів, як еталон для кожного класу.

Кожен клас сигналу вибухового поля характеризується своїми параметрами, які визначаються при наборі статистики на передісторії.

VI етап – Цей етап стосується обґрунтування та вибору критерію порівняння параметрів сигналів вибухових полів, необхідного для їхньої подальшої класифікації.

Вибір оптимального критерію для визначення інформативних параметрів математичної моделі залежить від двох ключових факторів:

1. Обраної параметричної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів, яка була визначена на IV етапі для цілей дистанційної розвідки.

2. Специфіки зареєстрованого сигналу вибухового поля.

Фактично, на цьому кроці визначається метрологічний інструмент, який дозволить найбільш точно оцінити та порівняти характеристики різних сигналів, ґрунтуючись на їхній моделі (2).

VII етап – Вибір критерію оцінки адекватності параметричної математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів та порогу максимального ухилення моделі від даних спостереження. Порівняння функції, яка описує модель сигналу вибухового поля та функції даних спостереження, можна робити в евклідових просторах, в кожному з яких відстань між функціями представлена своїм скалярним добутком [1], [6]. В даній роботі ця відстань міряється в метриці L_2 .

VIII етап – Оцінка параметрів сигналу вибухового поля на фоні шуму. Для розділних сигналів: Оцінка параметрів кожного роздільного сигналу вибухового поля на фоні шуму. Для отримання інформативних параметрів роздільного сигналу, вирішується задача (1) [7].

Для нерозділних сигналів: кожний сигнал вибухового поля (4) розглядається як роздільний (1) на фоні шуму, де всі інші нероздільні сигнали розглядаються як завада. Для отримання інформативних параметрів кожного з нерозділних сигналів, вирішується задача (1) [2].

IX етап – Класифікація сигналів вибухового поля. Відповідно до набраної статистики V-го етапу та обраного на VII етапі критерію (2) оцінки відхилення математичної моделі сейсмоакустичного моніторингу вибухових полів для ведення дистанційної розвідки від даних спостереження та порогу максимального відхилення даних спостереження від моделі приймається рішення щодо належності даного сигналу вибухового поля до визначеного на V етапі класу.

Таким чином, представлено удосконалену методику вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу. Методика дозволяє класифікувати сигнали вибухового поля з метою визначення типу джерела вибуху. Специфіка даної методики полягає в дослідженні сейсмічного хвильового поля, генерованого вибухами на полі бою. Вперше запропоновано класифікувати сигнали вибухового поля з застосуванням сейсмоакустичного моніторингу, з метою визначення типу зброї. Дана методика в поєднанні з методикою знаходження координат джерела вибуху [8], [9] дає можливість визначити місцеположення ворожої зброї.

Висновки.

В роботі представлено удосконалену методику вибухових полів для ведення дистанційної розвідки на основі сейсмоакустичного аналізу. Методика дозволяє класифікувати сигнали вибухового поля з метою визначення типу джерела вибуху. Специфіка даної методики полягає в дослідженні сейсмічного хвильового поля, генерованого вибухами на полі бою. Вперше запропоновано класифікувати сигнали вибухового поля з застосуванням сейсмоакустичного моніторингу, з метою визначення типу зброї. Дана методика в поєднанні з методикою знаходження координат джерела вибуху дає можливість визначити місцеположення ворожої зброї.

Список використаної літератури

1. Mostovyy V., Mostovyy S. Estimation of parameters of seismic waves. Transactions of NAS of Ukraine. 2014, Vol. 2, pp. 118-123.
2. Мостовий В. С. Оптимальні оцінки нелінійних параметрів у моделях сейсмоакустичного моніторингу // Доп. НАН України. – 2011. – № 8. – с. 103 – 106.
3. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM Journal on Applied Mathematics, 1963, p. 431–441.
4. Мостовий В.С., Мостовий С.В. Про коректність задач нелінійної регресії при моніторингу природних та рукотворних об'єктів. Геофіз. журн. – 2012. – 34, № 2. – С. 140-143.
5. Yarmolai I. Shevchenko A. Parametric mathematical model of seismoacoustic monitoring of a single mortar explosion // Telecommunication and Informative Technologies. 2024. № 1 (82) p. 122-129.
6. V. Mostovoy, S. Mostovyi. Mathematical model of seismic signal, as a flow of physically non-realizable single seismic waves // Geophysical journal 2016, Vol. 38, № 5, p. 166-169.
7. Mostovyy V.S., Mostovyy S.V., Osadchuk A.E. Non-identified detection of signals against a microseismic background, Geophys. J. – 1998. – Vol. 18. – P. 265-271.
8. Нікіфоров М.М., Пампуха І.В., Лоза В.М., Щербина С.В., Шевцов А.Г. Особливості використання автоматизованого сейсмоакустичного комплексу за допомогою комбінованого способу виявлення об'єктів / Геофізичний журнал, № 6, том 40, 2018, С 150 – 156.
9. Фещенко А.І., Ільєнко В.А., Пампуха І. В, Охрамович М. М., Нікіфоров М. М, Лукіянчук А. А, Лоза В. М, Кривицький Г. В. Спосіб використання комплексної сейсмоакустичної системи для автоматичної детекції координат небезпечних техногенних та військових об'єктів / Патент опубліковано 11.06.2018, бюл. № 11/2018/
10. V. Zhebka, et al., Methodology for Predicting Failures in a Smart Home based on Machine Learning Methods, in: Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems, CPITS, vol. 3654 (2024) 322–332.