

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Е. Пашенко<sup>1</sup>, Д.В. Карлов<sup>1</sup>, С.В. Медведський<sup>2</sup>, М.М. Журавський<sup>3</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup>В/ч А0515<sup>3</sup>Національний університет цивільного захисту України, Харків

## АНАЛІЗ СИГНАЛІВ СЕЙСМІЧНИХ ДАТЧИКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

Розглянута можливість використання фрактальної розмірності для аналізу сигналів сейсмічних датчиків. Показано, що зниження величини фрактальної розмірності, яка розраховувалася за допомогою методу покриття, дозволяє визначити момент початку коливань земної поверхні. Встановлено, що зміна величини фрактальної розмірності, яка розраховується за допомогою методу визначення довжини лінії, також дозволяє визначити момент початку коливань земної поверхні і досліджувати характер цих коливань. Також визначено, що середні значення фрактальної розмірності вибуху і землетрусу дають можливість розрізнити якою дією було викликано коливання земної поверхні.

**Ключові слова:** фрактальна розмірність, метод покриття, сейсмічний датчик.

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури

Під час аналізу даних, що отримані за допомогою сейсмічних датчиків, виникає проблема виявлення початку коливань земної поверхні і визначення за рахунок чого ці коливання виникли (наприклад, розривання коливань обумовлених землетрусом від коливань за рахунок вибуху).

У теперішній час для аналізу геофізичних даних застосовують нові математичні методи з використанням вейвлет аналізу, а також нейронних мереж [1, 2].

Для дослідження прихованих процесів у часовій реалізації можна використовувати характеристичний коефіцієнт – фрактальну розмірність  $D$ . Наприклад для аналізу рухомих іоносферних збурень, які викликані стартом ракети – носія [3].

Фрактальна розмірність, як правило, є позитивним нецілим числом, що відображає, деяким чином, форму сигналу. При двовимірному представленні сигналу, що приймається, величина фрактальної розмірності лежить у межах  $1,0 < D < 2,0$  [4]. Більшому значенню фрактальної розмірності відповідає великий ступінь заповнення площини. Для гладких сигналів фрактальна розмірність буде близька до одиниці  $D = 1,0$ , тобто практично співпадає з топологічною розмірністю лінії, а для складних сигналів, що заповнюють всю площину, –  $D = 2,0$  (практично співпадати з топологічною розмірністю площини).

Для розрахунку фрактальної розмірності методом покриття на комп'ютерах використовують вираз [3]

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg(1/\varepsilon)}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – розмір сторони квадрата покриття;  $N(\varepsilon)$  – кіль-

кість квадратів зі стороною  $\varepsilon$  необхідних для покриття всього сигналу.

Як видно з цього виразу, графік залежності  $\lg N(\varepsilon)$  від  $\lg(1/\varepsilon)$  представляє пряму лінію з кутовим коефіцієнтом  $D$ . Для визначення невідомого параметру  $D$  необхідно оцінити  $N(\varepsilon)$  для декількох значень  $\varepsilon$ . Якщо використовуються клітки тільки двох розмірів  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ , то невідоме  $D$  визначають з системи рівнянь

$$\lg N(\varepsilon_1) = \lg C - D \cdot \lg \varepsilon_1,$$

$$\lg N(\varepsilon_2) = \lg C - D \cdot \lg \varepsilon_2.$$

На практиці для пошуку значення  $D$  використовують метод найменших квадратів [5]. Якщо розглядають пряму, що проходить через початок координат, то величину  $\lg C$  не використовують. Нехай в результаті обробки набуті значень  $x_1 = N(\varepsilon_1)$ ,  $x_2 = N(\varepsilon_2)$ , ...,  $x_n = N(\varepsilon_n)$  і  $y_1 = \varepsilon_1$ ,  $y_2 = \varepsilon_2$ , ...,  $y_n = \varepsilon_n$ . По цих точках можна побудувати графік залежності  $y = f(x)$ . Отримана крива дає можливість судити про вигляд функції  $f(x)$ . Але постійні коефіцієнти, які входять в цю функцію, залишаються невідомими.

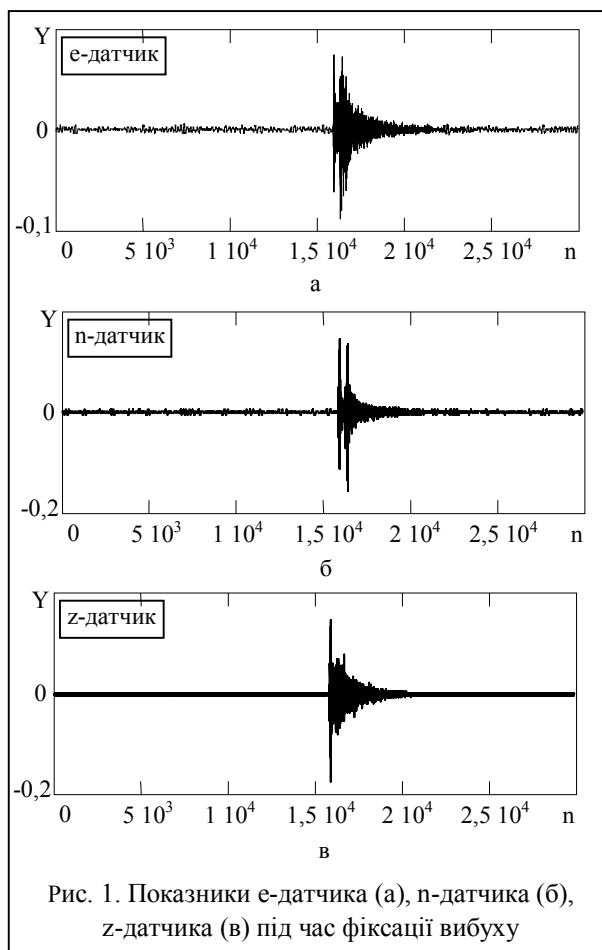
Отримані точки, як правило, не лягають точно на криву. Метод найменших квадратів вимагає, щоб сума квадратів відхилень отриманих крапок від кривій, тобто  $[y_i - f(x_i)]^2$  була найменшою.

Існують різні алгоритми визначення фрактальної розмірності [6-9]. На практиці найчастіше при обробці часових рядів використовують метод покриття та метод визначення довжини лінії.

**Мета статті:** розглянути можливість використання фрактальної розмірності для аналізу сигналів сейсмічних датчиків.

## Аналіз сигналів сейсмічних датчиків під час виявлення вибухів з використанням фрактальної розмірності

Для аналізу можливості виявлення вибухів з використанням фрактальної розмірності використовувалися реальні дані, що були отримані за допомогою сейсмічних засобів Головного центру спеціального контролю (Національного космічного агентства України) м. Макарів. Сейсмічні засоби фіксували коливання земної поверхні під час вибуху. Коливання фіксувалися трьома різними датчиками, які будемо називати: е-датчик – датчик, який фіксував коливання земної поверхні у східно-західному напрямку; п-датчик – датчик, який фіксував коливання земної поверхні у південно-північному напрямку; z-датчик – датчик, який фіксував коливання земної поверхні у вертикальному напрямку (амплітуду коливань). Дані представлені у цифровому вигляді у вигляді значень показників датчиків, які змінюються у часі. На рис. 1, а, б, в наведені показники е-, п- та z-датчиків відповідно (30 000 значень) під час фіксації вибуху.



Як видно з рис. 1 на приблизно 16 000 значенні спостерігається різке збільшення значень показників всіх трьох датчиків. Але за цими даними не можливо визначити за рахунок чого виникло збільшення – за рахунок вибуху, або за рахунок землетрусу. Як

буде розглянуто нижче під час землетрусу спостерігається таке ж саме збільшення показників датчиків.

Проведемо оцінку фрактальних властивостей даних трьох датчиків під час фіксації вибуху, розмір вибірок дорівнює  $N = 30\,000$ . Для аналізу також використовувалося „стрибаюче вікно” розміром  $N_0 = 1\,000$  елементів вибірки. Величина «стрибка» була вибрана  $M = N = 1\,000$  елементів, тобто перше «вікно» містить значення з 1 до 1 000 елементів вибірки, друге «вікно» – з 1 001 до 2 000 елементів вибірки, третє «вікно» – з 2 001 до 3 000 елементів вибірки і т.д.. Результати розрахунку фрактальної розмірності  $D_1$  (фрактальна розмірність розраховувалася за допомогою методу покриття) для кожного положення „стрибаючого вікна” показані на рис. 2.



По осі абсцис відкладені значення початку „стрибаючого вікна” (всього 30 значень), а по осі ординат, відповідні „вікнам”, фрактальні розмірності  $D_1$ . Суцільною лінією зображена зміна фрактальної розмірності під час аналізу даних е-датчика, штриховою лінією – під час аналізу даних п-датчика, точковою лінією – під час аналізу даних z-датчика.

З рис. 2 видно, що на 16 положенні „стрибаючого вікна” фрактальна розмірність знижується (для всіх трьох датчиків) до рівня  $D_1 = 0,95$ , що відповідає початку вибуху.

Аналіз фрактальних розмірностей, наведених на рис. 2, показує, що зміна фрактальних розмірностей даних z-датчика відрізняється від зміни величин фрактальних розмірностей даних е-датчика і п-датчика. Для даних z-датчика величини фрактальних розмірностей з 17 до 27 «стрибаючі вікна» практично не відрізняється від величин фрактальних розмірностей фону (положення «стрибаючого вікна» з 1 до 15).

Така поведінка фрактальної розмірності даних z-датчика не дозволяє дослідити зміну фаз вибуху за

допомогою цього датчика і фрактальної розмірності. Але фрактальні розмірності під час аналізу даних е-датчика і n-датчика дозволяють виділити різні стадії вибуху.

Фрактальні розмірності у 17 – 21 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_1 = 1,45 - 1,55$  і характеризують активну фазу. Фрактальні розмірності у 22 – 26 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_1 = 1,35 - 1,45$  і відповідають фазі загасання вибуху. Фрактальні розмірності у 27 – 30 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_1 = 1,25 - 1,35$ , також як і у 1 – 15 «стрибаючих вікнах» і характеризують фон.

Таким чином, значне зниження величини фрактальної розмірності (яка розраховувалася за допомогою методу покриття) дозволяє визначити момент початку вибуху. Крім того, під час аналізу фрактальних розмірностей даних е-датчика і n-датчика дозволяють виділити різні стадії вибуху.

Проведемо оцінку фрактальних властивостей даних трьох датчиків під час фіксації вибуху за допомогою іншого методу визначення фрактальної розмірності  $D_2$ . Результати розрахунку фрактальної розмірності  $D_2$  (фрактальна розмірність розраховувалася за допомогою методу визначення довжини кривої) для кожного положення "стрибаючого вікна" показані на рис. 3.

По осі абсцис відкладені значення початку „стрибаючого вікна” (всього 30 значень), а по осі ординат, відповідні „вікнам”, фрактальні розмірності  $D_2$ . Як і раніше суцільною лінією зображена зміна фрактальної розмірності під час аналізу даних е-датчика, штриховою лінією – під час аналізу даних n-датчика, точковою лінією – під час аналізу даних z-датчика.



Рис. 3. Залежність фрактальної розмірності, що розрахована методом визначення довжини лінії, від положення «стрибка»

З рис. 3 видно, що на 16 положенні „стрибаючого вікна” фрактальна розмірність збільшується

(для всіх трьох датчиків) і досягає рівня  $D_2 \sim 1,95$  при 17 положенні „стрибаючого вікна”, що відповідає початку вибуху. На відміну від розрахунку фрактальної розмірності методом покриття, розрахунок методом визначення довжини лінії дозволяє аналізувати данні всіх трьох датчиків, але для z-датчика величина фрактальної розмірності трохи більша, що обумовлено відмінністю структури вихідних даних z-датчика від структури вихідних даних е-датчика і n-датчика.

Під час аналізу даних е-датчика і n-датчика фрактальні розмірності у 17 – 21 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_2 = 1,75 - 1,95$  і характеризують активну фазу. Фрактальні розмірності у 22 – 26 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_2 = 1,55 - 1,75$  і відповідають фазі загасання вибуху.

Фрактальні розмірності у 27 – 30 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_2 = 1,45 - 1,55$ , також як і у 1 – 15 «стрибаючих вікнах» і характеризують фон.

Оцінимо середнє значення фрактальної розмірності  $\langle D_2 \rangle$  аналізованих вибірок. Середнє значення фрактальної розмірності  $\langle D_2 \rangle$  визначалося з використанням наступного виразу

$$\langle D_2 \rangle = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K D_{02i} , \quad (2)$$

де  $K = \frac{N}{M}$  – кількість стрибків "вікна";  $D_{02i}$  – фрактальна розмірність "вікна" розміром  $N_0 = 1\,000$  на  $i$ -му стрибку.

Середнє значення фрактальної розмірності даних е-датчика, які відповідають фону, дорівнює  $\langle D_{2e} \rangle = 1,5162$ , середнє значення фрактальної розмірності даних n-датчика –  $\langle D_{2n} \rangle = 1,52934$ , середнє значення фрактальної розмірності даних z-датчика –  $\langle D_{2z} \rangle = 1,588427$ . Середнє значення фрактальної розмірності фону всіх трьох датчиків дорівнює  $\langle D_2 \rangle = 1,544656$ .

Середнє значення фрактальної розмірності даних е-датчика, які відповідають вибуху, дорівнює  $\langle D_{2e} \rangle = 1,755691$ , середнє значення фрактальної розмірності даних n-датчика –  $\langle D_{2n} \rangle = 1,752936$ , середнє значення фрактальної розмірності даних z-датчика –  $\langle D_{2z} \rangle = 1,830054$ . Середнє значення фрактальної розмірності вибуху всіх трьох датчиків дорівнює  $\langle D_2 \rangle = 1,77956$ .

Таким чином, зміна величини фрактальної розмірності, яка розраховується за допомогою методу визначення довжини лінії, дозволяє визначити момент початку вибуху.

Крім того, середні значення фрактальної розмірності фону і вибуху також дають можливість виставити порогові значення фрактальної розмірності для автоматичного виявлення початку вибуху.

### Аналіз сигналів сейсмічних датчиків під час виявлення землетрусів з використанням фрактальної розмірності

Для аналізу можливості виявлення землетрусів з використанням фрактальних розмірностей також використовувалися реальні данні, що були отримані за допомогою сейсмічних засобів Головного центру спеціального контролю (Національного космічного агентства України) м. Макарів. Як і раніше (під час аналізу даних коливань земної поверхні, обумовлених вибухом) коливання земної поверхні фіксували три датчика (e, n, z).

На рис. 4, а, б, в наведені показники e-, n- та z-датчиків відповідно (40 000 значень) під час фіксації землетрусу.

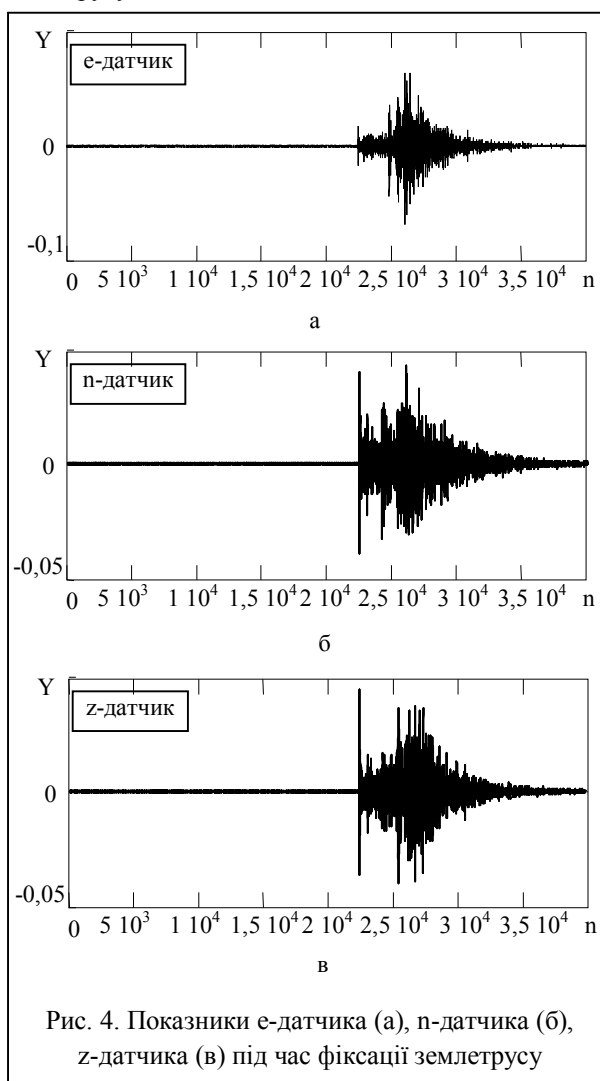


Рис. 4. Показники e-датчика (а), n-датчика (б), z-датчика (в) під час фіксації землетрусу

Як видно з рис. 4 на приблизно 23 000 значенні спостерігається збільшення значень показників датчиків. Але, як вже відзначалося вище, за цими показниками не можливо визначити за рахунок чого виникло збільшення – за рахунок вибуху, або за рахунок землетрусу.

Проведемо оцінку фрактальних властивостей даних трьох датчиків під час фіксації землетрусу,

розмір вибірок дорівнює  $N = 40\,000$ . Для аналізу також використовувалося „стрибаюче вікно” розміром  $N_0 = 1\,000$  елементів вибірки. Величина «стрибка» була вибрана  $M = N = 1\,000$  елементів. Результати розрахунку фрактальної розмірності  $D_1$  (фрактальна розмірність розраховувалася за допомогою методу покриття) для кожного положення „стрибаючого вікна” показані на рис. 5. По осі абсцис відкладені значення початку „стрибаючого вікна” (всього 40 значень), а по осі ординат, відповідні „вікнам”, фрактальні розмірності  $D_1$ . Суцільною лінією зображена зміна фрактальної розмірності під час аналізу даних e-датчика, штриховою лінією – під час аналізу даних n-датчика, точковою лінією – під час аналізу даних z-датчика.



Рис. 5. Залежність фрактальної розмірності, що розрахована методом покриття, від положення «стрибка»

З рис. 5 видно, що на 23 положенні „стрибаючого вікна” фрактальна розмірність знижується (для всіх трьох датчиків) до рівня  $D_1 = 1,15 - 1,25$ , що відповідає початку землетрусу.

Аналіз фрактальних розмірностей, наведених на рис. 5, показує, що зміна фрактальних розмірностей даних всіх трьох датчиків після виявлення початку землетрусу не сильно відрізняється (але середня фрактальна розмірність трохи більше фоновій) від зміни величин фрактальних розмірностей фоновому сигналу. Тому фрактальну розмірність, що розрахована методом покриття, не доцільно використовувати для аналізу особливостей розвитку землетрусу у часі, а можна використовувати тільки для визначення початку коливань земної поверхні.

Таким чином, значне зниження величини фрактальної розмірності (яка розраховувалася за допомогою методу покриття) дозволяє визначити момент початку коливань земної поверхні і не дозволяє виділити різні стадії землетрусу.

Проведемо оцінку фрактальних властивостей даних трьох датчиків під час фіксації землетрусу за

допомогою іншого методу визначення фрактальної розмірності  $D_2$  (за допомогою методу визначення довжини кривої). Результати розрахунку фрактальної розмірності  $D_2$  для кожного положення "стрибаючого вікна" показані на рис. 6.



Рис. 6. Залежність фрактальної розмірності, що розрахована методом визначення довжини лінії, від положення «стрибка»

З рис. 6 видно, що на 22 положенні „стрибаючого вікна” фрактальна розмірність збільшується (для всіх трьох датчиків) і досягає рівня  $D_2 \sim 1,98$  при 23 положенні „стрибаючого вікна”, що відповідає початку коливань земної поверхні. На відміну від розрахунку фрактальної розмірності методом покриття, розрахунок методом визначення довжини лінії дозволяє аналізувати дані всіх трьох датчиків.

Під час аналізу даних всіх трьох датчиків фрактальні розмірності у 23 – 40 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_2 = 1,8 - 1,99$  і характеризують землетрус. Фрактальні розмірності у 1 – 22 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах  $D_2 = 1,4 - 1,55$  і характеризують фон. Якщо порівняти зміну даних всіх трьох датчиків у часі, то по амплітуді останні «стрибаючі вікна» (після 35 «стрибаючого вікна») майже не відрізняються від фонових (перші 22 «стрибаючих вікна»). Але як видно з рис. 6 останні «стрибаючі вікна» характеризують землетрус, хоча і меншої інтенсивності (загасання).

Оцінимо середнє значення фрактальної розмірності  $\langle D_2 \rangle$  аналізованих вибірок. Середнє значення фрактальної розмірності  $\langle D_2 \rangle$  визначалося з використанням виразу (2).

Середнє значення фрактальної розмірності даних е-датчика, які відповідають фону, дорівнює  $\langle D_{2e} \rangle = 1,49605$ , середнє значення фрактальної розмірності даних п-датчика –  $\langle D_{2n} \rangle = 1,468577$ , середнє значення фрактальної розмірності даних z-датчика –  $\langle D_{2z} \rangle = 1,518023$ . Середнє значення фрактальної розмірності фону всіх трьох датчиків дорівнює  $\langle D_2 \rangle = 1,494217$ . Якщо порівняти це середнє значення

фрактальної розмірності фону з середнім значенням фрактальної розмірності фону, яке було отримано під час аналізу даних вибуху ( $\langle D_2 \rangle = 1,544656$ ), то вони відрізняються лише на  $\Delta \langle D_2 \rangle = 0,05$ .

Середнє значення фрактальної розмірності даних е-датчика, які відповідають землетрусу, дорівнює  $\langle D_{2e} \rangle = 1,924378$ , середнє значення фрактальної розмірності даних п-датчика –  $\langle D_{2n} \rangle = 1,91925$ , середнє значення фрактальної розмірності даних z-датчика –  $\langle D_{2z} \rangle = 1,915789$ . Середнє значення фрактальної розмірності землетрусу всіх трьох датчиків дорівнює  $\langle D_2 \rangle = 1,919806$ . У порівнянні з середнім значенням фрактальної розмірності вибуху ( $\langle D_2 \rangle = 1,77956$ ) різниця середніх значень фрактальної розмірності вибуху і землетрусу буде складати  $\Delta \langle D_2 \rangle = 0,14$ .

Таким чином, зміна величини фрактальної розмірності, яка розраховується за допомогою методу визначення довжини лінії, дозволяє визначити момент початку коливань земної поверхні і досліджувати характер цих коливань при малих величинах амплітуд вихідних даних. Середні значення фрактальної розмірності фону і землетрусу дають можливість виставити порогові значення фрактальної розмірності для автоматичного виявлення початку коливань земної поверхні. Крім того, середні значення фрактальної розмірності вибуху і землетрусу дають можливість розрізнити якою дією було викликано коливання земної поверхні.

## Висновки

1. Величину фрактальної розмірності можна використовувати для аналізу сигналів сейсмічних датчиків.

2. Зниження величини фрактальної розмірності (яка розраховувалася за допомогою методу покриття) дозволяє визначити момент початку коливань земної поверхні. Під час аналізу фрактальних розмірностей даних е-датчика і п-датчика величина фрактальної розмірності дозволяє виділити різні стадії вибуху і не дозволяє виділити різні стадії землетрусу.

3. Зміна величини фрактальної розмірності, яка розраховується за допомогою методу визначення довжини лінії, дозволяє визначити момент початку коливань земної поверхні і досліджувати характер цих коливань.

4. Середні значення фрактальної розмірності фону і землетрусу дають можливість виставити порогові значення фрактальної розмірності для автоматичного виявлення початку коливань земної поверхні. Крім того, середні значення фрактальної розмірності вибуху і землетрусу дають можливість розрізнити якою дією було викликано коливання земної поверхні.

5. Під час подальших досліджень доцільно провести аналіз можливості використання фрактальної розмірності для виявлення землетрусів малої інтенсивності.

**Список літератури**

1. Любушин А.А. Геофизический мониторинг: шумы, сигналы, предвестники // Проблемы геофизики 21 века. Книга 2 / А.А. Любушин. – М.: Наука, 2003. – С. 70-94.
2. Мала С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Мала – М.: Мир, 2005. – 671 с.
3. Пащенко Р.Е. Аналіз рухомих іоносферних збурень, які викликані стартом ракети – носія, з використанням фрактальної розмірності / Р.Е. Пащенко, Д.В. Карлов, С.В. Маловиця, В.М. Лісаченко – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 2(7). – 268 с.
4. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
5. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. – М.: Изд. физ.-мат. лит., 1958. – 334 с.

6. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.

7. Пащенко Р.Э. Формирование фрактальных сигналов / Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2005. – 298 с.

8. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / [Доля Г.Н., Иванов В.К., Пащенко Р.Э., Стадник А.М. и др.]; Под ред. Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2006. – 348 с.

9. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.

Надійшла до редколегії 21.05.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.В. Полярус, Харківський національний автотранспортний університет, Харків.

**АНАЛИЗ СИГНАЛОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ**

Р.Э. Пащенко, Д.В. Карлов, С.В. Медведский, М.М. Журавский

*Рассмотрена возможность использования фрактальной размерности для анализа сигналов сейсмических датчиков. Показано, что снижение величины фрактальной размерности, которая рассчитывалась с помощью метода покрытия, позволяет определить момент начала колебаний земной поверхности. Установлено, что изменение величины фрактальной размерности, которая рассчитывается с помощью метода определения длины линии, также позволяет определить момент начала колебаний земной поверхности и исследовать характер этих колебаний. Также определено, что средние значения фрактальной размерности взрыва и землетрясения дают возможность различить каким действием было вызвано колебание земной поверхности.*

**Ключевые слова:** фрактальная размерность, метод покрытия, сейсмический датчик.

**ANALYSIS SIGNALS OF SEISMIC SENSORS  
IS WITH THE USE FRACTAL DIMENSION**

R.E. Paschenko, D.V. Karlov, S.V. Medvedsky, M.N. Zhuravsky

*Possibility of the use fractal dimension is considered for the analysis signals of seismic sensors. It is shown that the decline of size fractal dimension which settled accounts by the method coverage allows to define the moment beginning vibrations of earthly surface. It is set that change of size fractal dimension which settles accounts by the method determination of length of line, also allows to define the moment beginning vibrations of earthly surface and explore character of these vibrations. Also certainly, that the mean values fractal dimension of explosion and earthquake enable to distinguish what action oscillation of earthly surface was caused.*

**Keywords:** fractal dimension, method of coverage, seismic sensor.