

УДК 504.064.3:574(076):530.1

¹ Дичко Аліна Олегівна

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології

² Єремєєв Ігор Семенович

Доктор технічних наук, професор, професор кафедри комунальної теплоенергетики

¹ Національний технічний університет України «КПІ», Київ² Київський державний університет управління та підприємництва, Київ

ОРГАНІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ФРАКТАЛІВ

Анотація. Запропоновано підхід до визначення структури вимірювальної мережі моніторингу довкілля, відображення ареалу забруднення та оцінювання динаміки «плями» забруднення, який використовує методи теорії фракталів, теорії множин і загальної топології.

Ключові слова: моніторинг довкілля, теорія фракталів, теорія множин

Аннотация. Предлагается подход к определению структуры измерительной сети мониторинга окружающей среды, отображению ареала загрязнения и оценки динамики «пятна» загрязнения, который использует методы теории фракталов, теории множеств и общей топологии.

Ключевые слова: мониторинг окружающей среды, теория фракталов, теория множеств

Annotation. The approach to definition of the optimal structure of measuring environmental monitoring network, displaying the area of contamination and evaluation of dynamics of the pollution's "spots" that uses the methods of the theory of fractals and the theory of sets and general topology is proposed. Presented approach allows, under conditions of ensuring the requirements of the admissible metric (radius of detectors sensitivity) and taking into account the terrain and other features of the migration of contaminants, to find such optimal configuration of the monitoring system that will provide reliable information on the state of the environment in the controlled areal. Using the proposed algorithm it's possible to construct a set of fractal contours of any configuration with a given accuracy of reflections, which characterize the distribution of contaminants of the same level in the controlled areal, and to use the contours of the same level, or surfaces, characterizing the areal status at different times, to identify the dynamics of contaminants migration.

Key words: environmental monitoring, fractal theory, set theory

Вступ

Організація моніторингу довкілля передбачає виконання таких головних завдань:

– визначення структури вимірювальної мережі (з метою максимально правдоподібного оцінювання стану довкілля);

– визначення меж ареалу та щільності забруднення на підставі даних вимірювальної мережі та відповідних алгоритмів інтерполяції та згладжування;

– визначення динаміки «плями» забруднення шляхом обчислення метрики, що характеризує відстань у метричному просторі між кривою (поверхнею), що характеризує поточний стан ареалу, та кривою (поверхнею), що характеризувала контрольований ареал під час попередніх вимірювань, з метою прогнозування змін у стані довкілля.

Зазначені завдання так чи інакше реалізуються, але вони не поєднані системним підходом, який би гармонізував усі процедури моніторингу з метою досягнення оптимальних результатів з точки зору достатності й достовірності інформації, а також економії ресурсів [1].

Мета дослідження

Структура вимірювальної мережі формується виходячи з розмірів ареалу, що контролюється, вартості кожного з детекторів (або процедур вимірювання) і каналів зв'язку та ймовірності виявлення забруднення на межі чутливості детектора, що не враховує рельєф і особливості розповсюдження забруднень у конкретній області обраного ареалу [2-3].

Ареал та щільність забруднення визначаються на підставі даних вимірювальної мережі та відповідних алгоритмів інтерполяції та згладжування. Однак загальний контур забруднення формується таким чином, що його важко алгоритмізувати і зберегти у закодованому вигляді, а потім використовувати для визначення метрики шляхом порівняння «образів» попередніх та поточних вимірювань [4].

Нарешті, визначення динаміки «плями» забруднення здійснюється, але лише для простих конфігурацій ареалів, що створює певні труднощі у разі складних, особливо тривимірних конфігурацій [5].

Мета статті

Мета статті – це використання методів теорії фракталів, а також теорії множин та загальної топології для оптимального вирішення зазначених завдань моніторингу довкілля.

Визначення структури вимірювальної мережі

Під час вирішення завдань моніторингу довкілля часто виникає проблема обґрунтування кількості та місць відбирання проб. Звичайно, що необхідно контролювати джерела викидів та скидів, а також особливі місця довкілля (місця водозабору, захоронення різного виду відходів, рекреаційні зони тощо). Але як контролювати значні терени, на яких джерела забруднень відсутні? Контроль може бути вибірковим, спорадичним тощо. Але це не може дати однозначної відповіді щодо якості такого контролю. У той же час існують певні підходи, які можна було б застосувати для вирішення завдань організації моніторингу довкілля. Одним з таких підходів є застосування методів, що випливають з наслідків теорії фракталів [6], зокрема підхід, що базується на розбудові безперервної функції, чия область визначення – відрізок, а область значень – квадрат на площині (крива Пеано). Ця процедура може бути пояснена на рис. 1, де $z = P_1(x)$, I – одиничний відрізок $[0, 1]$, S – одиничний квадрат $I \times I$, тобто

$$S = \{(x, y) : x, y \in I\}.$$

Трансформація відрізка у площину відбувається наступним шляхом: одиничний відрізок розглядається як діагональ квадрата, який розбивається у свою чергу на 9 квадратів з позначками 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, після чого починається рух по діагоналі квадрата 0 з лівого нижнього кута до правого верхнього, звідти – по діагоналі квадрата 1 (з верхнього лівого кута до правого нижнього) і відповідно по діагоналям квадратів 2-8, як це зазначено на рис. 1 кривими зі стрілками. Друга ітерація процесу побудови кривої Пеано для реалізації, наприклад, асиметричного розподілу компонентів вимірювальної мережі (коли у квадраті 3 треба збільшити щільність вимірювальних приладів) являє собою «фракталізацію» квадрата 3 (рис. 2), коли $x_3: \rightarrow x_3 x_j$ ($x_j = [0, 8]$), третя – $x_i: \rightarrow x_i x_j x_k$

($x_j = [0, 8]$, $x_k = [0, 8]$) і т.д. Для кожного $\varepsilon > 0$ може існувати такий номер ітерації $K > 0$, для якого у разі $m > n > K$ виконується нерівність

$$d\{P_m(x), P_n(x)\} < \varepsilon \text{ для усіх } x \in I,$$

де $d\{P_m(x), P_n(x)\}$ – евклідова метрика, що визначає відстань у метричному просторі між точками $P_m(x)$ та $P_n(x)$, причому існує така залежність

$$d\{P_m(x), P_n(x)\} < \frac{\sqrt{2}}{3^n}.$$

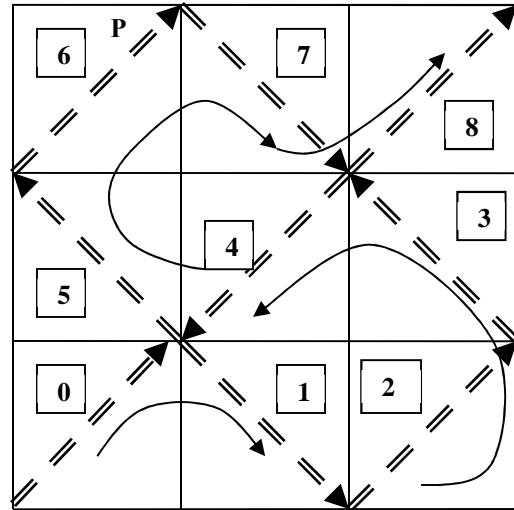


Рис. 1. Розбудова кривої Пеано

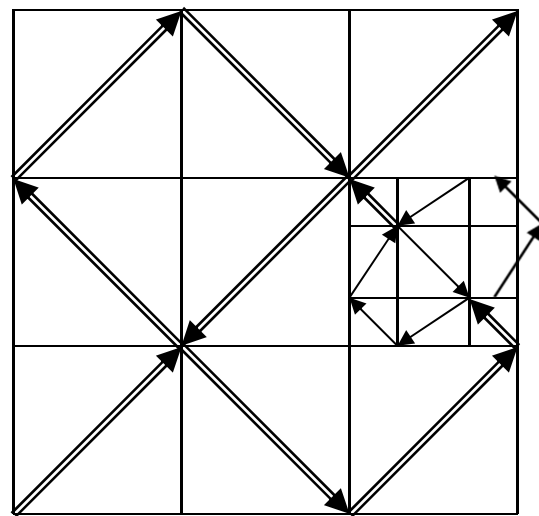


Рис. 2. Розбудова асиметричної кривої

Обираючи K згідно умови $\sqrt{2}/3^K \leq \varepsilon$, де припустиме значення розбіжності ε визначає фактично припустиму похибку трансформації відрізка у площину, можна таким чином задаватися й похибкою у відображенні стану довкілля, якщо звернутися до зворотного перетворення ареалу, який контролюється, у відповідність відрізка, що поєднує усі контрольовані точки ареалу. Інакше кажучи, кількість точок контролю (за умов рівномірного розташування їх на площині та відповідності бажаній метрики) буде дорівнювати $3^k/\sqrt{2}$.

Існує й інший підхід до зміни розмірності шляхом перетворення, яке зберігає міру. Цей підхід має свій початок від ідеї математика Кантора про відображення точок квадрата (тобто площі) у точки на лінії: якщо двома координатами $x = 0,abcd\dots$ та $y = 0,A,B,C,D\dots$ визначено положення будь-якої точки квадрата z , то можна відшукати координату $z = 0,a.A,b.B,c.C,d.D\dots$, яка визначає точку на площині квадрата – відображення зазначеної вище точки самого квадрата. І навпаки, якщо зазначена довільна точка на відрізку – зображенні квадрата, то можна відшукати точку на самому квадраті, яка відображається цією точкою [5]. На прикладі рис. 3 кожна точка площини представляється парою десятинних дробів (наприклад, $x = 0,600503001\dots$, $y = 0,700606001\dots$), які розбиваються на групи (і, навпаки, кожній парі координат відповідає конкретна точка площини). Кожна цифра десятинного розкладу, крім нуля, починає нову групу. Ці групи комбінуються і перетворюються в один нескінченний десятинний дріб, який представляє точку на площині ($z = 0,670050060306001001\dots$). Зазначена процедура може бути поворотною.

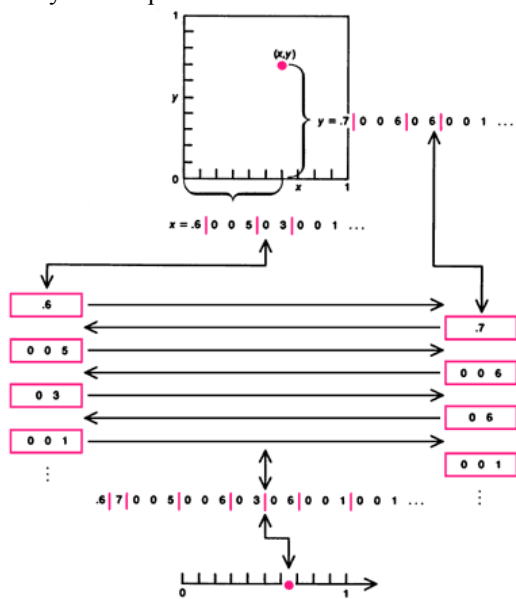


Рис. 3. Зміна розмірності шляхом перетворення, яке зберігає міру

Обидва підходи дозволяють, за умов виконання вимог забезпечення припустимої метрики (радіусу чутливості детекторів) і з урахуванням рельєфу і інших особливостей міграції забруднень, знайти таку оптимальну конфігурацію системи моніторингу, яка забезпечить надання достовірної інформації щодо стану довкілля у контрольованому ареалі.

Визначення ареалу забруднення

Останнім часом для розбудови плоских та просторових кривих та поверхонь використовують також результати теорії фракталів. Такий підхід є плідним оскільки будь-яка конфігурація може бути

відображена за допомогою досить простого алгоритму з будь-якою точністю. Збереження її вимагає небагато пам'яті і, до того ж, визначення метрики, що характеризує відстань у метричному просторі між двома кривими (поверхнями), що відображує стан контрольованого ареалу у різні моменти часу (тобто характеризує динаміку процесів міграції забруднень), також не є складним.

Розглянемо алгоритм розбудови двовимірної кривої за даними вимірювань у різних точках ареалу (просторове відображення можна отримати як накладання ізоліній, що характеризують певні рівні забруднень), використовуючи ідею розбудови так званої сніжинки Коха [6]. Елементом розбудови є одиничний відрізок кривої, середня третина якого замінюється двома відрізками такої ж довжини, які утворюють рівнобічний трикутник на базі цієї третини (рис. 4). Тут ξ_i – довжина третини відрізка для i -ї ітерації; L_0 – довжина вихідного (одиничного) відрізка.

Очевидно, що зменшуючи величину ξ й застосовуючи ефективний алгоритм відображення реального розподілу точок у просторі у відповідну фрактальну структуру, можна з будь-якою заздалегідь заданою точністю відтворити функціональну залежність у межах області, яка нас цікавить. Під час створення алгоритму формування фрактальної структури слід зауважити, що у фрактальних системах припускається певна узгодженість або кореляція, наприклад між сусідніми близько екстремумами, коли імовірність появи екстремуму такої ж величини з віддаленням від вихідної точки зменшується.

Слід зазначити, що у підході до формування фрактальної структури, описаному вище, є суттєвий недолік: жорстка залежність висоти рівнобічного апроксимуючого трикутника від довжини відтинку апроксимації L . Це примушує обирати довжину вихідного відтинку апроксимації L_0 такою, щоб амплітуди максимальних відхилень реальних значень фактичного розподілу $F^{(R)}(f_i)$ від апроксимуючого відрізка прямої на цьому відтинку були сумірні з висотою трикутника $h_{10} = (L_0/3)\sin 60^\circ = 0,288L_0$. Для усунення цього недоліку пропонується використати модифікований алгоритм фракталізації, який передбачає створення дихотомічної фрактальної структури.

Її ідея полягає у використанні «плаваючої» висоти апроксимуючого рівнобедреного трикутника, а останній будується не на середній третині відрізка, а на усьому відрізку L_{m-1} : знаходиться середина вихідного відрізка прямої довжини L_{m-1} , який поєднує граничні точки ділянки «хаосу», і у цій точці підноситься перпендикуляр, висота якого h_{mj} дорівнює вибіркового середньому значенню відхилення ξ фактичного розподілу $F^{(F)}(f_i)$ від «моделі» $F^{(R)}(f_i)$ (яку у даному випадку представляє відрізок L_0), а знак (тобто орієнтація всередину чи зовні ділянки апроксимації) відповідає знаку цього відхилення.

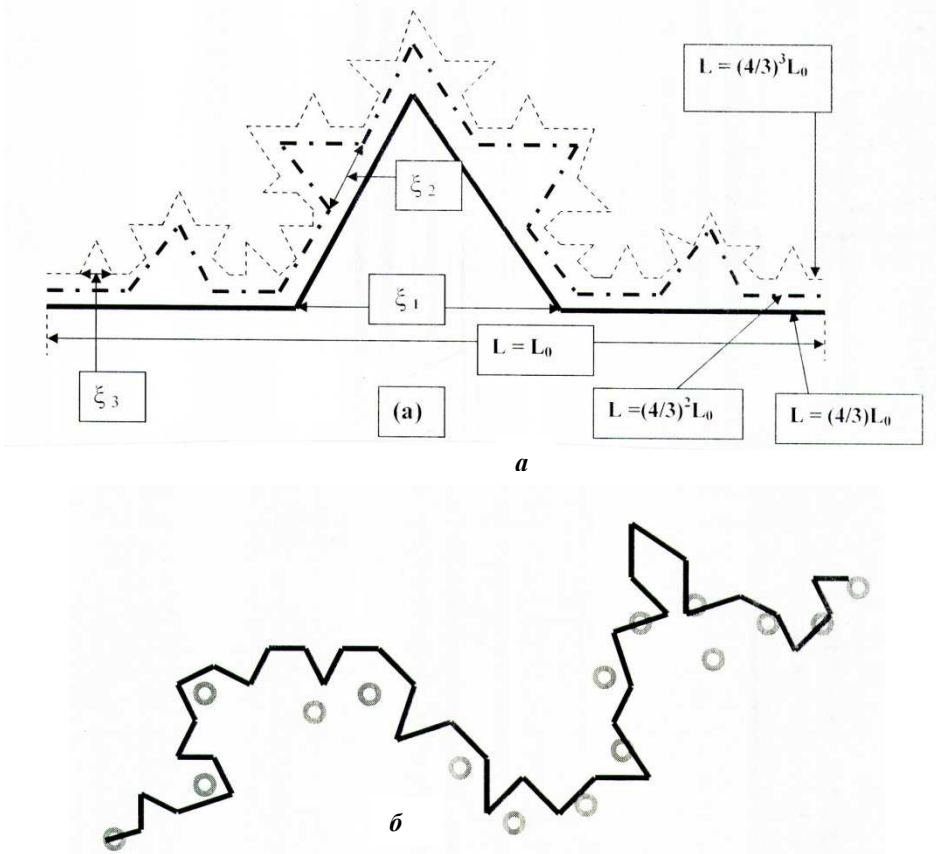


Рис. 4. Приклад розбудови фрагменту сніжинки Коха – (а) та використання цього методу для відображення контуру по окремих точках – (б)

Якщо $|\xi| < |\xi_{\max}|$, де ξ_{\max} – максимально припустиме значення відхилення, яке визначається величиною припустимої похибки апроксимації, процес фракталізації припиняється. У протилежному випадку на основі L_m з урахуванням висоти h_{mj} будується рівнобедрений трикутник, бокові сторони якого являють собою нову модель розподілу змінної, що нас цікавить, і тепер визначається вибіркоче середнє відхилення (та його знак) на кожному з отриманих ділянок апроксимації і т.д. Тобто кожного разу виконується заміна чергового відрізка апроксимуючої прямої ламаною лінією, яка являє собою сторони трикутника, чиєю основою є відрізок апроксимуючої прямої L_m , отриманої на попередньому кроці фракталізації. Блок-схема алгоритму фракталізації наведена на рис. 5, а а загальний принцип побудови описаної фрактальної структури – на рис. 5, б. Вихідними даними тут є $F^{(R)}$, L_0 , ξ_{\max} , j , m . Після кожного кроку фракталізації обчислюється вибіркоче стандартне відхилення $d[F^{(R)}$, $F^{(F)}$], яке порівнюється з $|\xi_{\max}|$. На підставі отриманих результатів порівняння приймається рішення щодо продовження процесу розбудови фрактальної структури або його завершення. Результат фракталізації (модель, яка апроксимує «хаотичний» процес на відтинку апроксимації) може бути записаний у вигляді величини фракталу

$L_m = L_0(2^{m-1})^{-1}$, де m – кількість кроків, виконаних під час побудови фрактальної структури, а також набору з 2^{m-1} значень координат фракталів.

Наведений алгоритми є простим, легко реалізуються і дозволяє отримувати досить гарний ступінь апроксимації негладких функцій за невелику кількість кроків.

Визначення динаміки «плями» забруднення

Навколишнє середовище (НС), як усяка складна система, являє собою множину елементів певної матеріальної природи, що знаходяться у взаємовідносинах. У кожному з цих відносин фігурує та чи інша змінна, множина її станів і множина математичних, логічних чи евристичних властивостей, які визначаються на цій змінній.

Якщо існує певна кінцева послідовність відношень, що дозволяють виявити заданий елемент множини $x_i \in X$, то таку послідовність називають ефективним процесом ідентифікації. Система вважається такою, що спостерігається, якщо вона може бути визначена за допомогою певного множинного експерименту (процедури ідентифікації), наприклад шляхом спостереження за станом тієї чи іншої змінної (у даному разі вмістом забруднення у пробах) у просторі та часі.

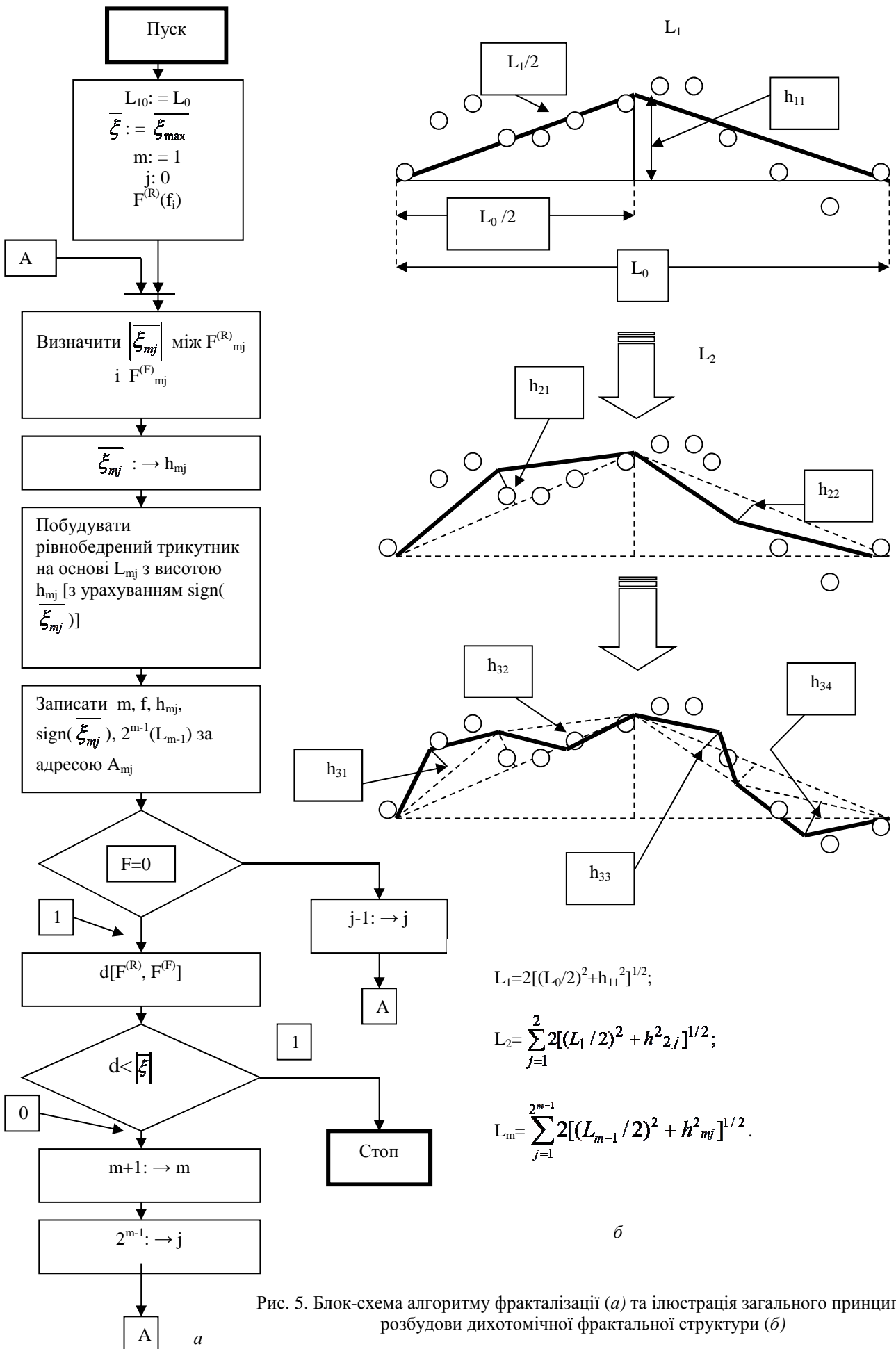


Рис. 5. Блок-схема алгоритму фракталізації (а) та ілюстрація загального принципу розбудови дихотомічної фрактальної структури (б)

НС як система, що підлягає зовнішнім збуренням, частина яких слабо контролюється чи не визначена (тому що в припущеннях щодо властивостей НС зазвичай оминаються деякі принципово важливі складові, враховується менше формальних об'єктів, ніж необхідно тощо), і спостерігається лише в обмеженій кількості точок, може розглядатися як відкрита система, для якої характерна наявність хоча б одного елемента множини, для якого не існує ефективного процесу ідентифікації, і рішення про стан НС доводиться приймати за наявності невизначеності. Невизначеність виникає й у випадках, коли стан НС оцінюється на межі зони дії (чи чутливості) каналу (засобу) спостереження або на межі, що розділяє два конкретних стани. Інакше кажучи, зони дії каналів спостереження не мають чітких меж і результати спостережень поблизу цих нечітких, розмитих меж можуть характеризуватися лише ступенями належності, а не явно заданими функціями. У цьому випадку невизначеність результатів спостереження призводить до невірності оцінок динаміки стану НС.

У зв'язку із зазначеним задача ідентифікації динаміки «плям» забруднення (ПЗ) може бути зведена до аналізу спостережень і зіставлень їхніх результатів одне з одним шляхом оцінювання метрики, тобто негативної функції, що характеризує ступінь близькості упорядкованої пари точок (кривих, поверхней) у метричному просторі. Як критерій розбіжності при ідентифікації ПЗ може бути використано евклідову метрику. Це відповідає ситуаціям, для яких "звичайна евклідова відстань", як критерій близькості (або розбіжності), виправдана [7]:

- усі спостереження взаємно незалежні й можуть мати одну й ту ж саму дисперсію;
- компоненти вектора спостережень однорідні за своїм фізичним змістом й однаково важливі з точки зору їхнього використання під час ідентифікації;
- ознаковий простір співпадає з геометричним простором і поняття близькості об'єктів спостережень збігається з поняттям геометричної близькості в цьому просторі.

Евклідова метрика має такий загальний вигляд:

$$d_E(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{i,j=1}^n (x_i^{(p)} - x_j^{(p)})^2},$$

де x_i та x_j – компоненти вектора спостережень, а p – ознаковий простір ($p = 1, 2$ або 3 залежно від розмірності об'єкта спостереження).

Визначення метрики здійснюється таким шляхом. Якщо необхідно відстежити міграцію кожного з рівнів забруднення, множини спостережень (у відповідних точках мережі) минулого і поточного циклів контролю (кожна окремо) розподіляються за рівнями забруднень на окремі підмножини, які займають певні довірчі інтервали, однакові для будь-яких процедур

вимірювання. Порівняння відбуваються для кожної з ізоляцій окремо. Якщо ж необхідно просто виявити загальну розбіжність між результатами вимірювань минулого та поточного циклів вимірювання, обчислюється загальна метрика.

Розбіжність, що має місце у разі порівняння результатів минулого ("еталонного") і сучасного спостережень, може бути охарактеризована метрикою

$$d_E(f^{(1)}, f^{(2)}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^{(2)} - x_i^{(1)})^2},$$

де n – кількість вузлів вимірювальної мережі.

Ця метрика оцінює міру прирощення інформації щодо стану НС при розподілі n елементів множини $f^{(2)}$, що спостерігався під час поточної процедури контролю, відповідно до інформації про стан НС, який відповідав розподілу $f^{(1)}$, що був оцінений під час попередньої процедури контролю й був прийнятий за еталон (точніше, за порівняльну базу). Причому, якщо статистику $f^{(1)}$ достатньо добре визначено, замість елементів $f^{(1)}$ використовують їхні математичні сподівання. Прирощення інформації, що визначається в разі заміни $f^{(2)}$ на $f^{(1)}$, може розглядатися як несуттєве, а самі розподіли як ідентичні лише тоді, коли статистика $f^{(1)}$ поглинає статистику $f^{(2)}$ або коли дані щодо статистик відсутні, але значення міри не перевищує подвійної похибки, притаманної методиці, що використовується для аналізу проб.

У протилежному випадку це прирощення характеризує динаміку стану за період між спостереженнями. Неповнота вихідних даних, що є наслідком обмежених можливостей спостереження об'єктів контролю та недостатньої інформації про чинники, які впливають на процеси у НС, свідчить про те, що якщо

$$V(N, f) = \{ \tilde{f} \in F : N(\tilde{f}) = N(f) \}$$

є множина всіх елементів \tilde{f} , які не відрізняються від елемента f за допомогою інформації N , то значення $N(f)$ не дозволяє сказати, яка з множин $S(\tilde{f}, \xi)$, $\tilde{f} \in V(N, f)$ відповідає ξ -наближенню, що є бажаним.

У такому разі потрібна додаткова інформація (багаторазові процедури ідентифікації) і потрібне ξ -наближення може бути знайдене лише за умов, що пересічення множин ξ є не пустим, тобто

$$A(N, f, \xi) = \text{MIN} \{ S(f, \xi) \neq 0 \}, f \in V(N, f), \quad (1)$$

$$D(N, f, \xi) = \text{MIN} \{ f(1), \dots, f(k) \}, \tilde{f} \in V(N, f), \quad (2)$$

де MIN - оператор багатозначної логіки, що відповідає операції логічного множення.

Такий підхід є консервативним і дозволяє виявити найменшу метрику, тобто мінімальні зміни ПЗ за час спостереження. Якщо цікаво дізнатися про найбільш можливі зміни ПЗ за той же час, слід звернутися до оцінки, що отримала назву "візантійської угоди", або ж просто замінити

у рівняннях (1) або (2) оператор MIN на оператор багатозначної логіки MAX, який відповідає операції логічного додавання.

Вищенаведений підхід дозволяє виявити факт зміни стану ПЗ та абсолютну величину (скаляр) вектора змін шляхом використання однієї й тієї ж мережі фіксованих постів контролю або майданчиків, з яких беруться проби (незалежно від дрейфу меж ПЗ), але він не дозволяє безпосередньо виявити напрям тренду, який треба обчислювати окремо (наприклад, з використанням методів визначення центра ваги нечіткої множини).

Без загрози втрати точності можна прийняти, що усі забруднення розміщені в одній площині, на якій зафіксовані координати точок відбирання проб. Визначення міри між вихідним (попереднім) і поточним розподілом забруднень відносно фіксованих точок, в яких відбиралися проби (визначалося забруднення) і дасть відповідь

на наявність або відсутність факту рухомості плям забруднення (для кожного з видів забруднення). При цьому критерієм рухомості буде перевищення мірою певного порогу, який обумовлений дрейфом вимірювальних приладів або точністю методик визначення забруднень.

Висновки

Запропонований підхід, що базується на використанні методів теорії фракталів та теорії множин і загальної топології, дозволяє обирати оптимальну структуру вимірювальної мережі, яка враховує особливості контрольованого ареалу, а також будувати за допомогою запропонованого алгоритму множини фрактальних ізоліній будь-якої конфігурації із заданою точністю відображення, які характеризують розподіл забруднень одного рівня, і використовувати ізолінії певного рівня або поверхні для виявлення динаміки міграції забруднень.

Список літератури

1. Доманецька, І. М. Концептуальна модель побудови єдиного інформаційного простору для вирішення завдань автоматизованої технології ведення екологічних паспортів територій в рамках державної системи моніторингу довкілля [Текст] / І. М. Доманецька, О. В. Хроленко: зб. наук. пр. // Управління розвитком складних систем. – К. : КНУБА, 2010. – №4. – С.40-44.
2. Якуніна, І. В. Методи и приборы контроля окружающей среды. Экологический мониторинг [Текст] / И.В. Якунина, Н.С. Попов. – Тамбов : ТГТУ, 2009. – 188 с.
3. Safety Reports Series #64. Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring [Text]. – Vienna : IAEA, 2010. – С. 232.
4. Баранова, О. С. Создание автоматизированной системы мониторинга загрязнения окружающей среды породными отвалами: материалы II міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих вчених [“Інформаційні управляючі системи та комп’ютерний моніторинг” / О. С. Баранова, В. Г. Адамов] – (Донецьк, 2012).
5. Єремєєв, І. С. Моніторинг довкілля у зоні впливу сховищ рідких радіоактивних відходів: матеріали V міжнародної конференції [«Сотрудничество для решения проблемы отходов» / І. С. Єремєєв – (Харків, 2008).
6. Кроновер, Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории [Текст] / Р. М. Кроновер. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.
7. Александров, П. С. Введение в теорию множеств и общую топологию [Текст] / П. С. Александров – М. : Наука, 1977. – 368 с.

References

1. Domanetska, I. M. (2010). Conceptual model of construction of single informative space for the decision of tasks of computer-aided technology of conduct of ecological passports of territories within the framework of the state system of monitoring of environment. Management of development of complex systems. Kyiv, Ukraine: KNUCA, 4, p. 40-44.
2. Yakunina, I. V. (2009). Methods and devices of environmental control. Environmental monitoring. Tambov, Russia: TSTU, 188p.
3. Safety Reports Series (2010). Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring.- Vienna: IAEA, 64, 232 p.
4. Baranova, O. S. (2012). Creation of automated system for environment pollution monitoring of rock dumps: materials of II International scientific and technical conference of students and young scientists "Information control systems and computer monitoring", Donetsk, Ukraine.
5. Yermeev, I. S. (2008). Environmental monitoring in the area of influence of storage of liquid radioactive waste: materials of Vth International conference "Collaboration for solutions of problems of waste", Kharkiv, Ukraine.
6. Kronover, R. M. (2000). Fractals and chaos in dynamical systems. Fundamentals of the theory. Moscow, Russia: Postmarket, 352 p.
7. Aleksandrov, P. S. (1977). Introduction to set theory and general topology. Moscow, Russia: Science, 368 p.

Стаття надійшла до редколегії 2.07.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.К.Ткачук, національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.