

УДК 530.1.537.86 + 621.396.96

Р.Е. Пашенко¹, Д.В. Карлов¹, С.В. Медведський², М.М. Журавський³¹Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків²в/ч А0515³Національний університет цивільного захисту України, Харків

АНАЛІЗ СИГНАЛІВ ГЕОФІЗИЧНИХ ДАТЧИКІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ МАЛОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ ТА ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ

Розглянута можливість використання фазових портретів та фрактальної розмірності для аналізу сигналів геофізичних (сейсмічних) датчиків для виявлення землетрусів малої інтенсивності. Показано, що зміна форми фазових портретів дозволяє виділити початок коливань земної поверхні, коли на вихідних даних геофізичних датчиків зростання амплітуди не спостерігається. Встановлено, що за максимальним значенням фрактальної розмірності даних геофізичних датчиків можна визначити момент початку коливань земної поверхні малої інтенсивності.

Ключові слова: фазовий портрет, фрактальна розмірність, геофізичний (сейсмічний) датчик.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури.

В останні десятиріччя значно зросли можливості систем обробки даних, що отримують за допомогою геофізичних (сейсмічних) датчиків, що пов'язано з розвитком обчислювальної техніки. Для аналізу геофізичних даних застосовують нові математичні методи на базі нелінійних процедур [1, 2]. Актуальною задачею під час такого аналізу залишається виявлення прихованих аномалій у геофізичних сигналах, які можуть виникати за рахунок фіксації землетрусів малої інтенсивності.

Деякі важливі властивості реалізації сигналів, які неможливо або скрутно досліджувати аналітично, піддаються наочному представленню і якісному дослідженню за допомогою побудови фазової площини. Можливість аналізу сигналів з використанням фазової площини описана в [3 – 5]. У загальному випадку фазову площину можна визначити як абстрактну математичну площину, на якій осями координат є стан системи та її похідна. Кожному стану системи відповідає точка на фазовій площині. Зміні стану системи у часі можна співвіднести рух деякої точки (зображуючої точки) на фазовій площині. Криву на фазовій площині (траєкторію руху зображуючої точки), що описує еволюцію системи називають фазовою траєкторією. Сукупність фазових траєкторій утворює фазовий портрет [3].

Для аналізу одномірних сигналів можна використовувати метод побудови псевдофазової площини з часовою затримкою [6], заснований на теоремі Такенса [7]. Для аналізу таких сигналів будується залежність сигналу від його ж величини в інший момент часу, відстаючий або випереджаючий даний момент на постійну величину τ : $[x(t), x(t + \tau)]$. Результат має ті ж властивості, що і при використанні дійсної фазової площини.

Підходи до вибору τ описані в [6]. На практиці часову затримку τ найчастіше вибирають близькою до першого нуля автокореляційної функції часового ряду x_i

$$B(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i - \bar{x} \quad x_{i+\tau} - \bar{x}, \quad (1)$$

де $n = N - \tau$; N – число точок часового ряду; \bar{x} – середнє значення часового ряду.

Для дослідження прихованих процесів у часовій реалізації також можна використовувати характеристичний коефіцієнт – фрактальну розмірність D .

Фрактальна розмірність, як правило, є позитивним нецілим числом, що відображає, деяким чином, форму сигналу.

Для розрахунку фрактальної розмірності методом покриття на комп'ютерах використовують вираз [8]

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg 1/\varepsilon}, \quad (2)$$

де ε – розмір сторони квадрата покриття; $N(\varepsilon)$ – кількість квадратів зі стороною ε 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 ε .

Мета статті: розглянути можливість використання фазових портретів та фрактальної розмірності для аналізу сигналів геофізичних (сейсмічних) датчиків під час виявлення землетрусів малої інтенсивності.

Аналіз сигналів геофізичних датчиків для виявлення землетрусу малої інтенсивності з використанням фазових портретів

Для аналізу можливості виявлення вибухів з використанням фазових портретів використовувалися реальні данні, що були отримані за допомогою

сейсмічних засобів Головного центру спеціального контролю (Національного космічного агентства України) м. Макарів. Датчики фіксували коливання земної поверхні під час землетрусу. 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 (33 000 значень) під час фіксації землетрусу малої інтенсивності.

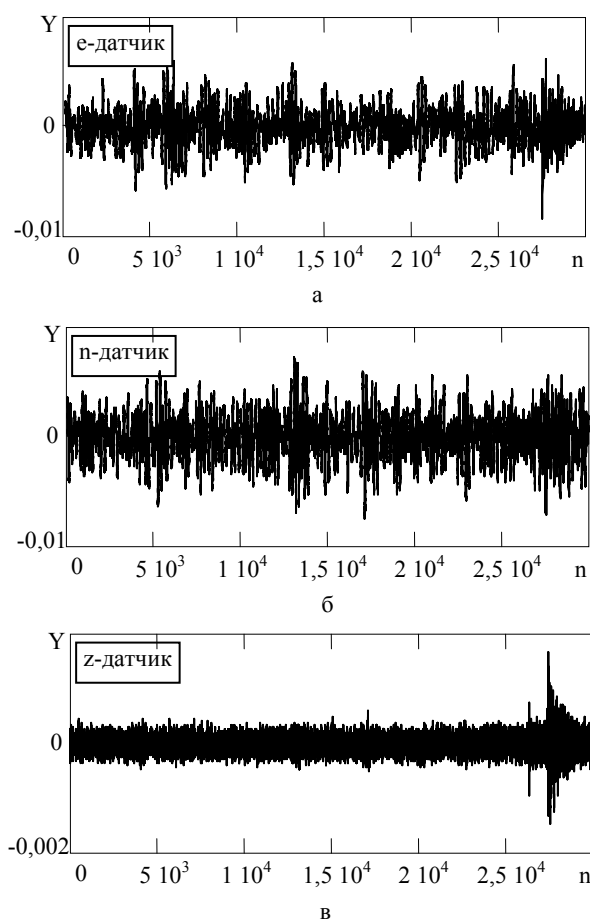


Рис. 1. Показники е-датчика (а), п-датчика (б), z-датчика (в) під час фіксації землетрусу малої інтенсивності

Як видно з рис. 1, а на всьому протязі даних збільшення значень показника е-датчика не спостерігається і за цими даними не можливо визначити момент початку землетрусу, як це було видно у попередніх випадках. З рис. 1, б також видно, що як і за даними е-датчика, дані п-датчика не дозволяють визначити початок коливань земної поверхні. Тільки на рис. 1, в видно, що на приблизно 29 000 значенні спостерігається незначне збільшення значень показ-

ників z-датчика, а на приблизно 30 000 значенні збільшення значень показників z-датчика стає більш значним. На відміну від даних е-датчика і п-датчика зміни в амплітуді даних z-датчика можна спостерігати візуально.

Проведемо дослідження показників е-, z- та п-датчиків за допомогою фазових портретів, які побудовані на псевдофазовій площині. Для побудови фазових портретів використовувалося «стрибаюче вікно» розміром 1 000 елементів, величина «стрибка» також дорівнювалася 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. Величина часового зсуву τ дорівнювала 50 елементів вибірки, що близько до першого нуля автокореляційної функції $B(\tau)$.

На рис. 2 показані характерні фазові портрети побудовані під час аналізу вихідної вибірки землетрусу малої інтенсивності з е-датчика. По осі абсцис (Y) відкладені незатримані значення вихідної вибірки, а по осі ординат (Z) – затримані на 50 елементів значення вихідної вибірки. У лівому верхньому куті кожного фазового портрету зазначений номер «стрибаючого вікна».

З аналізу фазових портретів, наведених на рис. 2, видно, що з 1 до 29 «стрибаючі вікна» фазові портрети мають форму овалів з деякими нерівностями і схожі на фазові портрети фону. Деякі нерівності фазових портретів, обумовлені скоріше за все шумами датчика.

З 30 «стрибаючого вікна» форма фазового портрету починає змінюватися, фазові траєкторії починають зосереджуватися у центрі. Максимальна амплітуда спостерігається у 31 «стрибаючому вікні». Тому можна зробити висновок, що з 30 «стрибаючого вікна» (значення вихідної вибірки з 29 001 до 30 000) починаються фіксуватися коливання земної поверхні.

Таким чином, з порівняння форми фазових портретів видно, що фазові портрети дозволяють виділити початок коливань земної поверхні, коли на вихідних даних е-датчика зростання амплітуди не спостерігається.

На рис. 3 показані характерні фазові портрети побудовані під час аналізу вихідної вибірки землетрусу малої інтенсивності з п-датчика.

Аналіз фазових портретів, наведених на рис. 3, показує, що, як і при аналізі даних е-датчика, фазові портрети п-датчика у 1 – 29 «стрибаючих вікнах» мають форму овалів з деякими нерівностями і відповідають фону. У 30 «стрибаючому вікні» форма фазового портрету починає змінюватися (фазова траєкторія починає зосереджуватися у центрі), але не так виразно, як при аналізі даних е-датчика. Найбільш характерним є фазовий портрету 31 «стрибаючому вікні» (максимальне зосередження фазової траєкторії у центрі). У 32 «стрибаючому вікні» фазові траєкторії починають знову розосереджуватися.

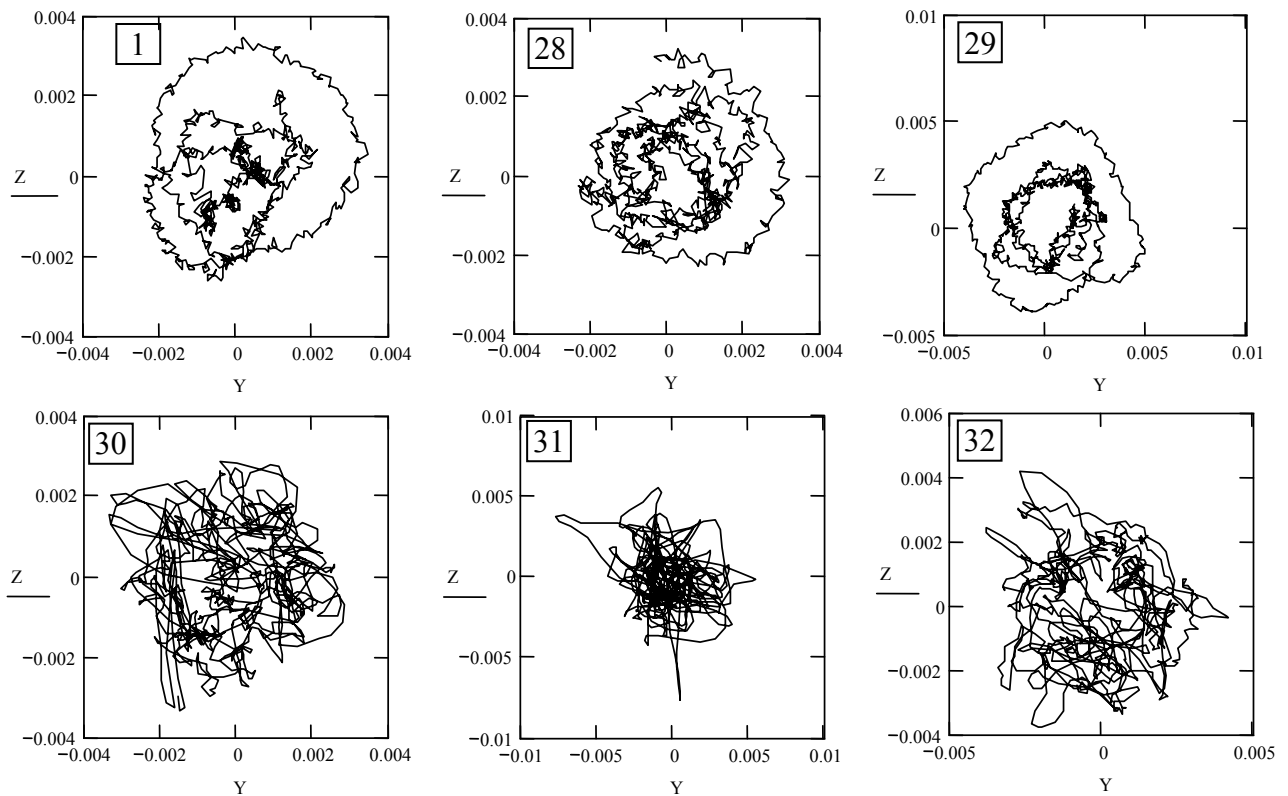


Рис. 2. Фазові портрети, побудовані під час аналізу вихідної вибірки землетрусу малої інтенсивності з е-датчика

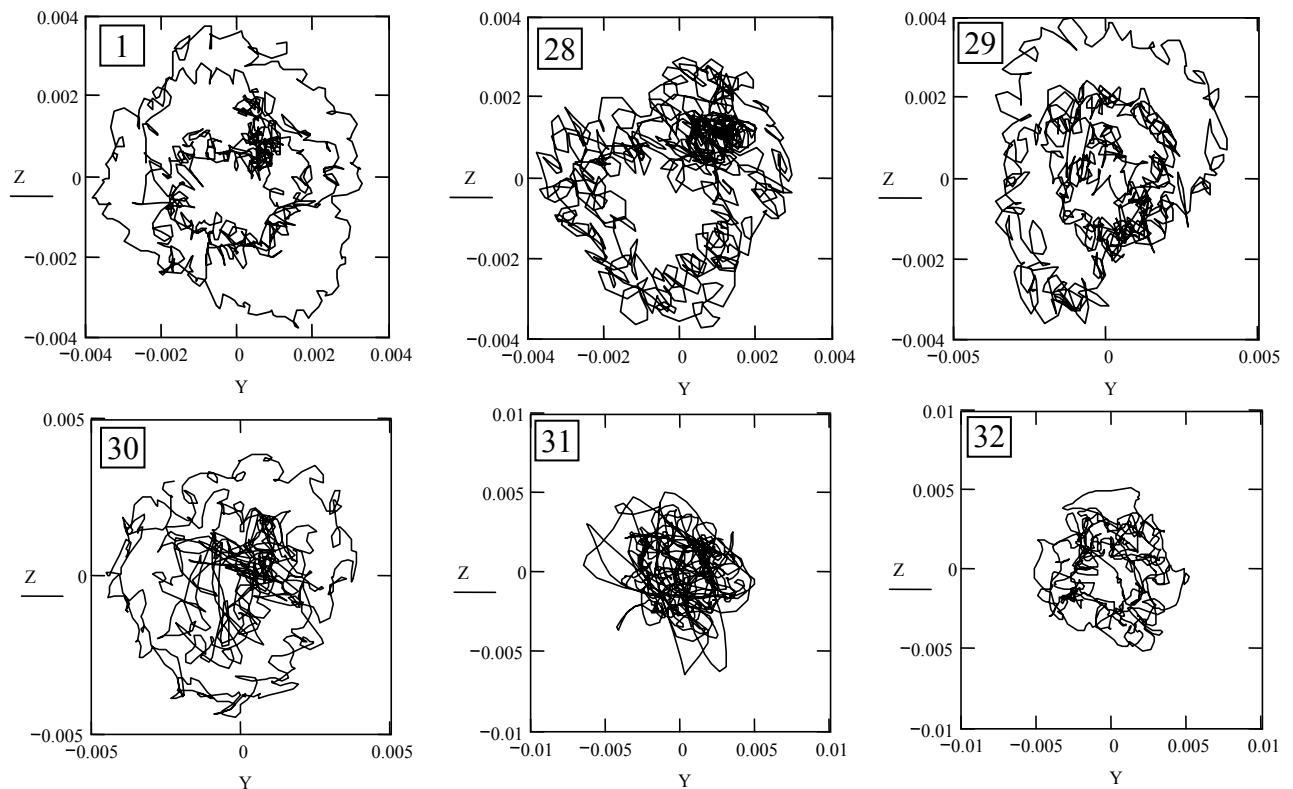


Рис. 3. Фазові портрети, побудовані під час аналізу вихідної вибірки землетрусу малої інтенсивності з п-датчика

Невиразна поведінка фазових портретів даних п-датчика скоріше за все пояснюється тим, що епіцентр землетрусу знаходився у боці, який контролюється е-датчиком.

Таким чином, за допомогою фазових портретів даних п-датчика вдалося визначити початок коливань земної поверхні, але у порівнянні з аналізом даних е-датчика це було не так виразно.

Необхідно відзначити, що на вихідних даних п-датчика зростання амплітуди зовсім не спостерігалось.

На рис. 4 показані характерні фазові портрети побудовані під час аналізу вихідної вибірки землетрусу малої інтенсивності з z-датчика.

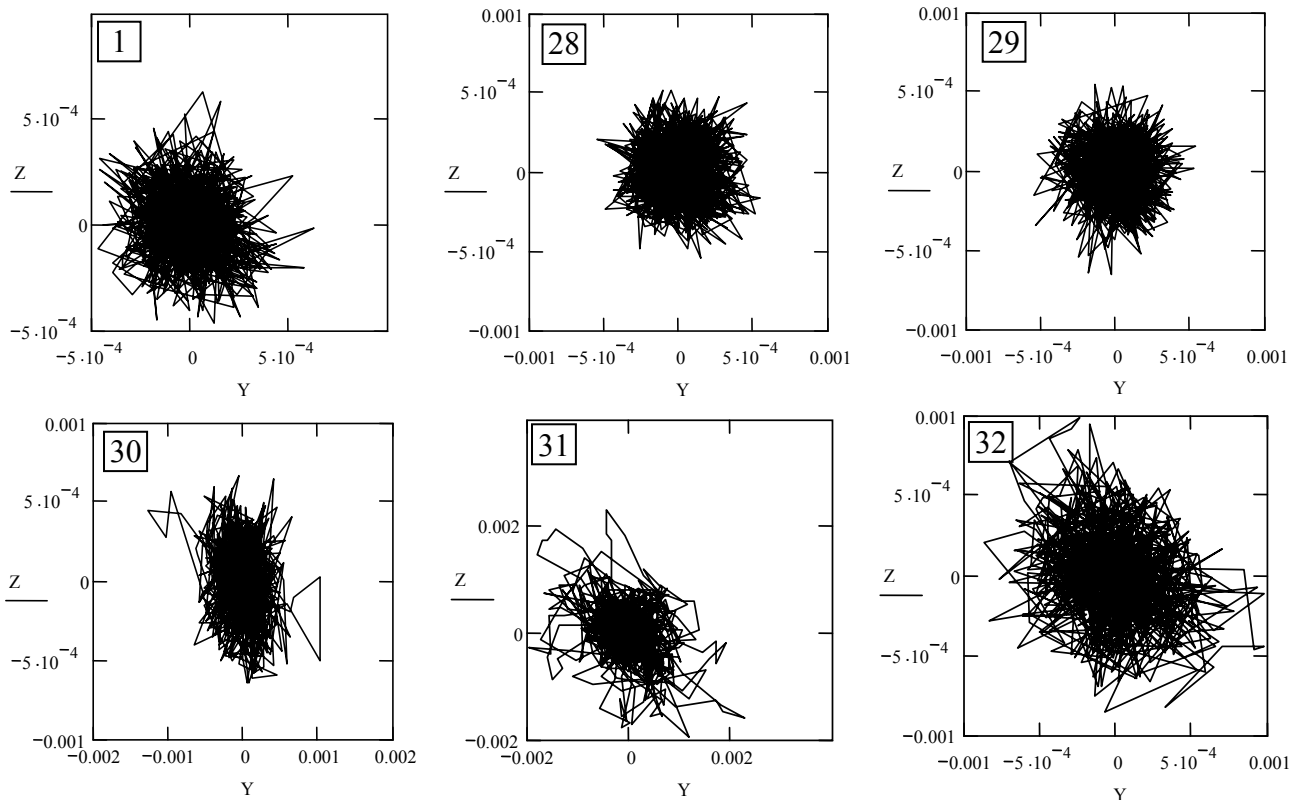


Рис. 4. Фазові портрети, побудовані під час аналізу вихідної вибірки землетрусу малої інтенсивності з z-датчика

Аналіз фазових портретів, наведених на рис. 4, показує, що форма фазових портретів даних z-датчика відрізняється від фазових портретів даних е-датчика і п-датчика.

Насамперед це видно під час аналізу даних фону.

Така форма фазових портретів фону скоріше за все обумовлено шумами z-датчика.

З аналізу фазових портретів, наведених на рис. 4, також видно, що, як і при аналізі даних е-датчика і п-датчика, фазові портрети z-датчика у 1 – 29 «стрибаючих вікнах» відповідають фону.

У 30 «стрибаючому вікні» форма фазового портрету починає змінюватися (фазовий портрет стискається по осі Y).

Найбільш характерними є фазові портрети 31 і 32 «стрибаючих вікнах», у яких спостерігаються значні викиди амплітуди за межі фонового фазового портрету (зосередженого у центрі).

Таким чином, за допомогою фазових портретів даних z-датчика вдалося визначити початок коливань земної поверхні, але це було зробити складніше у порівнянні з аналізом фазових портретів е-датчика і п-датчика.

Аналіз сигналів геофізичних датчиків для виявлення землетрусу малої інтенсивності з використанням фрактальної розмірності

Для аналізу можливості виявлення вибухів з використанням фрактальної розмірності також використовувалися реальні дані, що наведені на рис. 1.

Проведемо оцінку фрактальних властивостей даних трьох датчиків під час фіксації вибуху, розмір вибірок дорівнює $N = 33\,000$. 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. 5.

По осі абсцис відкладені значення початку «стрибаючого вікна» (всього 33 значення), а по осі ординат, відповідні «вікнам», фрактальні розмірнос-

ті 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. 5 видно, що на 29 положенні „стрибаючого вікна” фрактальна розмірність даних z-датчика (точкова лінія) знижується до мінімального рівня $D_1 = 1,45$, що відповідає початку коливань земної поверхні. Але існує ще одне зниження фрактальної розмірності z-датчика до рівня $D_1 = 1,48$, що може привести до хибного прийняття рішення про початок коливань земної поверхні.

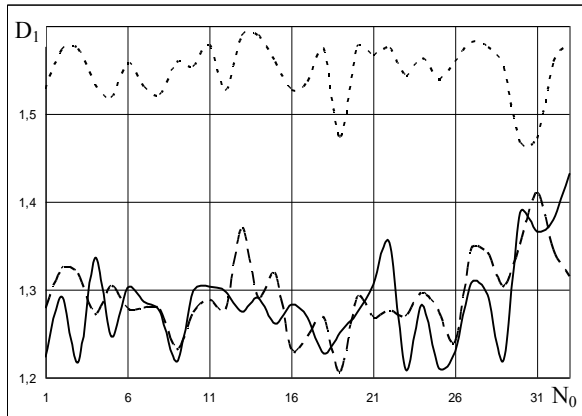


Рис. 5. Залежність фрактальної розмірності, що розрахована методом покриття, від положення «стрибка»

Крім того, зміна фрактальних розмірностей даних z-датчика відрізняється від зміни величин фрактальних розмірностей даних е-датчика і п-датчика. Така ж розбіжність спостерігалася і під час аналізу даних з використанням форм фазових портретів.

Аналіз фрактальних розмірностей даних е-датчика і п-датчика, наведених на рис. 5, показує, що вони досягають максимальних значень під час фіксації коливань земної поверхні, $D_1 = 1,41$ і $D_1 = 1,43$ відповідно.

Таким чином, за максимальним значенням фрактальної розмірності (яка розраховувалася за допомогою методу покриття) даних е-датчика і п-датчика можна визначити момент початку коливань земної поверхні.

Також необхідно відзначити, що на вихідних даних е-датчика і п-датчика зростання амплітуди зовсім не спостерігалася.

Проведемо оцінку фрактальних властивостей даних трьох датчиків під час фіксації землетрусу малої інтенсивності 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. 6.

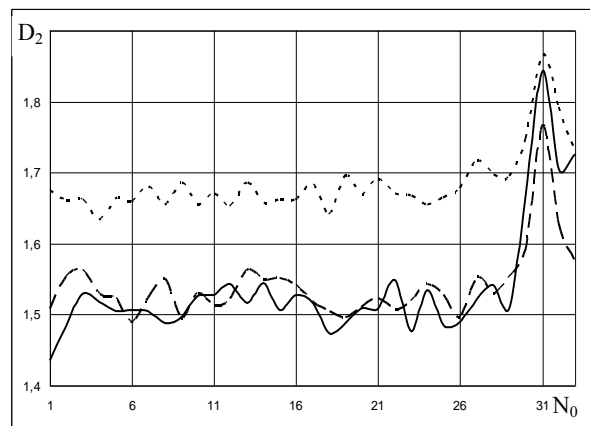


Рис. 6. Залежність фрактальної розмірності, що розрахована методом визначення довжини лінії, від положення «стрибка»

З рис. 6 видно, що на 30 положенні „стрибаючого вікна” фрактальна розмірність збільшується (для всіх трьох датчиків) и досягає свого максимального рівня $D_2 \sim 1,75 - 1,95$ при 31 положенні „стрибаючого вікна”, що відповідає максимальній фазі землетрусу малої інтенсивності. На відміну від розрахунку фрактальної розмірності методом покриття, розрахунок методом визначення довжини лінії дозволяє аналізувати данні всіх трьох датчиків. Під час аналізу даних е-датчика і п-датчика фрактальні розмірності у 1 – 29 «стрибаючих вікнах» коливаються у межах $D_2 = 1,45 - 1,55$, а даних z-датчика – $D_2 = 1,65 - 1,7$, 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

$$\langle D_2 \rangle = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K D_{02i}, \quad (3)$$

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 $\langle D_{2e} \rangle = 1,508783$, середнє значення фрактальної розмірності даних п-датчика – $\langle D_{2n} \rangle = 1,527055$, середнє значення фрактальної розмірності даних z-датчика – $\langle D_{2z} \rangle = 1,670472$. Середнє значення фрактальної розмірності фону всіх трьох датчиків дорівнює $\langle D_2 \rangle = 1,56877$.

Середнє значення фрактальної розмірності даних е-датчика, які відповідають землетрусу малої інтенсивності, дорівнює $\langle D_{2e} \rangle = 1,73495$, середнє значення фрактальної розмірності даних п-датчика – $\langle D_{2n} \rangle = 1,639375$, середнє значення фрактальної розмірності даних z-датчика – $\langle D_{2z} \rangle = 1,783825$. Середнє значення фрактальної розмірності землетрусу всіх трьох датчиків дорівнює $\langle D_2 \rangle = 1,719383$.

У порівнянні з середнім значенням фрактальної розмірності фону різниця середніх значень фрактальної розмірності землетрусу малої інтенсивності буде складати $\Delta \langle D_2 \rangle = 0,150613$.

Таким чином, зміна величини фрактальної розмірності, яка розраховується за допомогою методу визначення довжини лінії, дозволяє визначити момент початку коливань земної поверхні. Середні значення фрактальної розмірності фону і землетрусу дають можливість виставити порогові значення фрактальної розмірності для автоматичного виявлення початку коливань земної поверхні.

Висновки

1. Форму фазових портретів і фрактальну розмірність можна використовувати для якісної та кількісної оцінки форми сигналів геофізичних (сейсмічних) датчиків.

2. Зміна форми фазових портретів дозволяє виділити початок коливань земної поверхні, коли на вихідних даних геофізичних датчиків зростання амплітуди не спостерігається.

3. За максимальним значенням фрактальної розмірності даних геофізичних датчиків можна визначити момент початку коливань земної поверхні малої інтенсивності.

4. Під час подальших досліджень доцільно провести аналіз впливу розмірів «вікна» і величини «стрибка» на форму фазових портретів і величину фрактальної розмірності.

Список літератури

1. Любушин А.А. Геофизический мониторинг: шумы, сигналы, предвестники / А.А. Любушин // Проблемы геофизики 21 века. Книга 2. – М.: Наука, 2003. – С. 70-94.
2. Мала С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Мала / – М.: Мир, 2005. – 671 с.
3. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
4. Пащенко Р.Э. Формирование фрактальных сигналов / Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2005. – 298 с.
5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Г.Н. Доля, В.К. Иванов, Р.Э. Пащенко, А.М. Стадник и др.; под ред. Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО “НЭО “ЭкоПерспектива”, 2006. – 348 с.
6. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 360 с.
7. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics, edited by D.A. Rand L.S. Young. – Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. – P. 366-381.
8. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

Надійшла до редколегії 14.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Полярус, Харківський автодорожній університет, Харків/

АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ И ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

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

Рассмотрена возможность использования фазовых портретов и фрактальной размерности для анализа сигналов геофизических (сейсмических) датчиков для обнаружения землетрясений малой интенсивности. Показано, что изменение формы фазовых портретов позволяет обнаружить начало колебаний земной поверхности, когда на выходных данных геофизических датчиков роста амплитуды не наблюдается. Установлено, что по максимальным значениям фрактальной размерности данных геофизических датчиков можно определить момент начала колебаний земной поверхности малой интенсивности.

Ключевые слова: фазовый портрет, фрактальная размерность, геофизический (сейсмический) датчик.

ANALYSIS SIGNALS OF GEOPHYSICAL SENSORS IS FOR THE EXPOSURE OF EARTHQUAKES SMALL INTENSITY WITH THE USE PHASE PORTRAITS AND FRACTAL DIMENSION

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

Possibility of the use of phase portraits and fractal dimension is considered for the analysis signals of geophysical (seismic) sensors for the exposure of earthquakes small intensity. It is shown that the change form of phase portraits allows to select beginning vibrations of earthy surface, when on the dates of geophysical sensors amplitude given not observed. It is set that after the maximal value of fractal dimension dates of geophysical sensors it is possible to define the moment beginning vibrations earthy surface of small intensity.

Keywords: phase portrait, fractal dimension, geophysical (seismic) sensor.